

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



FRENADO DINÁMICO PARA WINCHE DE IZAJE DE MINERAL

**INFORME DE SUFICIENCIA
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO ELECTRICISTA**

**PRESENTADO POR:
WILLY RIVEROS YAURI**

**PROMOCIÓN
2006-I**

**LIMA-PERU
2011**

**FRENADO DINÁMICO PARA WINCHE DE IZAJE DE
MINERAL**

Dedico este trabajo principalmente a mis padres Dionisio Riveros Valencia y Eugenia Yauri de Riveros, a mis hermanos: Yovana, Juan, Josh, Michel, José, Javier, Vladimir, Edwin, Rigoberto, Rolando y Ponciano, por todo el apoyo que me brindaron para convertirme en profesional y sé que no habrá manera de agradecerles su invaluable presencia y aliento.

De manera especial al Ing. Raúl Barrientos Urbina, por sus enseñanzas, confianza y darme la oportunidad de ser profesional en la industria minera.

Finalmente mi agradecimiento al Ing. Luis Rojas Miranda, por aportar información al presente informe.

SUMARIO

El presente trabajo contiene 7 capítulos los cuales serán detallados de la siguiente manera:

El capítulo I, muestra los antecedentes del trabajo a realizar, desde un inicio hasta los cambios finales realizados.

El capítulo II, muestra las partes de un sistema de izaje de mineral y personal, que comúnmente se emplea en el Perú es un sistema tradicional de extracción de mineral y transporte de personas.

El capítulo III, explica sobre las máquinas asíncronas, sus características y funcionamiento y se tratará sobre el motor de rotor bobinado que es el caso de estudio y su uso en la industria minera.

El capítulo IV, tratan los detalles técnicos del sistema de izaje que comprende el análisis presentado.

El capítulo V, establece los cálculos mecánicos a realizar, como la cinemática y la dinámica de la extracción, se explica brevemente la parte teórica y los cálculos para hallar las fuerzas y momentos aplicados al sistema de extracción.

El capítulo VI, determina los cálculos eléctricos, se realiza el análisis de la máquina eléctrica; como la solución del circuito equivalente del motor de rotor bobinado y finalmente se elige la corriente de inyección en el estator para realizar el frenado.

El Capítulo VII expone los aspectos económicos del proyecto. Finalmente se presentan las conclusiones.

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| PRÓLOGO | 1 |
| CAPÍTULO I | |
| ANTECEDENTES | 2 |
| 1.1 Objetivo | 2 |
| 1.2 Alcances | 2 |
| 1.3 Situación inicial | 2 |
| 1.4 Situación final | 3 |
| CAPÍTULO II | |
| GENERALIDADES DE LOS SISTEMAS DE IZAJE | 4 |
| 2.1 Clasificación de las instalaciones de extracción | 4 |
| 2.2 Equipos principales que conforman el sistema de izaje..... | 5 |
| 2.2.1 Parte mecánica | 5 |
| 2.2.2 Parte eléctrica | 16 |
| CAPÍTULO III | |
| MÁQUINAS ELÉCTRICAS | 22 |
| 3.1 Introducción | 22 |
| 3.2 Clasificación general de las máquinas eléctricas..... | 22 |
| 3.3 Máquinas asíncronas | 23 |
| 3.3.1 Introducción | 23 |
| 3.3.2 Aspectos constructivos..... | 24 |
| 3.3.3 Principio de funcionamiento | 24 |
| 3.3.4 Circuito equivalente del motor asíncrono..... | 26 |
| 3.3.5 Circuito equivalente aproximado con ajuste de tensión | 32 |
| 3.3.6 Ensayo de motor asíncrono..... | 33 |
| 3.3.7 Balance de potencias | 35 |
| 3.3.8 Motor de rotor bobinado | 37 |
| CAPÍTULO IV | |
| DETALLES DE WINCHE DE IZAJE A ANALIZAR | 44 |
| 4.1 Parte mina..... | 44 |
| 4.2 Parte eléctrica | 45 |
| 4.3 Parte mecánica | 47 |

CAPÍTULO V**CÁLCULOS MECÁNICOS** 48

5.1 Cinemática de la extracción 49

5.1.1 Diagrama de velocidad..... 49

5.1.2 Dinámica de la extracción 50

CAPÍTULO VI**CÁLCULOS ELÉCTRICOS**..... 70

6.1 Cálculo del circuito equivalente del motor de rotor bobinado..... 70

6.1.1 Medición de resistencias del estator..... 70

6.1.2 Prueba de relación 71

6.1.3 Prueba de vacío 71

6.1.4 Motor a rotor parado y con anillos abiertos..... 72

6.2 Frenado dinámico 79

6.2.1 Flujo magnético del estator 81

6.2.2 Fuerza electromotriz y corriente del motor 82

6.2.3 Características mecánicas del motor..... 83

6.2.4 Esquemas y cálculos del circuito de excitación 84

6.2.5 Cálculo de las características mecánicas 85

6.2.6 Cálculo de los circuitos de frenado dinámico..... 89

6.2.7 Cálculo para el caso de estudio 90

CAPÍTULO VII**COSTOS Y PRESUPUESTOS** 93

7.1 Introducción 93

7.2 Antecedentes 93

7.3 Solución propuesta 93

7.4 Alternativas consideradas 93

7.5 Justificación económica 94

7.6 Aspectos económicos 94

CONCLUSIONES 95**ANEXO A GLOSARIO DE TÉRMINOS MINEROS**..... 98**ANEXO B INFORME TÉCNICO PRUEBAS ELÉCTRICAS DE MOTOR 400 HP** 100**ANEXO C PLANOS RELACIONADOS**..... 106**BIBLIOGRAFÍA**..... 110

PRÓLOGO

El presente informe da a conocer la mejora en la seguridad en minería subterránea que usan motores asíncronos para el transporte de mineral, materiales y personal.

Esta seguridad buscada se guía del Reglamento de Seguridad e Higiene Minera, el cual exige que las operaciones de transporte de personal, principalmente se hagan con ciertos criterios, como por ejemplo la velocidad. Por eso se implementó el frenado dinámico en la mina Argentum S.A., que está ubicada en el distrito de Morococha, provincia de Yauli y departamento de Junín.

Este tema de velocidad es regulada por medio del frenado dinámico (inyección de corriente continua en el estator). En este informe se realizan los cálