

**Tesis presentada en opción al
título de
INGENIERO MECÁNICO**

TÍTULO:

**MECANISMO DE ACCIONAMIENTO DE
SEDIMENTADORES DE MINERALES LATERÍTICOS
CON TECNOLOGÍA CARBONATO AMONIACAL**

AUTOR: Yindira Ramos Wilson

TUTOR: Asist. Ing. Murpis Pompa Larrazabal

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo: Yindira Ramos Wilson

Autora de éste trabajo de diploma, certifico la propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez” el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

Yindira Ramos Wilson

Ing. Murpis Pompa Larrazábal

PENSAMIENTO

“No hay que confundir nunca el conocimiento con la sabiduría. El primero nos sirve para ganarnos la vida; la sabiduría nos ayuda a vivir”

Sandra Carey

AGRADECIMIENTOS A:

Dios:

Por haberme permitido llegar hasta este momento y compartir esta felicidad con mi familia y amistades.

A mis amigos:

Por haber estado siempre en el momento preciso y contar con su ayuda incondicional y de todas las formas que las necesito.

Mi papá y hermana:

Por compartir este momento conmigo.

A mi madre:

Por haber estado siempre y brindarme el apoyo durante mis años de estudio y mi vida.

A mi esposo y tutor:

Por su amor, amistad y por todo apoyo incondicional que me ha dado.

A al colectivo de profesores:

Que me acompañó en el camino hasta la meta.

A la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

Por haber permitido el desarrollo del trabajo de graduación.

ACTO QUE DEDICO A:

Dios:

Por la bendición, protección, salud y sabiduría regalada durante todo este tiempo. También por ser mi punto espiritual de apoyo, y muy especialmente por la vida.

Mis padres:

Arelis Wilson Echavarría, Juan Carlos Ramos, por ser siempre mi mejor ejemplo; por su apoyo incondicional, sus consejos y muy especialmente por su gran amor.

Mis Hermanos:

Juan Carlos Ramos Wilson en su memoria, Lisandra Ramos por su cariño, comprensión y apoyo en diferentes aspectos de mi vida personal.

Mi esposo:

Murpis Pompa Larrazabal por depositar su confianza en mí en todos los aspectos de la vida.

A mis amigas y amigos:

Por su comprensión, paciencia e inspiración.

A todos:

Los que de una o de otra forma han manifestado sus buenas intenciones y mucho cariño hacia mi persona.

Que Dios los bendiga y este pequeño éxito se lo dedico a ustedes, muchas gracias.

SINTESIS

En el presente trabajo se establecen el comportamiento de los principales parámetros de operación del mecanismo de accionamiento de los sedimentador cuando es sometido a un régimen de sedimentación ininterrumpida. Para ello, se sistematizaron los fundamentos básicos, las teorías generales sobre los sistemas de accionamiento y se particularizaron a las condiciones específicas del proceso investigado, lo cual posibilitó verificar las características mecánicas del sistema de accionamiento de los sedimentadores y su compatibilidad con las exigencias tecnológicas y de proceso. Establecer a partir de información empírica, las relaciones funcionalmente entre las propiedades de pulpas minerales lateríticas cubanas y el consumo de energía de los sedimentadores y por ultimo establecer el comportamiento de la capacidad de accionamiento, la característica mecánica de las cargas arrastradas, el efecto de los engranajes, la energía y la potencia, y en general, las características del accionamiento en el sedimentador cuando es sometido a proceso de sedimentación ininterrumpida. Finalmente, se exponen los beneficios económicos y los impactos ambientales asociados al proceso de sedimentación de las menas lateríticas.

ABSTRACT

In present work establish him the behavior of the principal parameters of operation of the mechanism of working of them thickener when he is submitted to a regimen of uninterrupted sedimentation. For it, the basic basics, the general theories on the systems of working came under a system and they particularized specific conditions of the investigated process, which as he made possible verifying the characteristic mechanisms of the system of working of thickeners and his compatibility with technological and process requirements. Establishing as from empiric information, the relations functionally enter the properties of mineral pulps lateritic as Cubans and the consumption of energy of thickeners and finally establishing the behavior of the capability of working, the characteristic mechanics of dragged loads, the effect of gears, the energy and potency, and in general, the characteristics of the working in the thickener when he is submitted to process of uninterrupted sedimentation. Finally, the lateritic as expose the economic benefits and environmental impacts correlated to the process of sedimentation of ores themselves.

INDICE

INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL DE LA INVESTIGACIÓN.....	5
1.1 Introducción.....	5
1.2 Peculiaridades de los sedimentadores por gravedad o convencionales de acción continua.....	5
1.2.1 Principio de funcionamiento.....	6
1.2.2 Elementos de un sedimentador convencional acción continua y sus funciones.....	8
1.2.3 Principales deficiencias en la operación de los sedimentadores convencionales de acción continua.....	10
1.3 Generalidades sobre los mecanismos de accionamiento de sedimentadores convencionales de acción continua.....	10
1.3.1 Tipología de los mecanismos de accionamiento usados en sedimentadores de acción continúa.....	11
1.3.2 Selección del sistema de accionamiento para sedimentadores convencionales de acción continua.....	17
1.4 Sistemas de accionamiento para la industria. Interés económico y técnico.....	18
1.5 Investigaciones precedentes relacionadas con los sistemas de accionamiento.....	19
1.5.1 Trabajos precedentes sobre sistemas de accionamiento.....	20
1.6 Teoría básica acerca de los sistemas de accionamientos industriales.....	22
1.7 Conclusiones del capítulo 1.....	24
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	25
2.1 Introducción.....	25
2.2 Procedimiento metodológico para la verificación de las características mecánicas del mecanismo de accionamiento.....	25
2.2.1 Expresiones para la determinación de los requerimientos de torque del mecanismo de accionamiento.....	25
2.2.2 Expresión para la determinación de la velocidad de rotación en el órgano de trabajo del mecanismo de accionamiento.....	27

2.2.3	Expresión para el dimensionado del motor eléctrico del accionamiento eléctrico.....	28
2.3	Procedimientos metodológicos para la determinación de los parámetros del subsistema energético.....	29
2.3.1	Características de funcionamiento del motor asincrónico en el mecanismo de accionamiento.....	30
2.3.2	Características mecánicas. Pares de carga.....	39
2.4	Procedimiento metodológico para la determinación de los parámetros de del mecanismo de transmisión (reductor).....	42
2.4.1	Expresiones para determinar los parámetros de funcionamiento del accionamiento por correas.....	43
2.5	Pérdidas y rendimiento en los engranajes.....	50
2.6	Pérdidas y rendimiento en el reductor por tornillo sinfín.....	52
2.7	Eficiencia total de la transmisión mecánica.....	53
2.8	Relación de transmisión total de la transmisión mecánica.....	54
2.9	Características mecánicas de las cargas arrastradas.....	54
2.10	Características técnicas de algunos instrumentos y equipos utilizados.....	55
2.11	Caracterización del proceso de sedimentación ininterrumpida de las pulpas minerales lateríticas.....	57
2.11.1	Fundamentos del proceso tecnológico.....	57
2.12	Expresiones para la determinación de costos de operación.....	58
2.13	Conclusiones del capítulo 2.....	60
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....		62
3.1	Introducción.....	62
3.2	Resultados del procedimiento metodológico para la determinación de los requerimientos operacionales que impone la sedimentación ininterrumpida.....	62
3.2.1	Requerimientos de torque en la sedimentación ininterrumpida.....	62
3.2.2	Determinación de la velocidad de rotación de los brazos de barrido del fondo en sedimentación ininterrumpida.....	64

3.2.3	Determinación de la potencia consumida en la sedimentación ininterrumpida.....	64
3.3	Resultados de la determinación de los parámetros operacionales del subsistema energético.....	65
3.3.1	Características de funcionamiento del motor asincrónico en el mecanismo de accionamiento.....	65
3.3.2	Resultados de las características mecánicas. Pares de carga.....	69
3.4	Resultados del procedimiento metodológico aplicado para la determinación de los parámetros del accionamiento por correa.....	70
3.5	Cálculo de la eficiencia total del mecanismo de transmisión	74
3.6	Relación de transmisión del sistema.....	74
3.7	Resultados del cálculo las características mecánicas de las cargas arrastradas.....	75
3.8	Cálculo del par resistente impuesto por la carga al motor eléctrico.....	76
3.9	Valoración de los impactos de la investigación	76
3.9.1	Impacto medio ambiental	77
3.9.2	Determinación del efecto económico	79
3.10	Conclusiones del capítulo 3.....	80
CONCLUSIONES GENERALES		81
RECOMENDACIONES.....		82
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS		83

INTRODUCCIÓN GENERAL

En Cuba, la industria consume alrededor de la mitad de la energía que necesita nuestro país, en mayor parte, a causa de los accionamientos eléctricos. Dichas unidades acaparan aproximadamente el 70 % del consumo industrial de corriente eléctrica. Sin embargo, las deficiencias (por razones económicas) en el diseño de las máquinas eléctricas y los mecanismos de transmisión, así como el funcionamiento generalizado de motores eléctricos en regímenes inadecuados hacen que cerca del 40 % de la energía consumida por ellos se disipe en forma de pérdidas.

Si bien los elementos fundamentales de la técnica de accionamiento eléctrico siguen siendo los mismos desde su nacimiento, a saber, energía eléctrica, motores eléctricos e información, mecanismo de transmisión y la máquina de trabajo; motores eléctricos e información, como resultado enorme del progreso de la técnica de los semiconductores se ha innovado considerablemente (De la Vega 1990). El motor eléctrico, en base de la electrónica de potencia, se ha modernizado superando antiguas limitaciones técnicas. La parte informativa, gracias al gran desarrollo dentro de la electrónica industrial, no sólo ha ampliado sino refinado en alto grado su contribución dentro de la técnica del accionamiento industrial.

Consecuentemente, la técnica moderna (Philippow 1981) del accionamiento eléctrico tiene amplia utilización en todos los procesos técnicos productivos y máquinas productivas de la industria de procesamiento de minerales, y se adaptan para muchas aplicaciones distintas. Dichos accionamientos industriales son muy empleados en equipos para la extracción y obtención de concentrados de níquel y cobalto por las características de esas tecnologías. Entre sus aplicaciones se puede mencionar el equipamiento tecnológico encargado del transporte de mineral y los aparatos encargadas del procesamiento de lateritas en las plantas del proceso hidrometalúrgico en la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, donde predominan los accionamiento eléctricos que favorecen la creación de una producción con alto nivel de mecanización y automatización.

Una de las aplicaciones fundamentales de los accionamientos eléctricos es en el mecanismo de accionamiento de los Sedimentadores de acción continua de la Unidad Básica Productiva de Lixiviación y Lavado (en lo adelante UBP Lixiviación y Lavado). Estos equipos cumplen la importante función de espesar las pulpas y clarificar el licor por un fenómeno de decantación a contra corriente. Durante la separación sólido – líquido, se requiere de una agitación suave por medio de un mecanismo de rastrillos animado de un movimiento muy lento de rotación en vuelta del eje del sedimentador; para que la pulpa después de la sedimentación se consolide, de modo que alcance la densidad deseada para las operaciones subsiguientes.

Según el proyecto inicial los mecanismos de accionamiento, de los sedimentadores, en cuanto al acomodo de carga conservan sus características con una potencia de 5,5 kW y corriente de 10 A y velocidad mecánica de 1160 min^{-1} . La corriente de trabajo de estos motores oscila entre 4 y 7,5 A pero, debido a que esta corriente depende fundamentalmente de la densidad que tenga la pulpa en el fondo del sedimentador así como del nivel de pulpa, su incremento por encima de los valores de diseño provoca que la corriente del motor eléctrico supere muy por encima su valor nominal y de prolongarse esa sobrecarga ocurra una avería de lamentables consecuencias para la economía (Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, 2008).

Se presenta como **situación problémica:**

Las UBP Lixiviación y Lavado, utiliza como parte de su equipamiento industrial sedimentadores convencionales sometidos a procesos de sedimentación ininterrumpida con mecanismo de accionamiento, que emplean en lo fundamental motores eléctricos del tipo asincrónicos. En la actualidad existe una dicotomía entre las expectativas de incremento de la capacidad de la planta, de modo que se puedan procesar 500 t/h de mineral reducido, suspendidos contenidos en la pulpa, y la elevada capacidad de accionamiento y arrastre que esto exige, para mover el mecanismo de rastrillos a través del producto espesado; situación que se origina, entre otras causas, porque **con la información disponible, no es posible determinar si los sedimentadores instalados son capaces de ser operados a torques más altos que los valores de**

diseño, en correspondencia con la variación de las condiciones de explotación de los sedimentadores .

A partir de las deficiencias expuestas se declara como **problema científico** a investigar: el estudio de la capacidad de accionamiento, la característica mecánica de las cargas arrastradas, el efecto de los engranajes, la energía y la potencia, y en general, las características del accionamiento en el sedimentador cuando es sometido a proceso de sedimentación ininterrumpida aún es insuficiente.

Lo anterior permite establecer como **objeto de la investigación**:

Sedimentadores convencionales para la concentración de pulpas minerales lateríticas cubanas con esquema tecnológico carbonato amoniacal.

Y como **campo de acción** es:

La capacidad de accionamiento y arrastre del sistema de accionamiento de los sedimentadores sometidos a régimen de sedimentación ininterrumpida.

Se plantea como **objetivo general**:

Establecer el comportamiento de los principales parámetros de operación del mecanismo de accionamiento cuando el sedimentador es sometido a un régimen de sedimentación ininterrumpida.

En correspondencia con el problema científico declarado se define como **objetivos específicos**:

1. Verificar las características mecánicas del sistema de accionamiento de los sedimentadores y su compatibilidad con las exigencias tecnológicas y de proceso.
2. Establecer, a partir de información empírica, las relaciones funcionalmente entre las propiedades de pulpas minerales lateríticas cubanas y el consumo de energía de los sedimentadores.

Dado el problema a resolver se formula como **hipótesis**:

Si se determinan las regularidades del comportamiento de la capacidad de accionamiento, de la característica mecánica de las cargas arrastradas, el efecto de los engranajes, la energía y la potencia, del sistema de accionamiento cuando el sedimentador es sometido a proceso de sedimentación ininterrumpida, es posible obtener una caracterización sistémica del accionamiento, con vista a proponer soluciones para el incremento de su eficiencia y disminuir índices de consumo energético.

Para garantizar la el cumplimiento del objetivo se desarrollan las siguientes **tareas de la investigación:**

1. Planteamiento de un sistema actualizado de la teórica relacionada con el objeto de estudio, a partir de la revisión bibliográfica y la construcción del marco teórico conceptual de la investigación.
2. Apreciación del estado técnico desde el punto de vista mecánico del sedimentador y su compatibilidad con las exigencias tecnológicas y de proceso de la UBP Lixiviación y Lavado.
3. Obtención las regularidades del comportamiento de los principales parámetros de operación del sistema de accionamiento.
2. Análisis y discusión de los resultados.
3. Planteamiento de los efectos económicos, sociales y ambientales, en los sistemas estudiados para el procesamiento de minerales.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Introducción

En la UBP de Lixiviación y Lavado de la Empresa Comandante “Ernesto Che Guevara” operan 19 Sedimentadores convencionales, los cuales cumplen la función de espesar la pulpa y clarificar los licores después del proceso de lixiviación. Sus elementos principales son los sistemas de accionamiento (motores y elementos de transmisión, el eje y los brazos giratorios) y por su importancia son valorados como un equipo de primera categoría.

El objetivo del presente capítulo es: exponer los fundamentos teóricos necesarios para desarrollar el análisis de los parámetros operacionales del mecanismo de accionamiento, a partir de la sistematización del conocimiento científico establecido en la literatura consultada.

1.2 Peculiaridades de los sedimentadores por gravedad o convencionales de acción continua

Los sedimentadores por gravedad o convencionales de acción continua entran dentro del conjunto de equipos de sedimentación continua. Estos equipos tienen una serie de características que ofrecen mayores ventajas sobre otro tipo de sedimentación. Clasifica como un aparato de separación sólido-líquido continuo utilizado para aumentar la concentración de sólidos suspendidos contenidos en una suspensión fluida espesa, por la acción de la fuerza de gravedad. Además, se utilizan como elementos de almacenamiento que alimentan de forma continua a las líneas de equipos de filtrado o centrífugas (Mular y Bhappu 1980).

El elemento principal de los sedimentadores es mecanismo de accionamiento (los motores, elementos de transmisión, el eje y los brazos giratorios) (Perry 2008), que tiene como función de trasladar continuamente los sólidos sedimentados hacia el orificio de descarga central y crear canales en la suspensión fluida espesa para permitir la liberación de la fase líquida y obtener, de este modo, una suspensión fluida espesa con mayor concentración en sólidos.

Generalmente, se emplean para manejar suspensiones de elevada concentración de partículas sólidas y con sedimentación obstaculizada. Representa un tanque cilíndrico de poca profundidad (ver figura 1.1.), en los que se obtiene un líquido clarificado por la parte periférica superior, y un el producto espesado con bajo contenidos de líquido (en el intervalos de 35 ÷ 60 %).

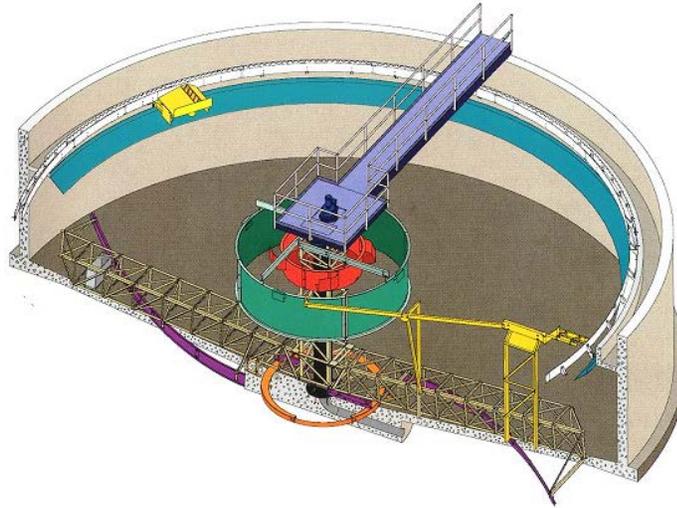


Figura 1.1. Sedimentador por gravedad o convencional de acción continua.

Los tanques de los sedimentadores se fabrican de acero, hormigón o una combinación de ambos (Mular y Bhappu 1980). Para tanques con diámetros menores a 22 m resulta más económico fabricarlos completamente de acero, tanto las paredes del tanque como el fondo del mismo. El fondo del tanque, cuando es de acero, se fabrica sin pendiente por su costo, en este caso los brazos giratorios o rastrillos poseen cierta pendiente hacia el centro del tanque para facilitar el transporte del producto espesado.

1.2.1 Principio de funcionamiento

Conforme entra el flujo de alimentación en el sedimentador, los sólidos suspendidos contenidos en la suspensión van decantando hacia el fondo. El líquido clarificado rebosa por la parte superior, y los sólidos sedimentados se evacuan por la descarga inferior. La figura 1.2 muestra un corte esquemático en el que se ilustra la operación un sedimentador continuo. La zona A que es el líquido de rebose limpio, está virtualmente libre de sólidos en la mayoría de las aplicaciones. La zona B consta de

una pulpa de consistencia poco uniforme cuya concentración se aproxima a la de la alimentación. La zona C es un estado intermedio en el cual la pulpa está en una condición transitoria entre sedimentación por caída libre y compresión. La zona D muestra la pulpa en compresión, produciéndose un desplazamiento del líquido por compresión de los sólidos que fuerzan al líquido a salir de los intersticios.

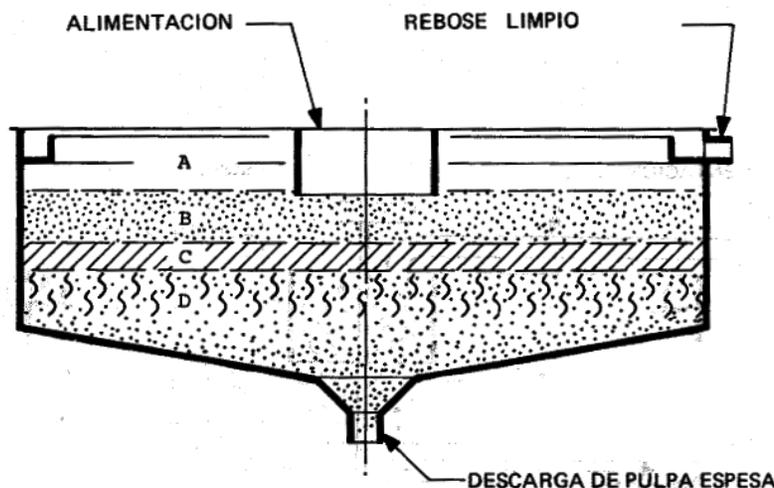


Figura 1.2. Sección de un sedimentador continuo mostrando la situación de las cuatros zonas de pulpa en sedimentación. A- agua limpia o solución; B – pulpa de consistencia de alimentación; C- pulpa de transición B a D; D – pulpa en compresión.

Fuente: (Mullar y Bhappu, 1982).

En la práctica actual las características que distinguen las zonas A, B, C, D no son muy específicas aparte del aumento de la concentración de sólidos, y la descripción resulta más académica que real. Los sedimentadores metalúrgicos operan con densidades de pulpa de 1600 kg/m^3 o más y logran productos con concentraciones de 60 a 70 % de sólidos en peso. Por lo anterior estos equipos deben ser de diseño robusto y pueden ser diseñados de diversos diámetros y alturas (Mular y Bhappu 1982; Wills y Napier 2006; Gutpa y Yan 2006).

En un sedimentador de funcionamiento ideal, los sólidos de la alimentación que deben pasar a la descarga, moverse continuamente hacia el orificio de salida, en la misma proporción que entran en la zona de compresión. Los no se sedimentan simplemente en el fondo del tanque y son arrastrado por los brazos de barrido hacia la descarga, sino que la pulpa debe pasar por la zona de compresión donde se

retiene el tiempo suficiente para espesar a la densidad final, pero sin que sea lo suficientemente largo para que el mecanismo se sobrecargase. Se debe controlar la salida del producto espesado para que la densidad de la descarga tenga la máxima concentración práctica para una alimentación determinada, con un nivel mínimo de pulpa en el sedimentador.

1.2.2 Elementos de un sedimentador convencional acción continua y sus funciones

Los sedimentadores convencionales se caracterizan porque requieren de grandes áreas de terreno dado que su productividad y ser de funcionamiento totalmente automáticos que no precisan de atención del personal.

Independientemente del diseño, aplicación y tipo construcción un sedimentador convencional industrial de acción continua cuenta entre sus partes componentes (ver figura 1.3) las siguientes (Mular y Bhappu 1982; Wills y Napier 2006; Gupta y Yan 2006):

- **Canal de alimentación:** El cual conduce la pulpa hasta el foso de alimentación. Por lo general tiene una pendiente de 1,5 %, y se dimensiona para que ingrese 1 m por debajo de la superficie del nivel del tanque para minimizar la turbulencia.
- **Foso de alimentación (feedwell):** sirve para disipar la energía cinética que lleva el flujo de alimentación, así como proporcionar a la entrada del tanque una condición de relativa tranquilidad y dirigir la pulpa a una profundidad adecuada dentro del sedimentador. Los diámetros generalmente empleados están entre 1,0 a 1,2 m con profundidades de 1,2 a 5,0 m.
- **Tanque:** El cual proporciona el tiempo de residencia necesario para producir sólidos sedimentados (la sedimentación). Su altura estará en función de la compactación que se desee obtener. El fondo puede ser plano ligeramente o cónico, su inclinación ayuda al movimiento de los sólidos concentrados hacia el punto de descarga.
- **Brazos:** tienen tres funciones:
 1. Desplazar los sólidos sedimentados hacia el punto de evacuación.

2. Mantener un grado de fluidez en el sedimentador para asegurar la separación hidráulica, y
 3. Aumentar la concentración de la pulpa espesa al establecer una especie de canalizaciones en la pulpa de la zona de compresión, que permiten la salida del líquido entrampado.
- El **cono o trinchera**, con sus **rastras**, tienen una acción similar a la de los brazos pero en la zona de descarga.
 - El **canal de rebose** recoge el rebose clarificado y lo lleva a su salida correspondiente. El diseño más adecuado es el de rebose uniforme en toda la periferia del tanque.
 - **Mecanismo motriz**: es de accionamiento central formado por un grupo motor-reductor, y brinda el torque (par) necesario para la rotación de los brazos y rastras en contra de los sólidos sedimentados.

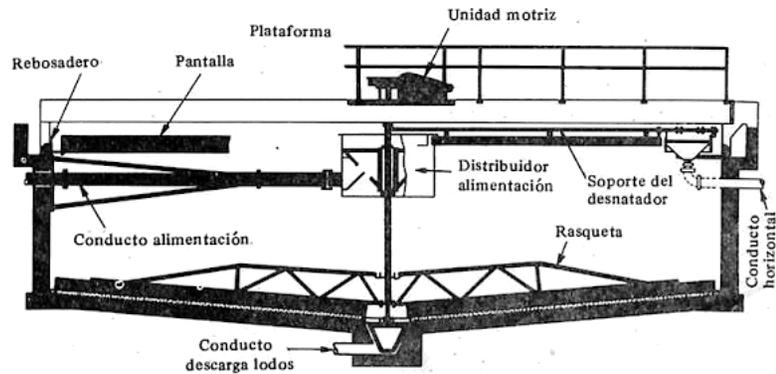


Figura 1.2. Sección de sedimentador convencional en el cual se muestra sus partes componentes.

Por otro lado, la robustez de su accionamiento unido a la posibilidad de ajustar el diámetro y el tipo de cabeza de mando según se requiera, hace que estos equipos posean un tiempo de vida superior a los 20 años. Durante su diseño se asegura que estén protegidos contra cualquier tipo de sobrecarga mediante la actuación sobre la posición del mecanismo y del régimen de extracción de producto espesado.

1.2.3 Principales deficiencias en la operación de los sedimentadores convencionales de acción continua

Como máquina, un sedimentador convencional posee una función limitada (Mular y Bhappu 1982). Al tener en la acumulación (alimentación – descarga $\neq 0$) su principal problema de operación. Excesiva acumulación puede generar paradas y requerimientos de limpieza (Wills y Napier 2006).

Problemas que puede generar la acumulación (Mular y Bhappu 1982):

- a) La pulpa comenzará a salir por el rebose (overflow).
- b) La descarga o producto espesado (underflow) puede resultar demasiado espeso para el bombeo.
- c) Se formará islas en el sedimentador y la densidad de la descarga llegará hacerse próxima a la alimentación.
- d) El mecanismo de los rastras llegará a sobrecargarse y será detenido por el control del accionamiento.

La repercusión de los problemas anteriormente depende de las características de los sólidos manejados. Sobrecargan el mecanismo los sólidos gruesos (entre 840 y 250 μm), ya que producen cargas elevadas en los brazos. A medida que aumenta la cantidad de sólidos gruesos el requerimiento de momento de accionamiento sube rápidamente.

Aquello que ocurre en el interior de un sedimentador no resulta perceptible por observación visual. Únicamente se toman precauciones para evitar que surjan problemas de operación. Sin embargo, sólo existen comparaciones con lo que ocurre en instalaciones similares, pero cada sedimentador tiene sus particulares de funcionamiento (Gupta y Yan 2006).

1.3 Generalidades sobre los mecanismos de accionamiento de sedimentadores convencionales de acción continua

Los mecanismos de accionamiento de los sedimentadores de acción continua proporcionan apoyo al mecanismo central y el momento de accionamiento (torque) a los brazos de arrastre para girar a través de los sólidos sedimentados. Son de movimiento lento (0,015 hasta 0,5 min^{-1}), y sometido a la influencia a una amplia variedad de condiciones climatológicas. Se diseñan de diversos tipos para

sedimentadores según la aplicación y el tipo de construcción. A pesar de las referencias anteriores, todavía no existen reglas en su diseño. Esto se debe, en buena medida, que actualmente para conceptualizar la operación de un sedimentador continuo, se simplifica considerablemente la realidad, adquiriendo un carácter puramente técnico y no consideran el complejo mecanismo mediante el cual transcurre su operación. Lo único que se encuentra en la literatura especializada son ideas básicas y la descripción resulta más académica que real (King 1980, Mariño et al. 2010).

La importancia de los mecanismos de accionamiento, en el funcionamiento de sedimentadores de acción continua, se puede apreciar en el capítulo dedicado a los espesadores en la compilación realizada por Mular y Bhappu (1980) en la cual, Donald L. King director de ingeniería de la compañía Sedimentation Business Center, se refiere a que la efectividad de la decantación por gravedad es función de su área, circunstancia que limitaba su tamaño como equipo de sedimentación. Conforme se desarrollaba la tecnología, se asumió la necesidad de conducir los sólidos sedimentados, sobre una gran superficie, hacia un punto de descarga común. Con este principio general y diversas modificaciones, hacia 1905 se concibió el sedimentador continuo. Por otro lado, Lothar (2012) expresa que la sedimentación en la zona de compresión de un sedimentador continuo se intensifica (acelera) con la agitación suave por medio del mecanismo de rastrillo animado de un movimiento lento de rotación en vuelta de su eje central.

1.3.1 Tipología de los mecanismos de accionamiento usados en sedimentadores de acción continua

Por su configuración, instalación y funcionamiento se muestran diversos tipos de mecanismos de accionamiento (o sistemas de accionamiento) para los sedimentadores de acción continua. Su diseño depende del diámetro del tanque finalmente seleccionado y de los requerimientos operacionales del sedimentador, según la capacidad de accionamiento y de arrastre del mecanismo, que a su vez determina las necesidades de soporte del mecanismo y la posible incorporación de un dispositivo de elevación.

Si se mantienen las características generales de construcción y sus componentes principales, los mecanismos de accionamiento en función de su posición y el método de soporte podemos se clasifican en (Perry, 2008):

1. Mecanismos de accionamiento con soporte tipo puente o viga (bridge type).
2. Mecanismos de accionamiento con soporte tipo pilar central o con columna central (centre pier type).

Los mecanismos de accionamiento con soporte tipo puente se utilizan para sedimentadores de diámetro pequeño (hasta $30 \div 40$ m), donde el mecanismo de accionamiento y su eje central se apoyan sobre una superestructura o puente (ver figura 1.4.) que atraviesa el tanque, capaz de soportar el peso del rastrillo más los sólidos depositados en los brazos giratorios radiales y de superar los momentos que opone la suspensión fluida espesa (lodo, hundido o underflow) que está siendo rastrillado. Este tipo de sedimentadores presenta un cono de descarga en el centro.



Figura 1.4. Mecanismo de accionamiento tipo puente o viga. **Fuente:** (Perry 2008).

Para sedimentadores de diámetro superiores a $30 \div 40$ m, se emplea una columna estacionaria central de acero u hormigón para soportar los mecanismos de accionamiento y de control. El puente sólo se emplea para acceso de personal y como soporte de tuberías de alimentación. Los brazos de los rastrillos están unidos a una estructura o jaula giratoria que rodea al pilar central. El giro se lo proporcionan los elementos de accionamiento superiores; la descarga de las suspensión fluida

espesa se realiza a través de un canal anular que rodea al pilar central, como se muestra en la figura 1.5.

El diseño del rastrillo es importante y será en función de la naturaleza de sólidos sedimentados, el diámetro del tanque, la cantidad de sólidos coloidales floculados, entre otros.



Figura 1.5. Mecanismo de accionamiento tipo columna central. **Fuente:** (Perry 2008).

Existen diferentes tipo de construcción, variando desde un único brazo rígido con hojas soldadas directamente sobre él (limitado a tanques con un diámetro máximo de 15 m) hasta brazos de diferentes tipos de estructura metálica diseñados para grandes tanques (por encima de 35 m de diámetro).

Para la eliminación de grandes estructuras que lleguen hasta el material sedimentado en los grandes tanques, se recurre al empleo de extensiones que parten de los brazos porta-rastrillos. Este tipo de brazos es conocido como "thixotrópico" diseñado para el tratamiento de sustancias coloidales (arcillas) con comportamiento thixotrópico que eviten la formación de "donuts" (figura 1.6.).

En la mayor parte de los sedimentadores convencionales, los brazos de los rastrillos están unidos al eje central (tipo puente) o a una estructura circular giratoria (tipo pilar central), sin embargo hay otras alternativas como son los sedimentadores con el

guiado del rastrillo a través de cables (figura 1.7). En estos últimos el brazo de rastrillado se encuentra articulado a la base del eje central o jaula giratoria. La articulación es diseñada para permitir movimientos horizontales y verticales del rastrillo que es guiado alrededor de la columna a través de cables conectados a un brazo superior de tubo que produce el momento de giro, situado por debajo del nivel de agua. Este tipo de sedimentadores se emplea en sólidos de comportamiento thixotrópico o finamente divididos y parcialmente floculados.

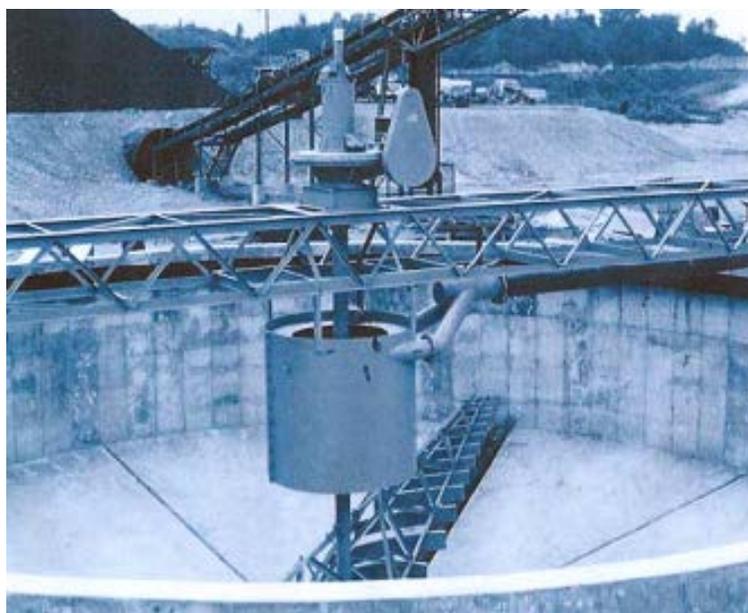


Figura 1.6. Brazos giratorios radiales de tipo thixotrópico. **Fuente:** (Perry 2008).



Figura 1.7. Brazos giratorios radiales con cables. **Fuente:** (Perry 2008).

Los mecanismos de accionamiento difieren en el método de soporte del mecanismo de las rastras, la forma de alimentación, la forma de las rastras, entre otros. Con relación al tipo de tracción se pueden distinguir dos tipos de sedimentadores, ellos son (Perry, 2008):

1. Mecanismos de accionamiento de tracción central.
2. Mecanismos de accionamiento de tracción periférica.

En los mecanismos de accionamiento de tracción central, la columna central sirve de soporte para los brazos giratorios radiales, así como pivote para que todo el mecanismo central (estructura de rastrillado) gire alrededor de la columna, como se ilustra en la figura 1.8. El movimiento es proporcionado por el mecanismo de accionamiento montado sobre la propia columna central que hace girar todo el mecanismo central. Este tipo de mecanismo de accionamiento se fabrica para tanques cuyo diámetro va desde los 5 m hasta los 100 m.



Figura 1.8. Mecanismo de accionamiento con tracción central. **Fuente:** (Perry 2008).

En los mecanismos de accionamiento de tracción periférica, el pilar central sirve de apoyo para el brazo rastrillador, así como pivote para que toda la estructura de rastrillado gire alrededor del pilar, como se muestra en la figura 1.9. El movimiento es proporcionado por un mecanismo de accionamiento montado sobre rail que hace girar al brazo principal. Este tipo de sedimentadores se fabrica para tanques cuyo diámetro va desde los 50 m hasta los 200 m.

Generalmente, la mayor parte de los sedimentadores se construyen con sistemas de elevación del mecanismo de rastrillo principalmente cuando se tratan colas de flotación. Porque las partículas finas de arcilla pueden desarrollar islas (ver figura 1.10) que impiden el flujo hacia el punto de descarga al formar anillos o "donuts" y es necesario el empleo de sistemas de elevación para levantar o descender los rastrillos que ayudan a romper estos anillos. Dichos mecanismos están regulados para actuar sobre el mecanismo de rastrillo cuando se alcanzan unos momentos de accionamiento (torques) excesivos para su estructura.

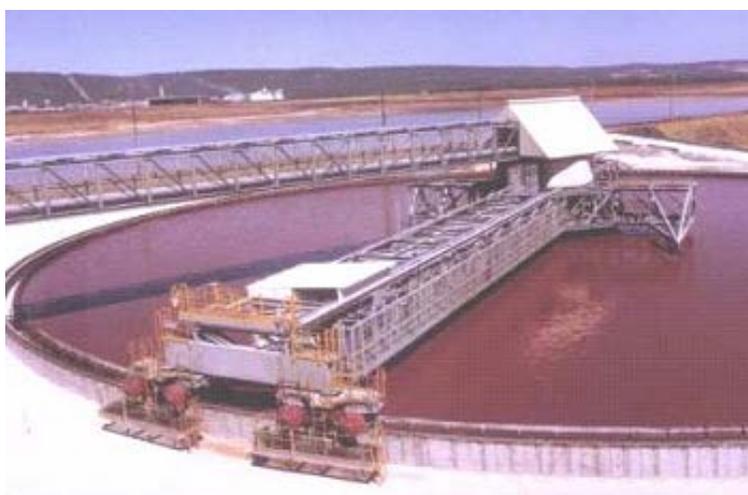


Figura 1.9. Mecanismo de accionamiento de tracción periférica. **Fuente:** (Perry 2008).

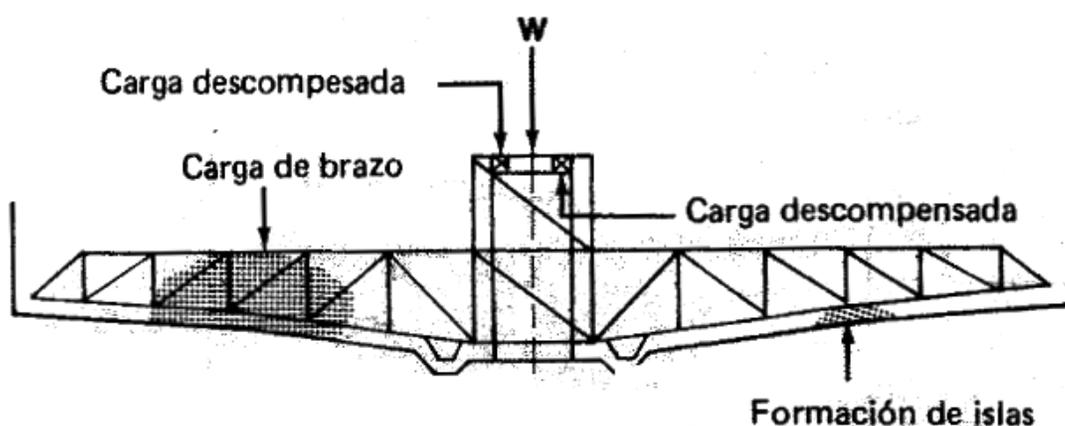


Figura 1.10. Formación de islas en los sedimentadores convencionales. **Fuente:** (Mular y Bhappu 1980).

La velocidad del mecanismo de rastras en el perímetro, es normalmente de 0,13 m/s cual corresponde a revolución por hora para sedimentadores de 15 m de diámetro. El consumo de energía es muy bajo, en un sedimentador de 60 m se requiere de un motor de 10 kW. Las rastras también ayudan a la compactación de las partículas sedimentadas y producen una descarga más espesa que la que se puede alcanzar por la sedimentación simple.

Independientemente a las referencias anteriores, todos los mecanismos de accionamiento para sedimentadores, accionados por motores eléctricos asíncronos. Su selección y construcción depende de la magnitud del momento de accionamiento (torque) que deberá comunicar a los brazos giratorios para que pueda girar a través la suspensión fluida espesa (sólidos sedimentados), y evitar que se produzcan paradas o atascos del mecanismo de rastrillo, o el desarrollo de condiciones anormales de operación.

1.3.2 Selección del sistema de accionamiento para sedimentadores convencionales de acción continua

Una vez seleccionado el tamaño del tanque, el tipo, y el sistema de la descarga (evacuación de sólidos sedimentados), el mecanismo de accionamiento se determina a partir del análisis de los requerimientos de trabajo de sedimentador, que están estrechamente relacionados con la demanda de momento de accionamiento (torque o par), según la capacidad de accionamiento y arrastre del mecanismo, que a su vez determina las necesidades de soporte del mecanismo y la posible incorporación de un dispositivo de elevación (Mullar y Bhappu 1982).

Por lo tanto, no todos los mecanismos de accionamiento pueden ser utilizados para toda clase de trabajo; cada actividad requiere un mecanismo de accionamiento. Para la selección del tipo y tamaño del mecanismo de accionamiento requerido en una cierta aplicación, se deben considerar los siguientes factores (Wills y Napier 2006):

- Capacidad de procesamiento (tamaño y productividad).
- Concentración de sólidos en la alimentación.
- Concentración de sólidos en la descarga.
- Velocidad de sedimentación de los sólidos.

- Densidades de sólido y líquido.

El funcionamiento usual de un sedimentador convencional de acción continua demanda una fracción del momento de accionamiento recomendado, seleccionado, o suministrado. La razón es que la capacidad de torque es función de los que la experiencia muestra como necesario cuando ocurren paradas o atascos. Disponer de mayor par proporciona un fuera extra de tracción que permite tiempo para la corrección del problema (Gupta y Yan 2006).

A pesar de las referencias anteriores, en la actualidad no existe método exacto para seleccionar el par aplicado a un mecanismo de un sedimentador (Mular y Bhappu 1982). Solo existen ideas básicas y algunas generalidades como guía para la selección inicial del mecanismo en función del diámetro (área) y un factor proporcional K. Pero la selección final será en conjunción del conocimiento y experiencia del fabricante o el ingeniero consultor.

Por otro lado, la capacidad de accionamiento (torque requerido) y la velocidad de rotación de los brazos, establecen la potencia del motor para accionar el mecanismo. Además, éste torque con su factor de seguridad, es el valor que usa en el diseño estructural de los brazos de arrastre (Gupta y Yan 2006).

1.4 Sistemas de accionamiento para la industria. Interés económico y técnico

Se estima que, únicamente en el sector industrial, los mecanismos de accionamientos representan casi el 70 % del equipamiento tecnológico que consume toda la energía suministrada (Herrero 2003; Siemens AG 2009). Debemos apreciar su importancia, ya que todos los sectores industriales que utilizan la fuerza motriz son susceptibles de utilizar mecanismos de accionamiento.

En el pasado, el consumo de energía raramente era prioritario para un equipo de ingeniería. Independientemente del sector industrial en cuestión –cemento, química, madera, metalurgia o petróleo–, la atención se centraba sobre todo en la tecnología y en la capacidad de los mecanismos de accionamiento automatizados para aumentar la productividad (Savolainen 2004).

Actualmente, las empresas industriales y empresas eléctricas se enfrentan a una nueva serie de problemas, entre ellos la mayor exigencia de los clientes en cuanto a eficiencia y calidad, medio ambiente, competitividad y cumplimiento de las normas de calidad. Obligadas a direccionar sus procesos productivos hacia satisfacer estas demandas y, al mismo tiempo, reducir los costes de producción. Y, sin embargo, únicamente la variación de velocidad permite explotar las importantes posibilidades que ofrecen los motores eléctricos de consumir solamente la energía necesaria para producir fuerza motriz (Bonal 1999). En este sentido se produce un derroche de rendimiento y de energía que es necesario reabsorber.

Autores como (Moreno 1999, Savolainen 2004) consideran, una respuesta es consumir menos energía, concretamente con los motores eléctricos, lo que puede conseguirse de dos maneras principales: controlando eficientemente la velocidad de funcionamiento de los motores (con accionamientos de velocidad regulable) y haciendo más eficientes los motores mismos y las transmisiones mecánicas.

Es evidente que el uso de motores de alto rendimiento y accionamientos de corriente alterna de velocidad regulable proporciona grandes posibilidades de ahorrar mucha energía y reducir los efectos medioambientales perjudiciales.

1.5 Investigaciones precedentes relacionadas con los sistemas de accionamiento

Se tiene conocimiento sobre los mecanismos de accionamiento desde de la segunda mitad del siglo XIX por la elaboración de diversos aparatos físicos, en los cuales se demostró ilustradamente la transformación la transformación de energía eléctrica en mecánica. El primer intento de incluir un motor eléctrico en los mecanismos de accionamiento fue concebido por el académico B. Yakori de la Universidad de San Petersburgo, cuando entre 1834-1838 construyó el primer motor eléctrico, con el cual se consiguió la propulsión eléctrica, en 1938 en el Neva se probó este motor eléctrico instalado en una lancha de capacidad para una 14 personas. Esta fue la primera embarcación propulsada can la ayuda de un motor eléctrico. Pero, las ausencias de fuentes económicas de energía eléctrica imposibilitaron la introducción de los mecanismos de accionamiento en la industria. Con la invención del motor eléctrico

del motor asincrónico trifásico en 1989 por M. Dolivo Dobrovolski se inició una nueva etapa en el desarrollo de los mecanismos de accionamiento y reportó una influencia revolucionaria en la construcción de los mecanismos de accionamiento e incluso en la de los propios mecanismos de producción.

Por otro lado, el análisis del movimiento de los mecanismos de accionamiento en la operación de mecanismos industriales en procesos productivos, implica la inclusión de fenómenos relativos a la conversión electromecánica de la energía eléctrica en energía mecánica. Dentro de los parámetros fundamentales que caracterizan éste movimiento están: la velocidad angular, el par o torque (el par desarrollado por el motor y el par resistivo de la reacción del elemento mecánico), y la aceleración, que dependen principalmente de la tensión eléctrica, de la corriente eléctrica, resistencia eléctrica del estator y el rotor, de la reactancia de dispersión del estator y el rotor y de los momentos de inercia de los elementos mecánicos, entre otros, determinará si el carácter del régimen de trabajo del mecanismo de accionamiento es motor o generador (Morera 1987; Bonal 1999).

Los procedimientos más difundidos para el análisis del proceso de conversión electromecánica de energía eléctrica en energía mecánica y viceversa consideran que los dispositivos conversores electromecánicos de energía, o máquinas eléctricas (generadores y motores) juegan un papel muy importante, ya que constituyen la principal fuente de demanda de energía eléctrica en la red (Bonal 1999; Morera 2004).

1.5.1 Trabajos precedentes sobre sistemas de accionamiento

Díaz y Pardo (2004) repasan las diferentes estrategias avanzadas de control que se usan hoy en día en los convertidores de frecuencia empleados en el control de los motores de corriente alterna, principalmente del motor de inducción, haciendo énfasis en las técnicas de regulación de velocidad a lazo cerrado, por sus mejores indicadores. Las técnicas tratadas fue el control escalar, el control vectorial, el control directo del par y el control sin sensores. Finalmente exponen en forma sintética la tendencia general en el accionamiento eléctrico automatizado.

González et al. (2006) muestran la aplicación de dos metodologías para la selección de accionamientos rápidos: potencia transitoria - energía cinética doble y par-constante de tiempo electromecánica, necesarias en el diseño y selección de los accionamientos para una máquina troqueladora que se desarrolló en un proyecto financiado por Colciencias. Fue necesario emplear el programa MATLAB e información obtenida de los catálogos de los fabricantes para realizar las simulaciones necesarias en la evaluación de la conveniencia de diferentes alternativas para el accionamiento. En este artículo, además, se analizan los resultados alcanzados en este caso de aplicación, para identificar las ventajas, limitaciones y la complementariedad entre los dos métodos citados

Rojas (2006) realiza una identificación de los subsistemas del motor de inducción con bomba centrífuga encargada del transporte de hidromezclas de pulpas lateríticas, atendiendo a las variables que más participan en la transferencia de energía, y con esto, supervisar y diagnosticar con anticipación su eficiencia. Se muestra un algoritmo con identificación difusa que correlaciona las funciones ofrecidas desde la ecuación de los momentos del accionamiento eléctrico sobre la base de las pérdidas con el fin de minimizar la potencia de entrada del sistema desde su contexto tecnológico y experimental. Accionamientos similares analizados por el investigador ha analizado en diversas publicaciones (Abrahamsen et al 1996; Cerovski et al. 1997; Costa 2004). En general, los autores se basan en análisis del movimiento del mecanismo de accionamiento estableciendo las magnitudes de diferentes parámetros mecánicos, como son: desplazamiento y ángulo de giro, velocidad y aceleración, y momento y fuerza que provocan el movimiento. Otras investigaciones relacionadas con el análisis del movimiento en mecanismos de accionamiento desarrollados en diversas máquinas y aparatos de producción se reportan en múltiples trabajos (Moreno 1997; Rodríguez 1999; Vidal 2002; Muñoz 2004; González 2006). Los resultados obtenidos en estas publicaciones son satisfactorios para las aplicaciones para los cuales fueron creados.

Muñoz et al. (2008) especifica el flujo productivo existente en la empresa productora del níquel “Comandante Ernesto Guevara” hasta la etapa de la molienda seca, con énfasis en los detalles técnicos de mayor relevancia en el proceso. Se realiza analiza

la influencia de la cantidad de mineral en el sistema sobre el comportamiento energético de la molienda. Finalmente determinan los requerimientos tecnológicos impuestos por el transportador de laterita 215 - TR - 201 al accionamiento eléctrico, en función de las características y las necesidades del proceso.

1.6 Teoría básica acerca de los sistemas de accionamientos industriales

Un mecanismo de accionamiento industrial típico (único) de corriente alterna (CA) consta por lo general, de un transformador de entrada o suministro eléctrico, un convertidor de frecuencia, un motor eléctrico de corriente alterna y una carga (Bonat 1999; ABB Sistemas Industriales S.A., 2000; Lobosco y Díaz 2004). La amplia gama de potencias motores eléctricos modernos permite proyectar económicamente racionales y técnicamente perfectos de mecanismos de accionamiento en las distintas ramas de la producción.

Para dimensionar adecuadamente los mecanismos de accionamiento se requiere del conocimiento de un determinado número de datos básicos que son (ABB Sistemas Industriales S.A., 2000):

- **Condiciones iniciales** (comprobar el nivel de la red tensión (380 V a 690 V) y frecuencias (50 Hz ó 60 Hz) nominales: para seleccionar el convertidor de frecuencia y el motor correctos. La frecuencia de red no limita el rango de velocidad de la aplicación.
- La **potencia solicitada** o **requisitos del proceso**: viene determinada por las necesidades de la carga arrastrada (par y velocidad), debe definirse tanto en régimen permanente como en régimen transitorio.
- El **tipo de funcionamiento**: si el accionamiento funciona en un sentido de rotación o en los dos.
- **Velocidad** o **rangos de velocidades**: si se va emplear un variador de velocidad.

Como función principal hasta el presente los mecanismos de accionamiento han tenido la de poner en movimiento el mecanismo de trabajo. Pero éste debe ser capaz de realizar tres funciones básicas, ellas son (Bonat 1999):

- **Arrancar** la carga: el par electromagnético del motor debe ser superior al par resistente total.

- **Arrastrar** la carga: se encuentra directamente relacionada con el proceso. La productividad aumenta con la velocidad del mecanismo de accionamiento y la calidad aumenta si la carga varía poco a lo largo del ciclo de producción.
- **Parar** la carga: es obligatorio poder para el equipo.

A estas tres funciones básicas, comunes a todas las aplicaciones, se les puede añadir la necesidad de (Krishnan 2001):

- De realizar el **posicionamiento**: situar un objeto, un producto o un equipo en el lugar determinado, en un tiempo determinado, a partir de una orden dada.
- De **sincronizar** sobre los demás equipos del sistema: accionar una estructura rígida o semirrígida o transportar un producto acabado en un sistema multimotor.

No obstante, el mecanismo de accionamiento moderno automatizado cumple funciones más amplias, asegurando la realización racional del proceso tecnológico. También permite obtener elevada producción del mecanismo y mejorar la calidad de los artículos que se fabrican (Krishnan 2001).

En los sistemas electromecánicos, se encuentran en muchas ocasiones engranajes (reductores o multiplicadores) que adaptan la velocidad del motor a la de la carga arrastrada. Afectando a la inercia de las masas acoplada en rotación. Es importante llevar todas las magnitudes a una misma línea del árbol normalmente la del motor (Krishnan 2001).

En los mecanismos de accionamiento industriales, las dimensiones y costo del motor dependen básicamente de su par nominal. Una correcta selección del rendimiento del engranaje (reductor) garantiza poder obtener las mejores prestaciones del motor para un determinado mecanismo de accionamiento, ya que este permitirá conseguir las condiciones óptimas y las prestaciones estáticas y o dinámicas deseadas (ABB Sistemas Industriales S.A., 2000; Lobosco y Diaz 2004).

Por otro lado, se observa que para un determinado número de aplicaciones, y por razones de calidad de funcionamiento y sobre todo de ahorro de energía, es necesario **utilizar un variador electrónico de velocidad incluso cuando no existe la necesidad de hacer variar la velocidad** de la carga arrastrada (ABB Sistemas Industriales S.A., 2000).

Existe toda una serie de parámetros que determinan la eficiencia energética de los accionamientos. También son numerosos los puntos de partida para incrementar la eficiencia energética. Pero no todas las medidas tienen un resultado acorde con el esfuerzo que conllevan. Sólo un análisis del proceso mecánico permite determinar qué medidas son las más adecuadas para cada caso en concreto y cuál es la necesidad energética real.

1.7 Conclusiones del capítulo 1

El análisis de las fuentes bibliográficas consultadas permite plantear que:

- En las referencias consultadas no se muestran las regularidades del comportamiento de los principales parámetros de funcionamiento del mecanismo de accionamiento, en correspondencia con la variación de las condiciones de operación del sedimentador, generadas por alteraciones de las características de la alimentación y de la evacuación de los sólidos sedimentados.
- La construcción de un marco teórico conceptual de la investigación permitió establecer los fundamentos técnicos esenciales para desarrollar el análisis del mecanismo de accionamiento, en diferentes condiciones de operación del sedimentador de níquel disuelto de la empresa “René Ramos Latour”.
- A pesar del amplio conocimiento que existe relacionado con los mecanismos de accionamiento de sedimentadores, no prepondera una única metodología para su diseño, sino que se dispone de algunas ideas empíricas que adecuan su selección mediante el análisis de los requerimientos de trabajo.

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Introducción

Las particularidades específicas de los sedimentadores para el espesado de pulpas y clarificación de licores amoniacales por un fenómeno de decantación a contracorriente, aumentando la concentración de sólidos de la pulpa hacen de cada uno de ellos instalaciones únicas. En nuestro trabajo de diploma nos ubicamos para el desarrollo en los sedimentadores de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

Una correcta selección de los métodos y materiales empleados validan los resultados obtenidos, y es por eso que resulta indispensable el desarrollo de métodos adecuados.

El **objetivo** de este capítulo: establecer métodos y procedimientos y materiales para dar solución al problema planteado.

2.2 Procedimiento metodológico para la verificación de las características mecánicas del mecanismo de accionamiento

Cuando se proyectan las instalaciones destinadas a la realización de operaciones de sedimentación, es importante concederles la capacidad (tamaño) y rendimiento (productividad) suficiente para hacer frente a las demandas picos y prevenir el desarrollo de condiciones que ocasionen paradas o problemas inusuales de operación, durante el proceso en sí (Wills & Napier 2006).

2.2.1 Expresiones para la determinación de los requerimientos de torque del mecanismo de accionamiento

Los sólidos sedimentados sobre el piso de un sedimentador circular resisten el movimiento de las rastras, ocasionando un torque. En la literatura (King 1982; Comisión Nacional del Agua 2007; MIP Process Technologies 2009; Cabrejos 2011) el torque requerido por el mecanismo de la unidad del sedimentador, basado en una ecuación simple de viga volada, puede calcularse mediante la ecuación empírica (2.1):

necesario esclarecer que, en la literatura no existe un método exacto para seleccionarlo (King 1982). Solo se encuentra algunas generalidades como guía para la selección inicial del mecanismo.

Por otro lado, el torque calculado o seleccionado y la velocidad de rotación de los brazos, determinará la potencia del motor para accionar el mecanismo. Asimismo, éste torque con su coeficiente de seguridad, es el valor que se usa en el diseño estructural de los brazos de arrastre.

2.2.2 Expresión para la determinación de la velocidad de rotación en el órgano de trabajo del mecanismo de accionamiento

En los capítulos precedentes se estableció las tipologías de los sedimentadores, resulta obvio que existen muchos tipos de equipos para sedimentadores según la aplicación y el tipo de construcción. Pero, independientemente a esto, todos los sedimentadores por gravedad son equipados con rastrillos para la remoción de los sólidos sedimentados (lodo espesado o hundido) hacia el orificio central de descarga (Brown 1965; Kasatkin 1987). De las tipologías que existen, la más utilizada es la remoción mecánica por medio de raspadores (removedores) de fondo, del tipo rotatorio, por el hecho de ser durables y de presentar menores problemas de mantenimiento. Su funcionamiento conserva el grado de fluidez en el sedimentador y asegura la separación hidráulica; aumentado la concentración de los sólidos del hundido estableciendo una especie de canalizaciones en la pulpa de la zona de compresión, que permiten la salida del líquido atrapado. De acuerdo con las referencias (MIP Process Technologies 2009; Cabrejos 2011) la velocidad de rotación de los brazos de barrido del fondo se determina a partir de la ecuación (2.3):

$$n_{br} = \frac{v}{\pi \cdot D} \dots \dots \dots 2.3$$

Donde:

n_{br} - velocidad de rotación de los brazos; min^{-1}

v - velocidad periférica del rastrillo; m/min

D- diámetro del sedimentador; m

Según Lothar (2012) la confirmación de este resultado se observa en los efectos beneficiosos que reciben de la agitación suave los precipitados acuosos coloidales y ciertas pulpas metalúrgicas.

2.2.3 Expresión para el dimensionado del motor eléctrico del accionamiento eléctrico

La definición de accionamiento eléctrico (motor eléctrico, mecanismo de transmisión, órgano de trabajo). Concreta en la actualidad el uso del motor eléctrico como elemento esencial de las máquinas productivas, en la industria de proceso de minerales. Hallándose con mayor aplicación los motores asíncronos, debido a sencillez constructiva, confiabilidad de explotación y su costo comparativamente bajo (Morera 1993; Bonal 1999). Además, en la mayoría de los casos su alimentación no necesita convertidor adicional y se realiza, directamente, del sistema (red).

Cuando se procura apreciar la potencia requerida para hacer girar el agitador de rastrillo en los sedimentadores a una velocidad determinada, es preciso disponer de correlaciones empíricas de la potencia. En las referencias consultadas (MIP Process Technologies 2009; Cabrejos 2011) la potencia para el dimensionamiento del motor eléctrico requerido se calcula mediante la igualdad empírica (2.4):

$$N_m = T \cdot \omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot T}{60 \cdot 1000 \cdot \eta} \quad \dots \quad 2.4$$

Donde:

N - potencia por el motor eléctrico; kW

T – par máximo operativo para la selección del mecanismo de accionamiento; N·m

η - eficiencia total del mecanismo de transmisión (reductor); adimensional

n– velocidad de rotación a la salida de la transmisión mecánica; min⁻¹

Cuando se consultó (MIP Process Technologies 2009) recomendó tomar 0,5 como valor intermedio de la eficiencia completa del mecanismo de transmisión (transmisión mecánica) para diseños preliminares. Orientando que esto garantiza el ligero sobredimensionamiento del motor eléctrico. Disponiéndose de una capacidad de accionamiento y arrastre de reserva en el mecanismo de accionamiento para afrontar demandas picos y así evitar que se desarrollen condiciones anormales de operación o que tengan lugar paradas o atascos.

2.3 Procedimientos metodológicos para la determinación de los parámetros del subsistema energético

Al operar el motor eléctrico acoplado a un mecanismo de producción en régimen estacionario le corresponde un equilibrio a los pares de resistencia del mecanismo y del par de rotación del motor, a una determinada velocidad de rotación. La ecuación mecánica relaciona las variables eléctricas del motor con la carga, según la segunda las bibliografías consultadas (Lobosco y Pereira 1989; Bonal 1999; Rojas et al. 2004; Romero 2006; Vera et al. 2008) en término de la velocidad mecánica se personalizan por (2.5):

$$J \frac{d\omega}{dt} = C - C_r \quad \dots \dots \dots \quad 2.5$$

Donde:

C – par electromagnético; N·m

C_r – par resistivo de la carga; N·m

J – momento de inercia; kg·m²

ω - velocidad angular de rotación; s⁻¹

En esta ecuación para comodidad de análisis se está despreciando el efecto del coeficiente de fricción y viscosidad, pues su influencia es mínima y no repercute en los resultados posteriores.

2.3.1 Características de funcionamiento del motor asincrónico en el mecanismo de accionamiento

A nivel industrial es bien conocido que la máquina rotativa más empleada para el manejo de procesos a velocidad constante es la máquina de inducción jaula de ardilla dado que es altamente eficiente, libre de mantenimiento, sencilla, robusta y económica.

- **Velocidad de sincronismo**

Cuando el motor eléctrico se encuentra conectado a la red de alimentación, la frecuencia de los voltajes y corrientes generados quedan impuestas por la red al igual que la velocidad de giro del eje. Según las referencias (Ivanov 1984; Lobosco y Pereira 1989; Chapman 2005) esta última dependerá del número de pares de polos que posea el motor asincrónico de acuerdo a la ecuación (2.6):

$$n_{\phi} = \frac{120 \cdot f_1}{p} \quad \dots \quad 2.6$$

Donde:

n_{ϕ} – velocidad sincrónica del campo magnético giratorio del estator, min^{-1}

f_1 – frecuencia de la alimentación; Hz

p – número de polos del motor asincrónico; adimensional

Con carga, la velocidad de los motores asincrónicos con rotor en corto circuito (jaula de ardilla) se aproxima a la sincrónica, con un porcentaje conocido como deslizamiento (Ivanov 1984; Lobosco y Pereira 1989; Chapman 2005).

- **Deslizamiento**

A la diferencia que existe entre la velocidad sincrónica y la velocidad del motor se le conoce como deslizamiento, el cual se expresa en por ciento de la velocidad sincrónica. Según las referencias (Ivanov 1988; Lobosco y Pereira 1989; Chapman 2005) el deslizamiento se calcula por la ecuación (2.7):

R_e – resistencia en el devanado del estator; Ω

R_r - resistencia en el devanado del rotor; Ω

X_e – reactancia de dispersión del estator; Ω

X_r - reactancia de dispersión del rotor; Ω

V_e - tensión aplicada a la fase; V

El denominador de la ecuación (2.18) es el módulo de la impedancia de la rama en serie del circuito equivalente aproximado.

- **Corriente en el arranque**

Un problema importante en la operación del motor asincrónico con rotor jaula de ardilla es la elevada corriente que este absorbe durante el proceso de arranque. La corriente de arranque de éste tipo de motor se encuentra entre 5-7 veces la corriente nominal del motor, y en algunas ocasiones aún más. Una caída de tensión en los conductores de alimentación y en el sistema puede sobrepasar el máximo permitido. La tensión de alimentación del motor no debe estar nunca por debajo del 5 % de su valor nominal, ya que el par electromagnético se reduce con el cuadrado de la tensión de alimentación, y la máquina puede ser incapaz de acelerar la carga mecánica.

Según Vargas (1990) la corriente en el arranque se obtiene reemplazando el valor del deslizamiento ($s = 1$) en la ecuación (2.19):

$$I_{arr} = \frac{V_e}{\sqrt{(R_e + R_r)^2 + (X_e + X_r)^2}} \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot 2.9$$

Donde:

I_{arr} – corriente en el arranque del motor asincrónico; A

Según Vargas (1990) se posible utilizar sistemas de arranque de motores de inducción a tensión reducida que contribuyen a disminuir la magnitud de la corriente

las pérdidas totales son pérdidas mecánicas. Básicamente, estas pérdidas son función de la velocidad mecánica del rotor.

Las pérdidas de potencia por rozamiento en los cojinetes del motor asincrónico se pueden calcularse como (2.15):

$$N_{mec} = N_{total} - N_{cu1} - N_{cu2} - N_{fe} - N_{ad} \quad \dots \quad 2.15$$

Donde:

N_{mec} – pérdidas de potencias mecánicas; kW

N_{total} – pérdidas totales de energía; kW,

Pérdidas totales de energía:

$$N_{total} = N_1 - N_n \quad \dots \quad 2.16$$

Para lo que:

N_n – potencia nominal del motor; W

En la tabla 2.1 se muestran datos sobre la distribución de pérdidas en motores de inducción convencionales.

Según (Henze, 1996) esta solución aportará posibilidades nuevas a la técnica de los accionamientos. Algunas máquinas que hasta ahora funcionaban en muchos casos a velocidades fijas, obtendrán grandes beneficios de estas técnicas: su configuración e instalación se harán más sencillas y el funcionamiento con un factor de potencia alto y con o sin elementos mecánicos de transmisión o adaptación, aumentará el rendimiento energético y el motor integral se amortizará en corto tiempo.

• **Potencia útil**

Según Rodríguez (2008) una pequeña parte de la potencia se pierde por rozamientos y ventilación; por las pérdidas mecánicas. El resto es la potencia útil del motor (2.17):

$$C = \frac{3V_g^2 R_r}{s\omega_\phi \left[\left(R_g + \frac{R_r}{s} \right)^2 + (X_g + X_r)^2 \right]} = \frac{N_{\text{útil}}}{\omega_\phi} \quad \dots \quad 2.20$$

Donde:

C – par electromagnético; N·m

s – deslizamiento; adimensional

$N_{\text{útil}}$ – potencia útil o mecánica; W

ω_ϕ – velocidad de rotación sincrónica; s^{-1}

Esta expresión indica que, si un motor asincrónico funciona a tensión y frecuencia en el estator constantes, el par sólo varía en función del deslizamiento s; es decir, el par varía solamente con la velocidad de giro del rotor, como se ilustra en la figura 2.2.

A partir del **par motor** o **electromagnético** se pueden deducir los pares característicos del motor de inducción:

- **Par de arranque inicial**

Al mismo tiempo con el par máximo, el par de arranque del inicial motor es una de las características de explotación más importantes del motor. El valor del par de arranque del inicial se obtiene de la fórmula general para el par electromagnético (2.21) siendo s=1:

$$C_{\text{arr}} = \frac{3 \cdot V_g^2 R_r}{\omega_\phi [(R_g + R_r)^2 + (X_g + X_r)^2]} \quad \dots \quad 2.21$$

Donde:

C_{arr} – par de arranque inicial; N·m

ω_ϕ – velocidad de rotación sincrónica; s^{-1}

Par de arranque del inicial se expresa habitualmente por la relación (2.22) la cual se llama multiplicidad del momento de arranque.

$$k_{arr} = \frac{C_{arr}}{C_n} \quad \dots \quad 2.22$$

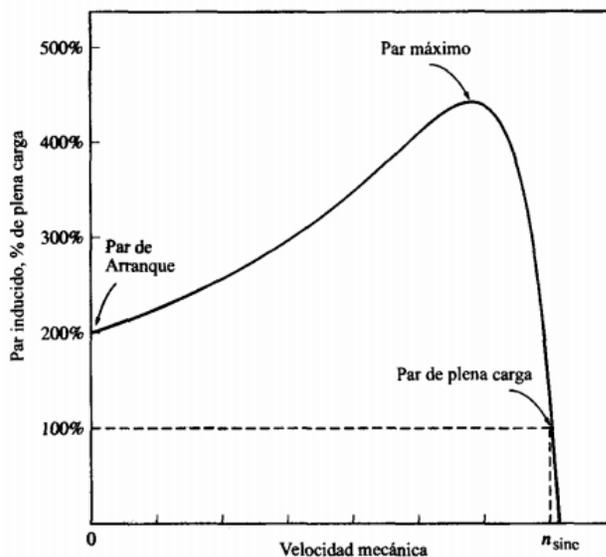


Figura 2.2. Característica par-velocidad de los motores asíncronos jaula de ardilla.

• **Par electromagnético máximo**

A la hora de determinar el par electromagnético máximo. Se precisa calcular el llamado deslizamiento crítico $s = s_m$, para el cual el par motor es máximo $C = C_m$. El deslizamiento crítico para el par motor máximo puede determinarse por la ecuación (2.23):

$$s_m = \frac{R_r}{\sqrt{R_s^2 + (X_s + X_r)^2}} \quad \dots \quad 2.23$$

Para motores asíncronos de aplicación industrial general, siendo $N > 3$ kW ordinariamente $s_m = 0,15...0.3$ y únicamente en variantes especiales o al producir resistencia adicionales tiende a ser mayor.

Para determinar el par motor máximo desarrollado durante el régimen de utilización como motor, se sustituye en la ecuación (2.20) el deslizamiento máximo según la ecuación (2.23). Después de la transformaciones necesarias obtenemos:

2.4.1 Expresiones para determinar los parámetros de funcionamiento del accionamiento por correas

Los criterios fundamentales para el cálculo de las transmisiones por correas son: **la capacidad de tracción** que determina la fiabilidad de adherencia entre la correa y la ranura de la polea, y **la vida útil de la correa** que depende de la resistencia a la fatiga en condiciones normales de explotación. A continuación desplegaremos la metodología de cálculo propuesta por González (1999).

- **Potencia de diseño**

Potencia de diseño de la transmisión. Considera posibles variaciones de la carga entre la máquina motriz y la movida. Se calcula por la siguiente expresión:

$$N_d = N \cdot f_s \quad \dots \dots \dots \quad 2.25$$

Donde:

N - potencia a transmitir; kW

f_s - factor de servicio (Anexo 3)

- **Velocidad de la correa**

La velocidad de la correa debe ser lo mayor posible, para disminuir la cantidad de correas necesarias en la transmisión, pero nunca debe superar la velocidad máxima límite (v_{máx}) para que el efecto de la fuerza centrífuga no disminuya la capacidad tractiva de la correa, determina por la expresión (2.26):

$$v_c = \frac{\pi \cdot n_1 \cdot d_1}{60\,000} \leq v_{máx} \quad \dots \dots \dots \quad 2.26$$

Donde:

v_c – velocidad periférica de la correa; m/s

n₁- frecuencia de rotación de la polea motriz; min⁻¹

d₁ - diámetro de la polea motriz; mm

Siendo:

$v_{m\acute{a}x} = 25 \dots 30$ m/s para correa de perfil normal.

$v_{m\acute{a}x} = 35 \dots 45$ m/s para correa de perfil estrecho.

- **Fuerza útil o periférica**

Es más cómodo realizar el cálculo de la tensión estática en función de la potencia a transmitir y de la cantidad de correas del accionamiento.

$$P = \frac{1000 \cdot N_d}{z \cdot v_c} \quad \dots \quad 2.27$$

Donde:

P – fuerza útil o periférica; N

N_d - potencia de diseño de la transmisión; kW, considera posibles variaciones de la carga entre la máquina motriz y la movida.

z - cantidad de correas trapeciales en la transmisión.

- **Ángulo de contacto**

Con el objetivo de calcular el ángulo de contacto en una transmisión por correa abierta y de dos poleas, puede ser empleada la siguiente fórmula:

$$\alpha_1 = 2 \cdot \cos^{-1} \left(\frac{d_2 - d_1}{2 \cdot a} \right) \geq 90^\circ \dots 120 \quad \dots \quad 2.28$$

Donde:

α_1 - ángulo en la polea menor; °

d_1 - diámetro primitivo de la polea menor; mm

d_2 - diámetro primitivo de la polea mayor; mm

a - distancia entre centros de poleas; mm

Para esquemas de transmisión con más de dos poleas es conveniente un análisis gráfico que permita obtener los ángulos de contacto entre la correa y las poleas por una medición de ellos en el dibujo a escala.

• **Tensión inicial o estática**

En una correa montada en las poleas, y que conserve la misma longitud total, el alargamiento de uno de los ramales provoca el acortamiento del otro en la misma magnitud. Dicho con otras palabras, el aumento de la tensión en un ramal hace que disminuya respectivamente la tensión en el otro, mientras que la suma de las tensiones (fuerzas) se mantiene constante. Esto puede ser expresado como:

$$S_0 = 500 \cdot \left(\frac{f_t - c_\alpha}{c_\alpha} \right) \cdot \frac{N_d}{z \cdot v_c} + \rho \cdot v_c^2 \quad \dots \quad 2.29$$

Donde:

S_0 - tensión inicial o estática; N

ρ - masa por metro de correa; kg/m

c_α - coeficiente por ángulo de contacto; adimensional

f_t - factor de tensado; adimensional

Tabla 2.2. Valores del coeficiente de ángulo de contacto.

$\alpha(^{\circ})$	180	174	169	163	157	151	145	127	120	83
c_α	1,00	0,99	0,97	0,96	0,94	0,93	0,91	0,85	0,82	0,65

Ésta fórmula permite recomendar el valor exacto de la tensión estática, según los valores de fuerza útil a transmitir, de densidad y velocidad de la correa, del ángulo de contacto y el coeficiente de fricción entre correa y polea.

• **Característica de tracción de la transmisión por correas**

Para el estudio de las características de tracción de las transmisiones por correas es definido:

$$\varphi = \frac{P}{2 \cdot S_0} \cdot \dots \quad 2.30$$

Donde:

φ - coeficiente de tracción; adimensional

P - fuerza útil en la correa; N

S_0 - tensión inicial o estática; N

Tomando como base numerosas investigaciones realizadas se pueden aconsejar los siguientes valores medios de los coeficientes de tracción: para las correas planas de caucho $\varphi_0 = 0,5 \dots 0,6$; para las correas trapeziales el rango es algo más amplio $\varphi_0 = 0,6$ (Normas RMA) ... 0.98 (fabricantes alemanes).

- **Vida útil de la correa**

Usualmente el cálculo de la vida útil de las correas que son explotadas en condiciones normales está basado en la resistencia a la fatiga y considera los esfuerzos que actúan en la correa.

- **Cálculo según los esfuerzos normales**

En una correa trapezoidal el esfuerzo resultante es debido a la acción de los siguientes componentes del esfuerzo, los cuales pueden ser calculados como:

$$\sigma_0 = \frac{S_0}{A} \cdot \dots \cdot 2.31$$

Donde:

σ_0 - esfuerzo por tensado estático; MPa

S_0 - fuerza por tensado estático en una correa; N

A - área de la sección transversal; mm², tabla 2.3.

Tabla 2.3. Área de las secciones transversales de algunos perfiles de correa.

Perfil	Z	A	B	C	D	SPZ	SPA	SPB	SPC	3V	5V	8V
A(mm ²)	50	80	140	230	480	70	94	160	278	70	160	382

$$\sigma_v = \frac{q \cdot v_c^2}{1000 \cdot g} \dots \dots \dots 2.32$$

Donde:

σ_v - esfuerzo por el efecto de la fuerza centrífuga; MPa

q - peso específico de la correa (N/dm³); generalmente es aceptado $q \approx 12,5$ N/dm³

v - velocidad de la correa; m/s

g - aceleración de la gravedad; $g = 9,81$ m/s²

$$\sigma_p = \frac{1000 \cdot N_d}{z \cdot v \cdot A} \dots \dots \dots 2.33$$

Donde:

σ_p - esfuerzo por fuerza útil, MPa

N_d - potencia de diseño; kW

z- cantidad de correas;

$$\sigma_{flex} = E_{flex} \frac{2 \cdot y_0}{d} \dots \dots \dots 2.34$$

Donde:

σ_{flex} - esfuerzo por flexión de la correa, MPa

y_0 - distancia desde la línea neutra (cord) y la capa superior de la correa (mm). En cálculos aproximados puede ser aceptado $y_0 = 0,5$ h, donde h es la altura de la sección.

• **Pérdidas y rendimiento**

Las pérdidas de potencia en la transmisión por correa se determinaron en relación con la elasticidad de la correa, por el rozamiento en los apoyos y se desprecian las perdidas por resistencia del aire.

A continuación se exponen las expresiones fundamentales de las pérdidas de potencia. Pérdidas de potencia por unidad de tiempo

$$N_{el} = F \cdot v_c \cdot k_p \quad \dots \quad 2.37$$

Donde:

N_{el} – pérdidas de potencia por unidad de tiempo; kW

F – área de la sección transversal de la correa; m²

v_c – velocidad de la correa; m/s

k_p - magnitud de las pérdidas referida a la unidad de volumen de la correa,

También se han dado fórmulas más o menos empíricas para el cálculo de las pérdidas por rozamientos en los cojinetes cuyo resultado dan un valor bastante correcto de su cuantía. A modo de ejemplo se exponen unas fórmulas generales propuestas por algunos fabricantes de cojinetes.

$$N_{coj} = \frac{150 \cdot 10^{-6} \cdot d^3 \cdot n}{1000} \quad \dots \quad 2.38$$

Donde:

N_{coj} – pérdidas de potencia por rozamiento en los cojinetes; kW

n – velocidad de rotación del cojinete; min⁻¹

d – diámetro del gorrón, cm

A continuación se exponen la expresión para el cálculo del rendimiento:

• **Rendimiento de la transmisión por correa**

$$\eta_c = \frac{N - N_{el} - N_{coj}}{N} \quad \dots \quad 2.39$$

Donde:

η_c - rendimiento de la transmisión por correa; adimensional

N – potencia que se trasmite; kW

2.5 Pérdidas y rendimiento en los engranajes

Las pérdidas de potencia en el reductor por engranajes se establecieron en relación con las pérdidas de potencia en los engranajes (por el rozamiento de deslizamiento y de rodamiento), por la agitación (o batimiento) del aceite y por rozamiento en los cojinetes.

La magnitud media de las pérdidas para una potencia que se transmite N en kW se puede determinar aproximadamente por la fórmula:

$$N_{eng} = \frac{\pi \cdot \varepsilon \cdot f}{2} \cdot \left(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \right) \cdot N \quad \dots \quad 2.40$$

Donde:

N_{eng} – pérdidas de potencia en el engranaje; kW

ε - coeficiente de recubrimiento exterior; adimensional

Z_1 – número de dientes del piñón;

Z_2 – número de dientes de la rueda;

N – potencia que se trasmite; kW

f – coeficiente rozamiento, varía de 0,03 a 0,10

Las pérdidas de potencia en la agitación del aceite no es posible determinarlas analíticamente. La magnitud de estas pérdidas es tanto mayor, cuanto mayor sea la

velocidad periférica, la anchura de las ruedas, la viscosidad del aceite, y el número sumario de los dientes de las ruedas y se determina por la fórmula (2.30):

$$N_{agit} = 75 \cdot 10^{-5} \cdot \nu \cdot b \sqrt{\vartheta \cdot \nu \cdot \frac{200}{Z_1 + Z_2}} \quad \dots \quad 2.41$$

Donde:

N_{agit} – pérdidas de potencia en la agitación de aceite; KW

b – anchura de las ruedas; mm

ν - viscosidad del aceite; cSt

v - Velocidad periférica, m/s

$Z_1 + Z_2$ – número sumario de dientes;

También se han dado fórmulas más o menos empíricas para el cálculo de las pérdidas por rozamientos en los cojinetes (del deslizamiento de las bolas o rodillos) cuyo resultado dan un valor bastante correcto de su cuantía. A modo de ejemplo se exponen unas fórmulas generales propuestas por algunos fabricantes de cojinetes.

$$N_{coj} = \frac{150 \cdot 10^{-6} \cdot d^3 \cdot n}{1000} \quad \dots \quad 2.42$$

Donde:

N_{coj} – pérdidas de potencia por rozamiento en los cojinetes; kW

n – velocidad de rotación del cojinete; min^{-1}

d – diámetro del gorrón; cm

- **Rendimiento de los engranajes**

El rendimiento total del reductor por engranaje, que tiene en cuenta todas, para la potencia N en el árbol secundario se obtiene por la fórmula:

$$\eta_r = \frac{N - (N_{eng} + N_{agit} + N_{coj})}{N} \quad \dots \quad 2.43$$

Donde:

η_r – rendimiento del reductor; adimensional

N – potencia que se transmite; kW

De la última expresión se ve que el rendimiento total de la transmisión depende de la carga, es decir, con la disminución de la carga el rendimiento empeora considerablemente. Ya que el valor del rendimiento garantiza, ante todo, las ventajas del reductor por engranaje al cumplir el trabajo útil.

2.6 Pérdidas y rendimiento en el reductor por tornillo sinfín

Las pérdidas de potencia se producen en relación a dos factores, pérdidas de por rozamiento entre las superficies de los dientes y pérdidas debidas al agitación (batimiento) del aceite.

Si la rueda se encontrarse sumergida en aceite, las pérdidas por agitación se determina por la fórmula empírica (Dobrovolski 1980):

$$N_{agit} = 0,75 \cdot 10^{-5} \cdot \nu_2 \cdot b_2 \cdot \sqrt{\vartheta} \cdot v_2 \quad \dots \quad 2.44$$

Donde:

N_{agit} – pérdidas de potencia en la agitación de aceite; KW

b_2 – anchura de la rueda; cm

ν - viscosidad cinemática del aceite a la temperatura de operación; cSt

v - velocidad periférica de la rueda en el diámetro de referencia, m/s

Para tornillos sumergidos en el aceite, se sustituye b_2 por la longitud tallada del tornillo (b_1) y en lugar de la velocidad de la rueda, se pone en la expresión (1.29) el valor de la velocidad del tornillo (v_1).

A base de lo dicho, el coeficiente de rendimiento del reductor por tornillo sin fin se puede representar en forma de (2.34):

$$\eta_t = \frac{\tan \gamma}{\tan(\gamma + \varphi')} \cdot \left(\frac{N + N_{agit}}{N} \right) \dots \dots \dots 2.45$$

Donde:

η_t – rendimiento del reductor por tornillo sin fin; adimensional

γ - ángulo primitivo de elevación de la espira; grados

φ' – ángulo reducido de rozamiento; depende de los materiales de los elementos del par conjugado, de la calidad de la superficie, de la lubricación y de la velocidad de deslizamiento.

N – potencia que se transmite; kW

2.7 Eficiencia total de la transmisión mecánica

La eficiencia total del mecanismo de transmisión del accionamiento electromecánico se determinó de forma análoga a varios mecanismos que están acoplados en serie y se conoce la eficiencia específica de cada mecanismo, donde el rendimiento global de toda la cadena de mecanismos siendo su unión en serie, será igual (Baránov 1985):

$$\eta_t = \eta_e \cdot \eta_r \cdot \eta_{tor} \cdot \eta_e \dots \dots \dots 2.46$$

Donde:

η_t – eficiencia total de la transmisión mecánica del accionamiento electromecánico; adimensional

El rendimiento debe ser tomado como un indicador económico porque los cambios sensibles que en este se registran, a partir de la variación de la geometría, le confieren una influencia no despreciable en los costos. Con mayor rendimiento no sólo disminuyen los costos de inversión con motores de menor tamaño sino, además,

η_t – rendimiento total de la transmisión, adimensional

• **Par resistente de la carga**

El par resistente cuando varía con el cuadrado de la velocidad de rotación (variación parabólica) el par resistente puede ser estimado por la expresión:

$$C_{res} = 0,50 \left(C_{arr} + C_m - C_{r,func} \cdot \frac{n_c}{n} \right) \quad \dots \quad 2.49$$

Donde:

C_{res} – par resistente impuesto de la carga; N·m,

C_{rr} – par de arranque inicial del motor; N·m,

C_m – par motor o electromagnético máximo; N·m,

$C_{r,func}$ – par a la velocidad de rotación de funcionamiento; N·m igual al par básico o par electromagnético.

n_c – velocidad de rotación sincrónica del motor; min^{-1}

n – velocidad de rotación del rotor o mecánica; min^{-1}

El par motor que debe ser considerado para la utilización de la expresión (2.20) es el par electromagnético ejercido por el estator del motor en la parte giratoria. Se diferencia del par útil del motor eléctrico por las pérdidas mecánicas y de las pérdidas en el hierro del mismo. Dichas pérdidas contribuyen al par resistente total.

2.10 Características técnicas de algunos instrumentos y equipos utilizados

Cuando se requiere comprobar el estado funcional de una máquina, se precisan de equipos que doten las fallas que no se pueden diagnosticar visualmente. Ellos poseen las características y ventajas para obtener dicha información. Para determinar tensión, corriente, potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente, frecuencia, factor de potencia, entre otros en el motor eléctrico del accionamiento se empleó Analizador de redes: serie PQM-A y serie PPQM-1000 (figura 2.3). En la tabla 2.4 aparecen las características del equipo.

También se empleó un tacómetro analógico y digital para medir la velocidad del motor y voltímetros, amperímetros, ohmímetros, para medir su características fundamentales de su funcionamiento.



Figura 3.3 Analizador de redes NORTHW00D DATA LOGGERS LTD

Tabla 2.4. Características del analizador de redes NORTHW00D DATA LOGGERS LTD del catálogo.

No.	Característica	Descripción
1	Display de LCD	Teclado de membrana, tiene cuatro teclas para control y programación.
2	Posibilidad de comunicación	RS - 232 y RS – 435.
3	Alimentación	monofásicas, 110 a 230 V CA
4	Tensión de tolerancia	- 15 % a 10 %,
5	Frecuencia de trabajo	50 a 60 Hz
6	Corriente de directa	24 a 110 V
7	Consumo	3 a 6 VA, clase de precisión: tensión: 0,5 % de la lectura Corriente: 0,5 % de la lectura
8	Permite la visualización de 30 parámetros eléctricos:	Tensión, corriente, potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente, frecuencia, factor de potencia, etc.
9	Fabricado:	En Canadá

2.11 Caracterización del proceso de sedimentación ininterrumpida de las pulpas minerales lateríticas

El proceso de sedimentación ininterrumpida se realiza mediante un esquema tecnológico está basado en la lixiviación carbonato - amoniacal del mineral reducido, o proceso Caron. La decisión de utilizar el proceso de lixiviación carbonato-amoniaca se explica por las ventajas propias de esta tecnología, a pesar de que consume mucha energía eléctrica, tiene muchas ventajas en comparación con el proceso pirometalúrgico.

Es un proceso continuo que se realiza en las condiciones de presión atmosférica. El equipamiento tecnológico del proceso se distingue por su sencilla y amplia utilización de los aparatos conocidos (hornos de soleras múltiples, sedimentadores, columnas de destilación, entre otros). Estas características favorecen la creación de una producción con alto nivel de mecanización y automatización. El esquema amoniacal admite la elaboración de la mezcla de los minerales lateríticos y serpentínicos.

Para mejorar la eficiencia y lograr una mayor productividad en la reducción de níquel más cobalto se llevaron a cabo las modificaciones, innovaciones y racionalizaciones introducidas que han llevado a la industria a los niveles productivos en que se encuentra, tanto desde el punto de vista tecnológico, mecánico, seguridad industrial, disciplina tecnológica, estimulación y atención a los trabajadores, quienes han permitido que la empresa muestre mejores resultados convertirla en una empresa competitiva a nivel mundial.

2.11.1 Fundamentos del proceso tecnológico

La pulpa del mineral reducido, desde los tanques de contacto pasa por dos sistemas paralelos de cuatro etapas de lixiviación a contracorriente. La lixiviación se realiza con el licor carbonato – amoniacal en los sedimentadores por medio de aereación de la pulpa con el aire, los datos del proceso se reflejan en la tabla 2.5.

Después de la cuarta etapa de lixiviación, la pulpa de mineral se dirige a dos sistemas paralelos de lavado de etapas cada uno. El lavado también se realiza con el

licor de carbonato amoniacal por el método de contracorriente en los sedimentadores.

Tabla 2.5. Datos del proceso de sedimentación ininterrumpida

Parámetros	Valor actual	Valor futuro
Volumen de alimentación	885 a 950m ³ /h	1 800 a 2 240 m ³ /h
Volumen de sólidos	300 a 320 t/h	390 a 500 t/h
Densidad de los sólidos	3,8 a 4,17 t/m ³	4 a 4,5 t/m ³
Densidad de la solución	1,025 a 1,04 t/m ³	1,025 a 1,04 t/m ³
Densidad de la pulpa	1,14 a 1,16 t/m ³	1,14 a 1,18 t/m ³
Porcentaje de sólidos	10 a 15 %	14 a 17 %
Concentración en la descarga	52 a 55 %	57 a 58 %

Fuente: (Proyecto de modernización Empresa Comandante Ernesto Che Guevara 2004)

El licor enriquecido en níquel y cobalto una parte del flujo de la primera etapa se envía a la Planta de Recuperación de Amoniaco para filtrarlo en los filtros de placas para limpiarlo de hierro y la pulpa de desecho se suministran a la planta de recuperación de amoníaco donde se extrae el níquel en forma de carbonato básico y se recupera el amoníaco. El licor de la primera y la segunda etapas de lixiviación se enfría en los intercambiadores de calor con el agua y se dirige a la planta de reducción de mineral para mezclas con el mineral reducido.

2.12 Expresiones para la determinación de costos de operación

Para un sistema de accionamiento es importante considerar la eficiencia con se produce la transformación electromecánica de la energía. En consecuencia, es importante aprovechar ahora mismo toda oportunidad razonable de economizar energía. La utilización de motores de inducción trifásicos de eficiencia superior es una forma fácil y económicamente eficaz de conservar energía.

El consumo en kilowatt-horas en que incurre un sistema de accionamiento para poner en movimiento un mecanismo de producción se expresa mediante la siguiente ecuación (Baldor Electric Company 2010):

$$C_{kWh} = \frac{N_m \cdot h}{1000} \dots \dots \dots 2.51$$

Donde:

C_{kWh} - consumo del sistema de accionamiento; kW-h

h – horas de operación; horas

N_m – potencia del motor eléctrico; W

La ecuación que permite determinar los costos de operación de sistema de accionamiento se presenta de la forma siguiente (Baldor Electric Company 2010):

$$C = C_{kWh} \cdot C_p \dots \dots \dots 2.50$$

Donde:

C – costo promedio de operación; CUC

C_{kWh} - consumo del sistema de accionamiento; kW-h

C_p - costo medio de un kilowatt-hora; CUC

Este costo no incluye las multas por factor de potencia a los cargos por demandas que puede aplicarse en algunas zonas. En la tabla 2.6 se muestran algunas constantes útiles para el cálculo.

Para determinar el ahorro que produce la sustitución de un motor o accionamiento de eficiencia estándar por uno de alta eficiencia se puede determinar por la siguiente expresión:

$$S = N_m \cdot C_p \cdot h \left(\frac{1}{\eta_s} - \frac{1}{\eta_a} \right) \dots \dots \dots 2.50$$

Donde:

S – ahorro por sustitución energética; CUC

h – horas de operación; horas

N_m – potencia del motor eléctrico; W

C_p - costo medio de un kilowatt-hora; CUC

η_s – eficiencia del motor de eficiencia estándar;

η_a – eficiencia del motor de alta eficiencia;

Tabla 2.6. Constantes útiles para el cálculo.

Constante	Valor
Promedio de horas por mes	730
Promedio de Horas por Año	8760
Promedio de Horas de Oscuridad por Año	4000
Promedio Aproximado de Horas por Mes (Operación con Turno Único)	200

Por estas razones, podemos hacer la afirmación general que aumentando la eficiencia de los motores se reducirá el consumo de kilowatt-horas y el costo de la energía para todas las categorías de usuarios de energía, no importa cuál sea su estructura tarifaria o su factor de potencia específico. Este tipo de afirmación no puede hacerse en lo que concierne al factor de potencia.

2.13 Conclusiones del capítulo 2

- Quedó establecido el método integrado para el cálculo de los principales parámetros de funcionamiento del mecanismo de accionamiento. El mismo conjuga diversos aspectos teóricos encontrados en investigaciones precedentes, se fundamenta en las leyes que rigen la transformación electromecánica de la energía en un mecanismo de accionamiento y permite su análisis integral.
- Se describieron los métodos, procedimientos y condiciones experimentales, que fundamentan los parámetros a investigar para establecer sus regularidades para del funcionamiento de su mecanismo de accionamiento, en las diferentes

condiciones de operación de los sedimentadores de la empresa productora de níquel más cobalto “Comandante Ernesto Che Guevara”.

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1 Introducción

En los capítulos precedentes fueron establecidas las metodologías empleadas para el análisis del mecanismo de accionamiento para diferentes condiciones de operación, se ha logrado detectar las diferentes características e interacciones que existen entre los múltiples elementos que están presentes en el sedimentador.

El **objetivo** de este capítulo de forma concreta es: mostrar los resultados obtenidos en el análisis del accionamiento del sedimentador, así como la valoración económica y de impacto medioambiental.

3.2 Resultados del procedimiento metodológico para la determinación de los requerimientos operacionales que impone la sedimentación ininterrumpida

La determinación de las exigencias operacionales. Permite dotar de la suficiente capacidad de accionamiento y arrastre al mecanismo de accionamiento de los sedimentadores s para hacer frente a las demandas picos y prevenir el desarrollo de condiciones inusuales de operación.

3.2.1 Requerimientos de torque en la sedimentación ininterrumpida

Se calculó el factor proporcional del torque del mecanismo de accionamiento con la sustitución en la ecuación 2.2; inicialmente en la etapa actual y después para un futuro incremento de la capacidad del proceso técnico de producción de la empresa caracterizada en la tabla 2.1 en el capítulo 2. Antes fue seleccionado el valor de los coeficientes K_1 , K_2 , K_3 y K_4 de las gráficas (anexo 1) y que están declarados en la tabla 3.1.

La determinación torque operativo ininterrumpido necesaria para el desarrollo del proceso de sedimentación se realizó a partir de la ecuación 2.1, considerando el diámetro del tanque ($D=50$ m) y considerando el factor del par del mecanismo de accionamiento. Los resultados del cálculo se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3.1. Factores de cálculo K_1 , K_2 , K_3 y K_4 implicados en la expresión 2.6.

Proceso productivo	Porcentaje de sólidos en la descarga (%)	Distribución granulométrica (% < 65 μ m)	Densidad del sólido ρ (kg/dm ³)	Carga de sólidos secos (m ² /t/día)	Factor proporcional del torque del mecanismo K (N/m)
Actual	52	85	3,8	1,4	234
	K_1 (N/m)	K_2 (N/m)	K_3 (N/m)	K_4 (N/m)	
	340	177	368	284	
Futura	58	85	4,17	0,5	262
	K_1 (N/m)	K_2 (N/m)	K_3 (N/m)	K_4 (N/m)	
	374	177	407	347	

Tabla 3.2. Resultado del cálculo del torque operativo máximo para una unidad de transmisión.

Etapas del proceso productivo	Factor proporcional del torque del mecanismo de accionamiento k (N/m)	Diámetro del sedimentador D (m)	Torque operativo máximo para una unidad de transmisión T (N.m)
Actual	234	50	585000
Futuro	262	50	655 000

Una vez determinado el factor proporcional del torque del mecanismo de accionamiento K. Podemos catalogar el régimen de trabajo de los sedimentadores de duro en las condiciones actuales, existiendo riesgo de parada o atasco en incrementos futuro de la capacidad de la planta, precisándose de un mecanismo de accionamiento robusto y de posible la incorporación de un sistema de elevación. Que proporcione suficiente capacidad de accionamiento y un elevado esfuerzo de arrastre por los rastrillos. Siendo necesario la utilización de rastras especiales u otro dispositivo tales como paletas situadas a distancia bajos los brazos o cuchillas que se introduzcan en los sólidos compactados.

Con los valores del torque obtenido y el coeficiente de seguridad se pueden desarrollar el proceso de selección, diseño e instalación. Este parámetro y la

velocidad de rotación de los brazos determinan la potencia del motor eléctrico para el mecanismo de accionamiento.

3.2.2 Determinación de la velocidad de rotación de los brazos de barrido del fondo en sedimentación ininterrumpida

El cálculo de la velocidad de rotación de los brazos se realizó por la ecuación 2.3, teniendo en cuenta la velocidad periférica seleccionada (8÷12 m/min) para el mecanismo de rastrillo del sedimentador ($v=9$ m/min), y el diámetro del de construcción del sedimentador ($D=50$ m). Por lo que con la sustitución de los datos se obtiene:

$$n_{br} = 0,057 \text{ min}^{-1}$$

Con esta velocidad de rotación gira el mecanismo agitador con rastrillos inclinados en los cuales están fijados los álabes para trasladar continuamente los sólidos sedimentados hacia el orificio de descarga. Simultáneamente los álabes agitan suavemente el precipitado en el fondo del sedimentador, favoreciendo con esto una deshidratación más intensiva de éste. El agitador gira animado de un movimiento muy lento ($0,057 \text{ min}^{-1}$ o 18 min por rotación) en vuelta del eje del sedimentador, o sea gira tan despacio que no altera la sedimentación.

3.2.3 Determinación de la potencia consumida en la sedimentación ininterrumpida

La determinación de la potencia consumida que se consume durante el proceso se realizó a partir de la ecuación 2.4. En este caso se consideraron el torque operativo de transmisión (tabla 3.2), la velocidad de rotación de barrido del fondo del sedimentadores ($n_b = 0,057 \text{ min}^{-1}$) y para una eficiencia estimando en el mecanismo de transmisión y se muestran en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Resultados del cálculo de la potencia para la sedimentación ininterrumpida

Etapa del proceso productivo	Velocidad de los brazos de barrido de fondo n (min^{-1})	Torque operativo máximo para una unidad de transmisión T (N.m)	Rendimiento de la transmisión mecánica η	Potencia consumida para la sedimentación N (kW)
Actual	$0,057 \text{ min}^{-1}$	585 000	0,5	5,15
Futuro	$0,057 \text{ min}^{-1}$	655 000	0,5	7,8

Como se puede apreciar en los resultados mostrados en la tabla 3.3 las características mecánicas del sistema de accionamiento para las condiciones actuales del proceso productivos se encuentra al límite de su capacidad de accionamiento. Sin embargo, para un aumento futuro de la capacidad de la planta, se tendrá que efectuar modificaciones a su estructura para que no tengan lugar paradas o atascos de su transmisión mecánica.

3.3 Resultados de la determinación de los parámetros operacionales del subsistema energético

Se conoce, que la energía total de un sistema, cualquiera que éste sea: mecánico, eléctrico, electromecánico, entre otros, no puede variar bruscamente, ni es posible pasar de una forma de energía a otra forma de energía instantáneamente.

El motor asincrónico funcionando con datos nominales determinados puede cargarse durante la explotación de distintas maneras y funcionar en la banda de cargas de marcha en vacío hasta la nominal. Se consideró que el motor se encontraba en régimen estacionario. En condiciones donde el par dinámico igual a cero, caracterizado por el trabajo del motor a velocidad constante, y los momento del motor y la carga constante en el tiempo e iguales entre sí.

3.3.1 Características de funcionamiento del motor asincrónico en el mecanismo de accionamiento

Para la determinación de características del funcionamiento del motor asincrónico se prosiguió el proceso metodológico desarrollado en el epígrafe 2.3.1 del capítulo anterior, se utilizaron en los cálculos, las características técnicas nominales

reflejadas en la tabla 2 (véase anexo 3) para el motor eléctrico empleado en el mecanismo de accionamiento y los resultados se analizan a continuación siguiendo la siguiente estructura:

- Análisis de la evolución de la velocidad en el motor eléctrico.
- Observación de la evolución de las corrientes del motor eléctrico.
- Balance energético del motor eléctrico.
- Características mecánicas del motor.

En la tabla 3.4 se ilustra los resultados obtenidos de la evolución de la velocidad del motor asincrónico.

Tabla 3.4. Resultado de la evolución de la velocidad del motor eléctrico.

Velocidad sincrónica n_{ϕ} (min^{-1})	Velocidad mecánica n (min^{-1})	Deslizamiento s (%)	Deslizamiento crítico s_m (%)
1200	1160	3,3	33,3

Indagando los resultados (tabla 3.4), se aprecia que la transformación electromecánica de la energía ocurre para el régimen motor ($0 < s < 1$) bajo la acción del momento electromecánico $C > 0$ dirigido hacia el lado del campo; lo que coincide con lo planteado en la literatura (Ivanov 1984, Vargas 1990). En éste régimen de trabajo el motor eléctrico entrega potencia mecánica en su eje y mueve la carga. Una característica que distingue a éste régimen, es que el rotor gira hacia el lado del campo con una velocidad menor que la del campo ($n < n_{\phi}$) y la potencia mecánica útil (N_u) resulta menor que la consumida de la red (Ivanov 1984). El motor debe ponerse en marcha independientemente, es decir, acelerarse desde el estado inmóvil hasta la velocidad angular próxima a la de sincronismo.

Se confirma lo planteado por Ivanov (1984) que el motor asincrónico de jaula de ardilla estándar tiene característica de velocidad rígida y que cuando estos motores funcionan con característica mecánica en derivación (al variar la carga desde la marcha en vacío hasta la nominal su frecuencia de rotación disminuye solamente en un 2...5 %), y su deslizamiento aumenta más o menos proporcionalmente con el incremento de la carga y poseen un momento de arranque bastante alto.

Tabla 3.5. Resultado de evolución de las corrientes en el motor.

Corriente nominal I_n (A)	Corriente magnetizante I_r (A)	Corriente de arranque I_{arr} (A)	Intensidad en unidades relativas I_{arr}^*
11	7,5	73,21	6,6
Fabricante			5÷7

En los resultados ilustrados en la tabla 3.5 se aprecia que en el momento del arranque, cuando este se conecta directamente a la red, la intensidad de la corriente absorbida en el arranque toma valores de 6,6 veces la corriente nominal y disminuye sólo ligeramente hasta convertirse en la corriente de carga nula (magnetización constante) al aumentar el deslizamiento (figura 3.1).

La tabla 3.6 se ilustra con que eficiencia se efectúa el proceso de transformación electromecánica de la energía en el convertidor electromecánico (motor asincrónico), apreciándose que por el valor obtenido de la eficiencia, se cataloga como un motor de eficiencia estándar.

Tabla 3.6. Resultado de la transformación de la energía eléctrica en mecánica

Potencia eléctrica absorbida de la red N_1 (kW)	Potencia útil N_u (kW)	Eficiencia η (%)
6,9	5,5	80

Lo anteriormente planteado deja ver la posibilidad de mejoras en las prestaciones del mecanismo de accionamiento con la sustitución o remplazo del motor actual por un motor de alta eficiencia, consecuencia que se analizara en la valoración económica del trabajo.

En la figura 3.1 se ilustra la evolución de la corriente en el motor, apreciándose que el motor en muy poco tiempo reduce la corriente absorbida (arranque) a la corriente magnetizante de trabajo.

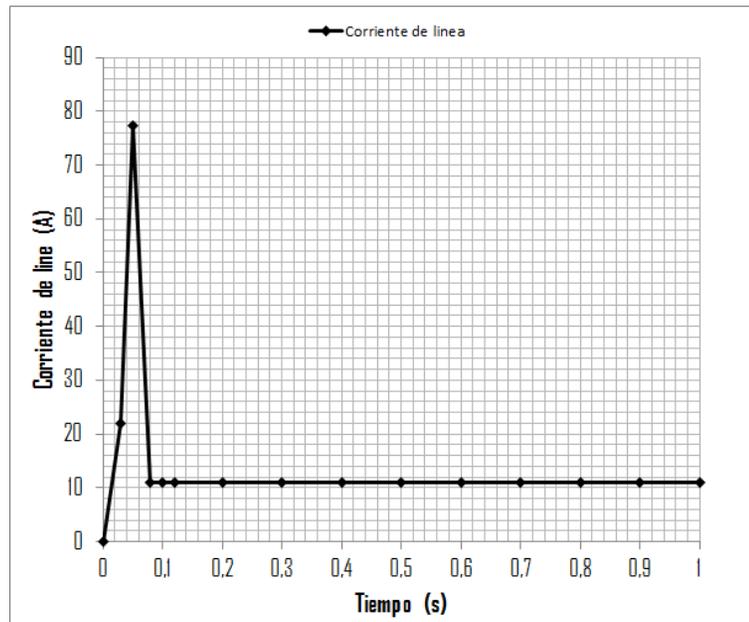


Figura 3.1. Evolución de la corriente en el motor eléctrico.

El motor se diseña de tal modo, que el máximo eficiencia se obtenga para cierta carga incompleta. Por eso durante su funcionamiento la eficiencia permanece casi constante y constituye, para los motores industriales generales de 0,75 a 0,95. Consideramos que el motor funciona con una eficiencia aceptable, pero no la que se precisa.

A continuación en la tabla 3.7 se muestran los resultados del balance energético en el motor eléctrico.

Tabla 3.7. Balance de pérdidas de potencia en un motor eléctrico de inducción

Pérdidas de potencia en el cobre de estator N_{Cu1} (W)	Pérdidas de potencia en el cobre del rotor N_{Cu2} (W)	Pérdidas de potencia magnéticas o en el hierro N_{Fe} (W)	Pérdidas de potencia adicionales N_{ad} (W)	Pérdidas de potencias mecánicas N_{mec} (W)	Potencia útil N_u (kW)
535,86	261,06	247,32	192,36	138	5,5
39 %	19 %	18 %	14 %	10 %	80 %
35-40 %	15-20 %	15-20 %	10-15 %	5-10 %	Estándar

Haciendo un recorrido por la tabla 3.7 se aprecia como tienen lugar las pérdidas en el motor eléctrico y al final aparece el valor de la potencia útil entregada en el eje del

motor a las cargas arrastradas por el mecanismo de accionamiento. Aunque el motor se considera de eficiencia estándar, se aprecia que las pérdidas entran dentro de los rangos que proponen las normas internacionales.

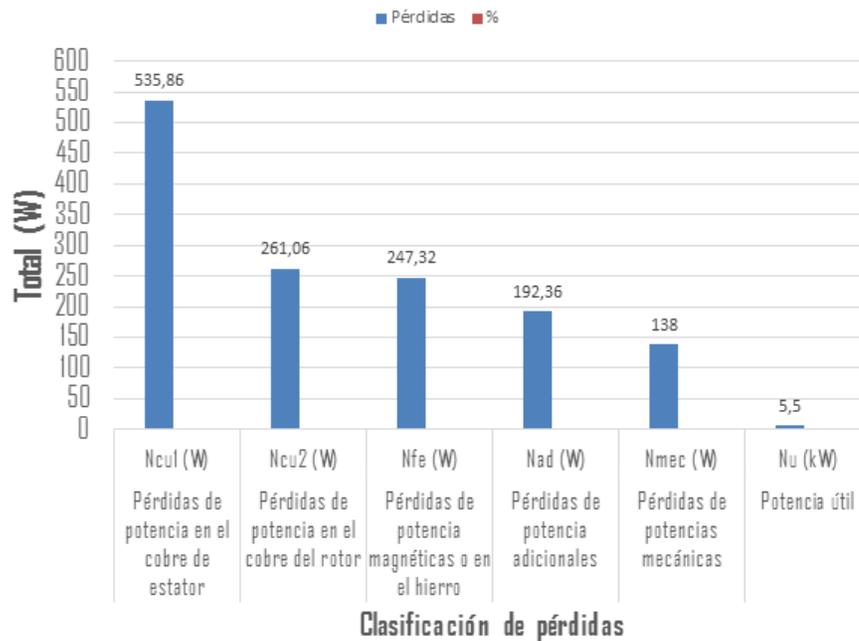


Figura 3.2. Balance de pérdidas de potencia en el motor eléctrico

El grafico 3.2 ilustra con mayor claridad el balance de pérdidas del motor eléctrico, teniendo más influencia las perdidas en el cobre, pero todas están balanceadas según las normas.

A partir del balance de las potencias del motor se obtuvo las características mecánicas del motor de las cuales a continuación se muestra su análisis (tabla 3.8). Se considera aquí la igual entre el momento electromagnético y el entregado por el motor al eje, debido a que se desprecian las pérdidas mecánicas.

3.3.2 Resultados de las características mecánicas. Pares de carga

Por lo general, para el motor asincrónico, se entiende por características mecánicas y de velocidad la relación entre el par y la corriente con respecto al deslizamiento. En este caso las ecuaciones son compactas y cómodas, como las desarrolladas en el capítulo 2, para determinar los pares o momento implicados en el funcionamiento del motor eléctrico.

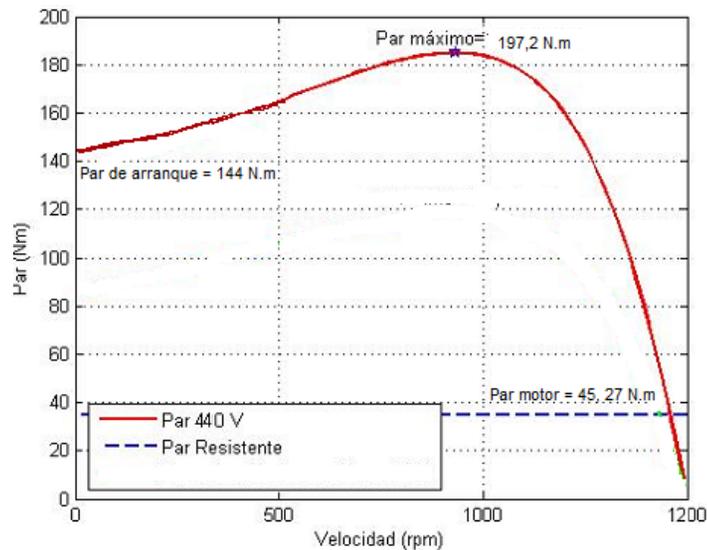


Figura 3.3. Característica mecánica par – velocidad del motor eléctrico

Tabla 3.8. Características mecánicas del motor de inducción asincrónico.

Par electromagnético o motor C (N.m)	Par de arranque inicial C_{arr} (N.m)	Par electromagnético o máximo C_m (N.m)	En unidades relativas $\frac{C_m}{C}$	En unidades relativas $\frac{C_{arr}}{C}$	En unidades relativas $\frac{C_{min}}{C}$
45,27	144	197,2	4,35	3,18	1,0
Fabricante			1,7÷6	0,7÷4	0,6÷1,0

En la figura 3.3 se puede observar el comportamiento de la característica mecánica para el funcionamiento del motor eléctrico, vinculando la relación velocidad, par y intensidad de la corriente aunque no aparezca explícitamente.

3.4 Resultados del procedimiento metodológico aplicado para la determinación de los parámetros del accionamiento por correa

Al fallo de una correa se produce por rotura o desgarramiento de la unión (Reshetov 1985; Shigley 1886; Dobrovolski 1990), emplazando al accionamiento fuera de trabajo. Una transmisión por correas fallará finalmente por fatiga cuando se presenten combinados un excesivo deslizamiento, sobrecargas, acumulación de los efectos causados por las vibraciones, choque y sacudidas de la correa.

Para el cálculo de la transmisión por correa se prosiguió con el procedimiento desarrollado en el epígrafe 2.4.1 del capítulo anterior y se usaron como datos para el cálculo los de la tabla 3 (véase anexo 3). Se efectuó el análisis para tres diámetros diferente de la polea conducida (250 mm, 355 mm, 450 mm).

Tabla 3.9. Características obtenidas para la transmisión por correas con ángulo de contacto igual a 171 grados.

Potencia de diseño Nd (kW)	Velocidad de la correa v (m/s)	Fuerza útil o periférica P(N)	Ángulo de contacto α (grados)	Tensión inicial o estática So(N)	Característica de tracción φ
7,15	9,7	245	171	149	0,82

En un accionamiento por correa, el órgano de tracción (correa de transmisión) es un elemento de suma importancia que determina la capacidad de trabajo de toda la transmisión. Es patente la dificultad en estimar la vida de la correa, sin embargo, consiste que no existe suficiente correlación entre las tensiones y las deformaciones de una correa y su vida, de modo que deben emplearse coeficientes de seguridad muy grandes. En la polea actúan fuerzas de cizallamiento muy complicadas debidas al resbalamiento y al arrastre. En la tabla 3.9 y 3.10 se ilustran los resultados de la estimación de la vida de la correa por el método de las tensiones normales.

Los resultados obtenidos demuestran que las correas en la transmisión tienen una duración aproximada de año y medio. Por eso es que los fabricantes aconsejan poner más correa de las necesarias.

Tabla 3.10. Distribución de los esfuerzos en la correa.

Esfuerzo por tensado estático σ_0 (MPa)	Esfuerzo por el efecto de la fuerza centrífuga σ_v (MPa)	Esfuerzo por fuerza útil σ_p (MPa)	Esfuerzo por flexión de la correa σ_{flex} (MPa)	Esfuerzos máximos $\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	Vida útil de la correa H (horas)
1,064	0,12	1,752	3,438	5,5	13 260
Diámetro de la polea conducida $d_2 = 250$ mm					

Todo indica según los resultados que se alcanzan en la tabla 3.11 y 3.12 que existe una influencia significativa del ángulo de abrazado, coeficiente de rozamiento y tensado inicial con la carga que se transmite, así como en la longevidad de la correa. Tabla 3.11. Características obtenidas para la transmisión por correas con ángulo de contacto igual a 160 grados.

Potencia de diseño Nd (kW)	Velocidad de la correa v (m/s)	Fuerza útil o periférica P(N)	Ángulo de contacto α (grados)	Tensión inicial o estática So(N)	Característica de tracción φ
7,15	9,7	245	160	157	0,78

Tabla 3.12. Distribución de los esfuerzos en la correa.

Esfuerzo por tensado estático σ_0 (MPa)	Esfuerzo por el efecto de la fuerza centrífuga σ_v (MPa)	Esfuerzo por fuerza útil σ_p (MPa)	Esfuerzo por flexión de la correa σ_{flex} (MPa)	Esfuerzos máximos $\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	Vida útil de la correa H (horas)
1,12	0,12	1,752	3,43	5,55	12 210
diámetro de la polea conducida $d_2 = 350$ mm					

La transmisión mantiene un comportamiento más o menos similar si observamos los resultados que se reflejan en las tablas 3.13 y 3.14 para otra relación de transmisión, pero si se puede observar una ligera disminución en la vida útil de la correa, lo que corrobora el anterior planteamiento.

Tabla 3.13. Características obtenidas para la transmisión por correas con ángulo de contacto igual a 150 grados.

Potencia de diseño Nd (kW)	Velocidad de la correa v (m/s)	Fuerza útil o periférica P(N)	Ángulo de contacto α (grados)	Tensión inicial o estática So(N)	Característica de tracción φ
7,15	9,7	245	160	165,5	0,74

Se debe señalar que existe un parámetro importante que define la característica de tracción de la transmisión (coeficiente de tracción), éste da una medida de la capacidad que tiene la transmisión de transmitir la carga (potencia).

Tabla 3.14. Distribución de los esfuerzos en la correa.

Esfuerzo por tensado estático σ_0 (MPa)	Esfuerzo por el efecto de la fuerza centrífuga σ_v (MPa)	Esfuerzo por fuerza útil σ_p (MPa)	Esfuerzo por flexión de la correa σ_{flex} (MPa)	Esfuerzos máximos $\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	Vida útil de la correa H (horas)
1,18	0,12	1,752	3,44	5,6	11 190
diámetro de la polea conducida $d_2 = 450$ mm					

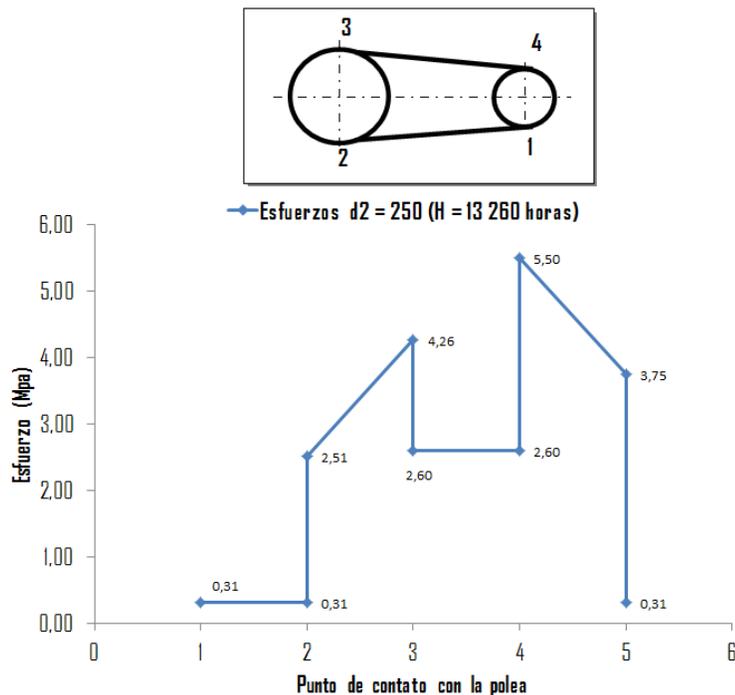


Figura 3.4. Esfuerzos que se producen en diversas partes de una correa en una vuelta completa. ($d_2 = 250$ mm y una vida útil de la puleya de 13 260 horas).

Cuando graficamos (figura 3.4) el estado tensional para la relación de transmisión que permite obtener una longevidad mayor de las correas en el accionamiento, se observa que las tensiones alcanza el mayor valor en el ramal conductor de la puleya

motriz. Haciendo patente lo que conjeturábamos, que la correa sufre más en los ramales más tensados que en los relajados.

3.5 Cálculo de la eficiencia total del mecanismo de transmisión

El cálculo de la eficiencia total del mecanismo de transmisión se realizó por la ecuación 2.46. En este caso se consideró que la magnitud de las pérdidas depende de los materiales, la velocidad en la línea primitiva la incidencia de cada una de las etapas del como el producto de las eficiencias de todas sus etapas (transmisión por correa, reductor por engranaje, reductor por tornillo sin-fin y engranaje recto). Se apreció el cálculo de una eficiencia real y de la teórica. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla.

Tabla 3.15. Resultados del cálculo de la eficiencia total de la mecanismo de transmisión.

Eficiencia del accionamiento o por correa η_c	Eficiencia del reductor por engranaje η_r	Eficiencia del reductor por tornillo sin-fin η_{tor}	Eficiencia del engranaje recto η_e	Eficiencia total del mecanismo de transmisión η_t
0,95	0,92	0,56	0,97	0,47**
0,96	0,97	0,7	0,99	0,64

** Eficiencia real del mecanismo de transmisión.

El valor que se obtiene de eficiencia del mecanismo de transmisión se considera baja, cuando no se justifica una transmisión mecánica con eficiencia en fracción decimal por debajo del 0,8 (Baránov 1985).

3.6 Relación de transmisión del sistema

La determinación de la relación de transmisión total del sistema se realizó por la ecuación 2.47, como el producto de las eficiencias de todas sus etapas del de la transmisión por correa para tres relaciones de transmisión, la del reductor por engranaje diferencial ($u_r=16,49$), la del reductor por tornillo sin fin ($u_{tor} =71$) y la del engranaje ($u_e =11,69$), los resultados se muestran en la tabla 3.16.

Si interpretamos estos resultados (tabla 3.16), se evidencia que estamos en presencia de un accionamiento eléctrico robusto. El cual es capaz de desarrollar relaciones de transmisión superiores a los miles, necesarios para hacer girar el agitador de rastrillos muy lento que no afecte el proceso de sedimentación.

Tabla 3.16. Resultados del cálculo de la relación de transmisión total de la transmisión mecánica

Relación de transmisión de la transmisión por correa u_c	Relación de transmisión del reductor por engranaje u_r	Relación de transmisión del reductor por tornillo sin-fin u_{tor}	Relación de transmisión del engranaje u_e	Relación de transmisión total de la transmisión mecánica u_t
1,53	16,43	71	11,69	20 864
2,21	16,43	71	11,69	30 137
2,81	16,43	71	11,69	38 319

3.7 Resultados del cálculo las características mecánicas de las cargas arrastradas

El cálculo las características mecánicas de las cargas arrastradas se efectuaron prosiguiendo el procedimiento desarrollo en el epígrafe 2.10 del capítulo anterior. Los datos para el cálculo, así como los resultados obtenidos están ilustrados en la tabla 3.17.

Tabla 3.17. Resultados del cálculo de la relación de transmisión total de la transmisión mecánica.

Par electromagnético C (N.m)	Relación de transmisión total u_t	Eficiencia total de la transmisión mecánica η_t	Par suministrado al órgano de trabajo C_a (N.m)
45,27	20 864	0,46	431 884
45,27	30 137	0,46	662 385
45,27	38 319	0,46	797 963

Haciendo un breve análisis de los resultados, se aprecia que se pueden combinar tres relaciones de transmisión gracias al accionamiento por correa que enlaza el motor eléctrico con los reductores un reductor muy potente que hace girar el eje central del tanque que es donde se encuentran los brazos. Pero en estos momentos solo se puede usar una sola combinación (tabla 3.17 primer resultado) porque la columna central que soporta el accionamiento solo tienen capacidad de resistencia para 436 000 N.m.

3.8 Cálculo del par resistente impuesto por la carga al motor eléctrico

La determinación del par resistente se realizó a partir de la ecuación 2.49, los datos sustituidos en la ecuación son expuestos en la tabla tal.

Tabla 3.18. Resultados del cálculo del par resistente impuesto por la carga

Par de arranque inicial del motor C_{arr} (N.m)	Par motor máximo C_m (N.m)	Par básico $C_{r.fun}$ (N.m)	Velocidad de rotación sincrónica $n\phi$ (min^{-1})	Velocidad de rotación mecánica n (min^{-1})	Par resistente de la carga C_{ca} (N.m)
144	197,2	45,27	1200	1160	45,2

El valor obtenido del par resistente impuesto por la inercia de los elementos mecánicos del mecanismo de transmisiones igual inferior al par motor entregado por el motor, lo que presume después de un pequeño tiempo de aceleración se establece un régimen permanente para el motor.

3.9 Valoración de los impactos de la investigación

En la investigación se demuestra que los métodos existentes, aplicados a determinan las regularidades del comportamiento del sistema de accionamiento cuando el sedimentador es sometido a proceso de sedimentación ininterrumpida

El análisis del impacto de la investigación se realiza desde varios puntos de vista:

- Ambiental.
- Económico.

3.9.1 Impacto medio ambiental

Un sedimentador es una máquina para una función limitada. En muchos se utilizan floculantes (reactivos químicos) para aumentar su rendimiento. Conforme aumenta la dosificación, aumenta la viscosidad en la descarga. Existe un punto en el cual los sólidos sedimentados pierden su fluidez y como consecuencia los brazos no pueden conducirlos hacia la descarga. En cambio la masa viscosa o gelatinosa tiende a viajar delante de los brazos, creciendo progresivamente y terminan depositándose en los mismos. Cuando esto sucede, aquellos sólidos que deberían moverse hacia el centro del tanque, serán bloqueados por la masa estacionaria. El tiempo de residencia adicional tiende a consolidar los sólidos en esta masa y hacerlo más difíciles de mover. El resultado es la formación de una gran acumulación de sólidos que se desliza por el fondo del tanque y eventualmente cubre la estructura de los brazos. Si se permite continuar la acumulación de sólidos delante de la masa contenida en los brazos, el total puede llevar a la formación de un anillo completo. Esta formación es la que realmente se domina isla. La isla efectivamente bloquea los sólidos sedimentados en la descarga central, y cualquier sólido que quiera llegar a la salida deberá pasar por sobre la isla o hacer cortocircuito directamente desde la alimentación. Con un tiempo insuficiente de retención en el sedimentador, el resultado puede llegar a ser una concentración de sólidos mucho más baja. De esta forma el hundido llega a ser una pulpa diluida o provocar la detención del movimiento de los brazos del tanque y originar la completa solidificación de los sólidos en el interior del tanque con malas consecuencias para el proceso productivo.

Cuando el movimiento real del tanque se detiene, el mineral comienza a solidificarse, proceso que se hace peligroso e incorregible si la parada dura más de 15 minutos. Un caso de una completa solidificación, es necesario primeramente saltar un eslabón en el proceso de lixiviación, lo que disminuye la eficiencia y la calidad del proceso en sí, dado que ahora son menos los tanques se están sedimentando el mineral y por tanto el resultado final no es el mismo. Por otro lado en los brazos agitadores se crean incrustaciones que aumentan el peso neto del mismo, lo que finalmente trae consigo su torcedura o rotura completa con la parada del tanque. Este fenómeno se

observa siguiendo el aumento de la densidad del mineral mediante el SCADA instalado en la planta.

Luego se abren las compuertas y utilizando agua a presión se proyecta contra la pulpa solidificada y se trata de lavar el tanque. Muchas veces es necesario utilizar máquinas extractoras de mineral. Este proceso involucra mucha fuerza laboral, el grado de contaminación por el derrame de la mezcla al suelo es muy grande y finalmente el problema puede durar varios días y los recursos destinados a solucionar las averías pueden ser muy grandes.

La sedimentación ininterrumpida de pulpas minerales lateríticas en sedimentadores con esquema tecnológico carbonato amoniacal, está dado por una serie de actividades e impactos entre los que se pueden resaltar, la identificación de las acciones con repercusión ambiental (derrame de pulpa lixiviada al suelo, escape de amoníaco, emisión de ruido continuo) y la identificación de los factores ambientales susceptibles a afectaciones (tabla 3.12).

Tabla 3.12 Identificación de los factores ambientales susceptibles a afectaciones.

Medio Físico	Medio Socioeconómico
Suelo	Hombre
Agua	Aspectos Sociales
Aire	Aspectos Económico

El proceso de caracterización de los impactos ambientales es de gran importancia, pues posibilita la comprensión de la disminución exacta del análisis desarrollado, determinando cómo repercute sobre el medio ambiente cada uno de los impactos ambientales que tienen lugar tanto en el objeto como en los elementos externos a este.

El proceso de caracterización de los impactos ambientales (tabla 3.14) es de suma importancia, pues posibilita la comprensión de la dimensión exacta en el análisis desarrollado, determinando como repercute sobre el medio cada uno de los impactos ambientales que tienen lugar en el proceso de espesado y clarificación de pulpas minerales lateríticas por sedimentación.

Tabla 3.14. Identificación de los impactos ambientales asociados a la sedimentación ininterrumpida de pulpas minerales lateríticas.

Acciones o Actividades	Factores Ambientales	Impactos Ambientales
Escape de Amoniaco	Aire	Disminución de la calidad del Aire
Escape de Amoniaco	Hombre	Aumento de enfermedades respiratorias
Escape de Amoniaco	Económico	Pérdidas por concepto Económico
Derrame de la Pulpa	Económico	Consumo de los recursos hidráulicos
Emisiones de Ruido Continuo	Hombre	Pérdidas de la Sensibilidad Auditiva

Las afectaciones mencionadas producen efectos indirectos y negativos como degradación ambiental del medio marino y costero, sustitución de los ecosistemas originales de fondos arenosos por arcillosos, producto de los grandes volúmenes de sedimentos depositados en la zona infralitoral, y la disminución en la capacidad de trabajo físico y mental del hombre, expuestos también a enfermedades respiratorias.

3.9.2 Determinación del efecto económico

En la Empresa del Níquel “Comandante Ernesto Che Guevara”, 19 Sedimentadores de acción continua con agitador de rastrillos, desempeñan la importante función de espesar las pulpas y clarificar el licor. Incorporan como elemento principal los mecanismos de accionamiento (motores y elementos de transmisión, el eje y los brazos giratorios) para transportar continuamente los sólidos sedimentados hacia el orificio de descarga central y beneficiando con esto la deshidratación del producto espesado para la liberación de licor y obtener, de este modo, una pulpa de con mayor concentración en sólidos (densidad).

Mecanismos de accionamiento, donde la fuente de movimiento la proporciona un pequeño motor asíncrono de 5,5 kW de potencia, el cual plasma un tiempo de trabajo ininterrumpido de 8760 horas como promedio anual, y consume aproximadamente un total de 48180kW·h por año. Según los precios actuales (0,20 CUC/kW·h) en el mercado nacional, esto representa un costo aproximado de operación de 9 636 CUC, costo que no incluyó las multas por factor de potencia o los cargos por demanda que pueden aplicarse en algunas zonas. Si se tiene en cuenta

las acciones de reemplazo de motores y accionamiento de eficiencia estándar, por otro que fuera solo de 6% más eficientes (alta eficiencia), permitiendo el ahorro de 840 CUC anuales por cada motor, que representa un ahorro aproximadamente de 15 960 CUC por año, englobando a todos motores.

3.10 Conclusiones del capítulo 3.

1. Se verificaron las características mecánicas del sistema de accionamiento de los sedimentadores y su compatibilidad con las exigencias tecnológicas y de proceso.
2. A partir de información empírica, se encontraron las relaciones funcionalmente entre las propiedades de pulpas minerales lateríticas cubanas y el consumo de energía de los sedimentadores.

CONCLUSIONES GENERALES

1. Se demostró que las características mecánicas actuales de los mecanismos de accionamiento de los sedimentadores son compatibles con las exigencias tecnológicas y de proceso. No así para soportar un aumento de la capacidad de la planta, de modo que se puedan procesar 139 kg/s (500 t/h) de mineral reducido, contenidos suspendidos en una pulpa.
2. Las equivalencias 2.1 y 2.4 permiten estimar el consumo de energía de los sedimentadores en función de las características de la pulpa alimentada (caudal y concentración de sólidos), de sus propiedades físicas (densidades del sólido y del líquido y la pulpa) y de las especificaciones de la suspensión que se desea obtener a la salida (concentración de sólidos).
3. Se establecieron el comportamiento de los principales parámetros de operación del mecanismo de accionamiento cuando el sedimentador es sometido a un régimen de sedimentación ininterrumpida.

RECOMENDACIONES

1. Valorar el empleo de la ecuación 2.4, en los cálculos de la potencia necesaria para la selección de motores eléctricos para mecanismos de accionamiento de sedimentadores, sometido a sedimentación ininterrumpida de pulpas minerales con comportamiento Bingham.
2. Realizar pruebas para la sustitución de los motores eléctricos de eficiencia estándar, por motores de alta eficiencia en mecanismo de accionamiento de los sedimentadores, con la utilización de variadores de velocidad y evaluar el comportamiento del consumo de energía.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. CABREJOS-SALINAS J., A. 2011: Estudio de pre-factibilidad para la recuperación de agua a partir de relaves de gran minería de cobre mediante la tecnología de relaves espesados. Tesis de Grado. Universidad Nacional de Ingeniería. 175 p.
2. MIP PROCESS TECHNOLOGIES. 2009: MIP Thickener Design. Consulta: 12 de febrero de 2017 Disponible en:<http://www.mipprocess.co.za/news/MIP%20Thickener%20Design-02.pdf>.
3. KING, D. L. Espesadores. En: MULAR, A. y BHAPPU, R. (editores).Diseño de plantas de proceso de minerales. 2da ed. Editorial Rocas y Minerales, Madrid, 83-126.
4. MULAR, A. y BHAPPU, R. KING 1982: Diseño de plantas de proceso de minerales. 2da ed. Editorial Rocas y Minerales, Madrid, 83-126.
5. COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA. 2007: Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. 2da Ed. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, D.F.,368 p.
6. WILLS, B.; NAPIER, M., T. 2006: Mineral processing technology. 7ma Ed. Elsevier Science & Technology Books, Estados Unidos de América, 400 p
7. KASATKIN, A. G. 1987. Operaciones básicas y aparatos en la tecnología química. 2da. Ed. Pueblo y Educación, La Habana, Tomo 1.
8. BROWN, G. G. 1965: Operaciones básicas de la ingeniería química. 2da. Ed. Edición Revolucionaria, La Habana, Tomo 1.
9. LOBOSCO, S. O., PEREIRA, D. J. 1989: Selección y aplicación de motores eléctricos. Siemens Aktiengesellschaft y Marcombo, S.A., Barcelona, 372 p. Tomo
10. CHAPMAN, J. 2005: Máquinas Eléctricas. McGraw-Hill, México, 420 p.
11. IVANOV, S.; A. V. 1984: Máquinas Eléctricas. Mir, Moscú. 440 p.
12. RODRÍGUEZ-ARRIBAS, J. 1999: Control vectorial óptimo de accionamientos eléctricos asíncronos con par resistente dependiente de la velocidad. Dr.C Carlos Mario Vega González (Tutor). Universidad Politécnica de Madrid. 171 p.
13. VARGAS, J. 1990: Máquinas Eléctricas rotativas. McGraw-Hill, México, 420 p.
14. BONAL, J. 1999: Accionamientos eléctricos a velocidad variable. Vol. 1. Technique y Documentation, Paris, 404 p.
15. FINDLAY, R. D.; STRANGES, N.; MACKAY, D.K. 1994: Losses due to Rotational Flux in Three Phase Induction Motors. IEEE Transactionson Energy Conversion 9 (3): 543-548.

16. BARRERA, M. P.; BOSSIO, R. G.; SOLSONA, A. J.; GARCIA, O. G. 2004: Evaluación y modelado de las pérdidas en el hierro de motores de inducción. En: XI Reunión de trabajo en procesamiento de la información y control, 21 al 23 de septiembre de 2005. Artículo. Córdoba, Argentina, 21 -23 septiembre, 500-505.
17. Baránov, G. 1985. Curso breve de la teoría de mecanismos y máquinas. MIR Moscú
18. MONTERO RAMÍREZ, G. 2011: Implementación de un ensayo de eficiencia para motores eléctricos de inducción en el laboratorio de eficiencia energética del ICE. Ing. Oscar Núñez Mata (Tutor). Tesis de Grado. Universidad de Costa Rica. 105 p.
19. HENZE, M. 1996: El motor integral, un nuevo accionamiento compacto de velocidad variable, Revista ABB 28 (4): 12-26.
20. NORMA NEMA MG10. 1983: Losses of potency established for electric motors. National Manufacture Association de National Manufacture Association, Estados Unidos. 60 p.
21. DE LA VEGA-ORTEGA., M. 1990: La técnica del accionamiento eléctrico. Acta Mexicana de Ciencia y Tecnología 7 (25-28): 7-23.
22. PHILIPPOW, E. 1981: Manual de electrotecnia Vol. 5: elementos y grupos constructivos de la técnica de la energía eléctrica, accionamiento eléctrico. Calr Hanser Verlag Muenchen Wien.
23. EMPRESA "COMANDANTE ERNESTO CHE GUEVARA. 2008: Manual de operaciones Planta lixiviación y lavado.
24. SAVOLAINEN, A. 2004: Hacia un futuro mejor: Los accionamientos electrónicos de velocidad regulable de ABB ahorran mucha energía, respetan el medio ambiente y constituyen una inversión muy razonable. Revista ABB 15 (1): 34 - 38.
25. MARIÑO-PÉREZ, A.; FALCÓN-HERNÁNDEZ, J.; SALES-VALADAO, G, E. 2010: Correlación teórica entre las concentraciones de sólidos en el lodo sedimentado por gravedad y en la torta sin escurrir. Minería y Geología 26 (4): 79-103.
26. VERA-ROMERO, C. A.; DÍAZ-R J. L.; PARDO-GARCÍA, A. 2008: Características dinámicas en los procesos transitorios del motor de inducción de rotor jaula de ardilla. Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada 1 (11): 34-41.
27. ROJAS-PURÓN, L.; MARRERO-RAMÍREZ, S.; ROMERO-RUEDA, I.; DURÁN-ABELLA, C. 2000: Observador de velocidad para accionamientos de elevadas frecuencias en procesos de lixiviación y lavado. Minería y Geología 17 (2): 84-93.
28. ROJAS L. D.; MORERA, M.; COLUMBIÉ Á. 2004: Identificación de accionamiento de motor de inducción con bomba centrífuga usando lógica difusa. Energética 25 (3): 18-9.

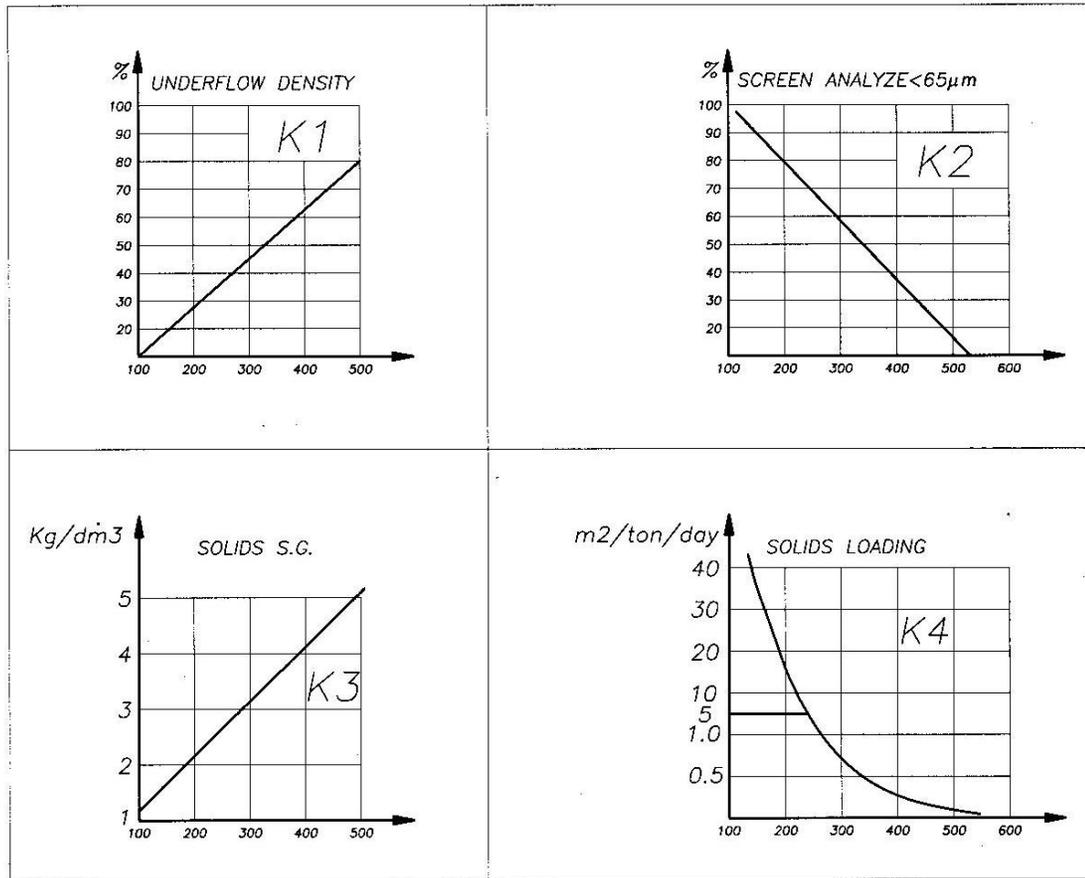
29. FINDLAY, R. D.; STRANGES, N.; MACKAY, D.K. 1994: Losses due to Rotational Flux in Three Phase Induction Motors. IEEE Transactions on Energy Conversion 9 (3): 543-548.
30. M., A. A.; FINDLAY, R. D.; POLOUJADOFF, M. 1985: Stray Losses in Induction Machines: Part II, Calculation and Reduction”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems 104 (6): 1506-1512.
31. HENZE, M. 1996: El motor integral, un nuevo accionamiento compacto de velocidad variable, Revista ABB 28 (4): 12-26.
32. ALZATE-GOMES, A.; ESCOBAR-MEJIA A.; ANDRES-TORRES C. 2009: Control vectorial de la máquina de inducción. ScientiaetTechnica 15 (43): 55-60.
33. BONNETT, A.H. 1996: Regulatory Impact on the Application of AC Induction Motors. IEEE IndustryApplications Magazine 2 (2): 4-15.
34. FRAILE-ARDANUY, J. 2007: Estudio del comportamiento de la máquina asíncrona utilizando MATLAB®/Simulink. IEEE-RITA 2 (1): 9-18.
35. DÍAZ, J. L. PARDO, A. Estrategias avanzadas de control en accionamientos de corriente alterna. Revista Ciencia e Ingeniería 25 (1): 23 – 27.
36. MUÑOZ, JAVIER., RODRÍGUEZ, E., MORERA M. 2008: Requerimientos tecnológicos del transportador de laterita hacia el molino de bolas, de la empresa productora de níquel “Comandante Ernesto Guevara”. Energética 29 (3): 37 – 43.
37. GONZÁLEZ-CONEO J., QUIROZ-MARIANO V., MAURY, H., RIBA, C. 2006: Aplicación de métodos para el diseño y selección de accionamientos rápidos. Ingeniería & Desarrollo. 3 (20): 78 – 94.
38. KASATKIN, A. G. 1985: Operaciones básicas y aparatos de tecnología química. 3. ed. Pueblo y Educación, La Habana.
39. MULAR, A.; BHAPPU R. 1980: Diseño de plantas de procesos de minerales. Todo
40. FITZGERALD, A. (2004). Máquinas Eléctricas. McGraw-Hill, México, 520 p.
41. CHAPMAN, J. 2005: Máquinas Eléctricas. McGraw-Hill, México, 420 p.
42. BONAL, J. 1999: Accionamientos eléctricos a velocidad variable: Fundamentos de electrotecnia y de mecánica. Las técnicas de variación de velocidad. Vol. 1. Technique y Documentation, Paris, 404 p.
43. WILLS, B.; NAPIER, M. T. 2006: Mineral processing technology. 7ma. Ed. edición. ElsevierScience y TechnologyBooks, Estados Unidos de América, 500 p.
44. GUPTA, A.; YAN, D. S. 2006: Mineral processing design and operation. Australia, ElsevierScienceLtd, 600 p.

45. LOBOSCO, S. O., PEREIRA, D. J. 1989: Selección y aplicación de motores eléctricos. Siemens Aktiengesellschaft y Marcombo, S.A., Barcelona, 372 p. Tomo 1.
46. ABB Sistemas Industriales S.A. 2000: Guía técnica No. 7: Dimensionado de un sistema de accionamiento. ABB Automation Group Ltd., Barcelona, 40 p.
47. KRISHNAN. R. 2001: Electric motor drives. Prentice Hall, Estados Unidos, 550 p.
48. Norma NEMA MG10. 1983: Losses of potency established for electric motors. National Manufacture Association de National Manufacture Association, Estados Unidos. 60 p.
49. MORENO-EGUÍLAZ, J. M. 1999: Aportaciones a la optimización de energía en accionamientos eléctricos de motores de inducción mediante lógica difusa. Dr.C Joan PeracaulaRoura (tutor). Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. 317 p.
50. RODRÍGUEZ-ARRIBAS, J. 1999: Control vectorial óptimo de accionamientos eléctricos asíncronos con par resistente dependiente de la velocidad. Dr.C Carlos Mario Vega González (Tutor). Universidad Politécnica de Madrid. 171 p.
51. MONTERO RAMÍREZ, G. 2011: Implementación de un ensayo de eficiencia para motores eléctricos de inducción en el laboratorio de eficiencia energética del ICE. Ing. Oscar Núñez Mata (Tutor). Tesis de Grado. Universidad de Costa Rica. 105 p.
52. RODRÍGUEZ-ARRIBAS, J. 1999: Control vectorial óptimo de accionamientos eléctricos asíncronos con par resistente dependiente de la velocidad. Dr.C Carlos Mario Vega González (Tutor). Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. 171 p.
53. MUÑOZ-ÁLVAREZ J. 2004: Estudio y simulación de un accionamiento con Motor de Reluctancia Conmutada. Dr.C Mario Morera Hernández, MsC. Elio Castro Alfonso (Tutores). CUJAE, Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas. 101 p.
54. VIDAL-BORT, J. 2002: Estudio del modelo matemático del motor de inducción trifásico. Simulación en régimen dinámico. Ing. Luis GuaschPesquer (tutor). Escuela Técnica y Superior de Ingeniería. 121 p.
55. González, S. A.: Nuevas técnicas en el accionamiento de máquinas de movimiento incremental. Dr. Ing. Mario Benedetti (tutor). Universidad Nacional de Mar del Plata. 280 p.
56. BARRERA, M. P.; BOSSIO, R. G.; SOLSONA, A. J.; GARCIA, O. G. 2004: Evaluación y modelado de las pérdidas en el hierro de motores de inducción. En: XI Reunión de trabajo en procesamiento de la información y control, 21 al 23 de septiembre de 2005. Artículo. Córdoba, Argentina, 21 -23 septiembre, 500-505.

57. ROMERO-RUEDA I. 2006: Máquinas eléctricas. 2da Ed. Material elaborado para Maestría en Electromecánica. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 101 p.
58. ABRAHAMSEN J., PEDERSEN J., BLAABJERG. 1996: State of the art of optimal efficiency control of low cost induction motor drives. PEMC – 96 12 (1): 163 – 170.
59. CEROVSKI Z., JAVUREK J. 1997: Converter control of asynchronous motor drive with minimum current consumption. EPE EuropeanPowerElectronicConference. Groendheim, Norway. 3 (8):807-812.
60. COSTA MONTIEL A., GALAN N., CIUMBULEA G., LÓPEZ X. M. 2004: Cálculo de los parámetros del motor de inducción a partir de datos de catálogo. Energía y Computación 12 (2): 45 – 49.

ANEXO 1.

Figura 1. Gráficas para seleccionar los coeficientes K1, K2, K3, K4.



ANEXO 2.

Tabla 1. Clasificación del trabajo del sedimentador

CONCEPTO	Clasificación del trabajo			
	LIGERO	NORMAL	DURO	MUY DURO
Carga de sólidos m ² /t/día	Sobre 4.7	1.4 a 4.7	0.5 a 1.4	Menor que 0.5
Pie ² /t/día	(Sobre 50)	(15 a 50)	(5 a 15)	Menor que (5)
Concentración del hundido % sólidos secos	5 o menos	5-30	30-50	Más de 50
% del total de sólidos menores de 74 micras (% - 200 mallas)	100	85 a 100	50 a 85	Menos que 50
% del total de sólidos mayores de 210 micras (% + 65 mallas)	0	0 a 5	5 a 15	Más de 15
Peso específico de sólidos secos	1.0 a 1.25	1.25 a 3.0	3.0 a 4.0	Sobre 4.0
Determinación del par donde Par = KD ²				
K en Newton/metro donde D es el diá- metro del tanque en metros.	15 a 58	73 a 131	146 a 292	Sobre 292
K en libras/pie donde D es el diáme- tro del tanque en pies	1 a 4	5 a 9	10 a 20	Sobre 20

Fuente: (King 1982)

ANEXO 3

Tabla 2. Parámetros nominales del motor eléctrico (escogidos de la chapa).

No.	Parámetros	Simbología	Valor	U/M
1	Potencia mecánica desarrollada	Nu	5,5	kW
2	Frecuencia de la red	f_1	60	Hz
3	Tensión de línea	U	440	V
4	Corriente de línea del estator	I	11	A
5	Frecuencia de rotación del rotor	n	1160	min ⁻¹
6	Eficiencia	η	80	%
7	Coeficiente de potencia	$\cos \varphi$	0,82	-
8	Numero de polos	p	6	-
9	Factor de servicio	fs	1.3	-
10	Par nominal	C	45,27	N.m
11	Peso	G	55	kg



Motor asincrónico con rotor en corto circuito: Modelo A02 – 51 – 61 – M101

ANEXO 4.

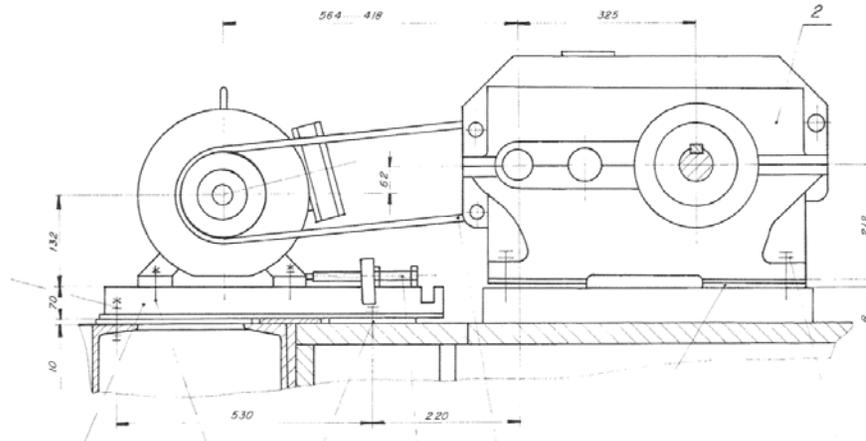
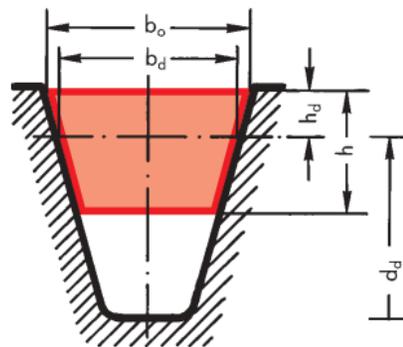


Figura 1. Accionamiento por correa

Tabla 3

Perfil	DIN 2215	(5)	6	(8)	10	13	17	(20)	22	(25)	32	40
	ISO 4184	-	Y	-	Z	A	B	-	C	-	D	E
Ancho superior de la correa (mm)	b_o	≈ 5	6	8	10	13	17	20	22	25	32	40
Ancho estándar (mm)	b_d	≈ 4,2	5,3	6,7	8,5	11	14	17	19	21	27	32
Altura de la correa (mm)	h	≈ 3	4	5	6	8	11	12,5	14	16	20	25
Distancia (mm)	h_d	≈ 1,3	1,6	2,0	2,5	3,3	4,2	4,8	5,7	6,3	8,1	12
Diámetro de polea mín. recomendado (mm)	$d_{d \text{ min}}$	20	28	40	50	71	112	160	180	250	355	500
Peso por metro (kg/m)		≈ 0,018	0,026	0,042	0,064	0,109	0,196	0,266	0,324	0,420	0,668	0,958
Max. Frecuencia de flexión (s^{-1})	$f_{B \text{ max}}$											80
Velocidad max. de la correa (m/s)	v_{max}											30



No.	Parámetro	Simbología	Valor	U/M
1	Perfil de la correa	B		
2	Área de la sección	F	140	mm ²
3	Diámetro de la polea motriz	d_1	160	mm
4	Diámetros de la polea conducida	d_2	250	mm
5	Diámetros de la polea conducida	d_3	355	mm
6	Diámetros de la polea conducida	d_4	450	mm

ANEXO 5.

No.	Parámetros	Simbología	Valor	U/M
1	Relación de transmisión total	i	16,43	-
Primer escalón				
1	Relación de transmisión total	i	4,053	-
2	Módulo normal	m	2,5	mm
3	Ángulo de la hélice	β	16	°
4	Número de dientes del piñón	Z_1	19	-
5	Número de dientes de la rueda	Z_2	77	-
6	Ancho de la rueda	b	32	mm
Segundo escalón				
1	Relación de transmisión total	i	4,053	-
2	Módulo normal	m	2,5	mm
3	Ángulo de la hélice	β	16	°
4	Número de dientes del piñón	Z_1	19	-
5	Número de dientes de la rueda	Z_2	77	-
6	Ancho de la rueda	b	50	Mm
Diferencial				
1	Módulo normal	m	5	mm
2	Número de dientes del piñón	Z_1	10	-
3	Número de dientes de la rueda	Z_2	15	-
4	Marca	451-A-24030-10A		

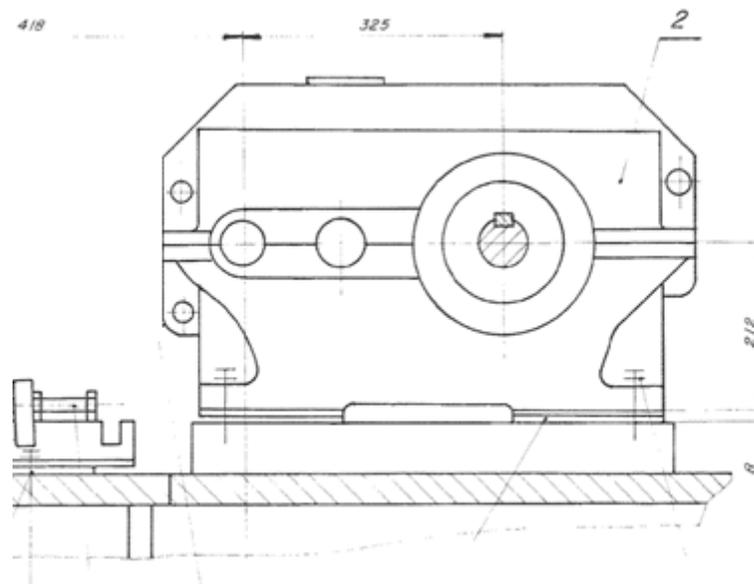


Figura 2. Reductor diferencial U24 – 220 – 16 – 22 – y2

ANEXO 5.

No.	Parámetros	Simbología	Valor	U/M
1	Relación de transmisión total	i	71	-
2	Modulo axial	m	12	mm
3	Número de entradas del tornillo	Z_1	1	-
4	Número de entradas de la corona	Z_2	71	-
5	Angulo de la hélice	λ	4,30	°
6	Número del modulo	q	12	-
7	Diámetro del tornillo	da_1	144	mm
8	Ancho de la rueda	b	125	mm
9	Diámetro de la rueda	da_1	852	mm
10	Número de dientes del piñón	Z_3	13	-
11	Módulo	m	20	mm
12	Diámetro del piñón	da_3	260	mm

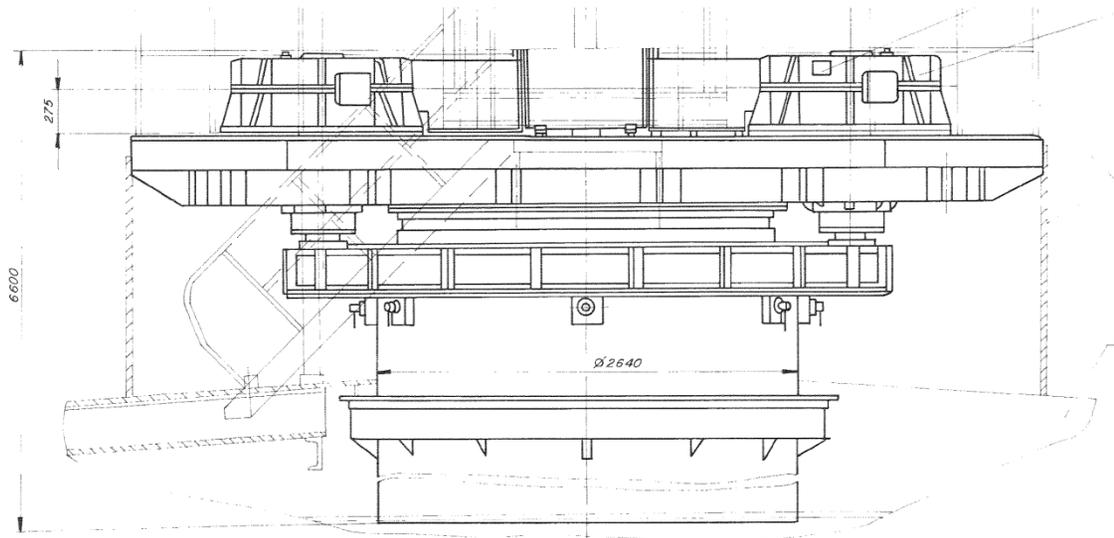


Figura 3. Reductor por tornillo sin-fin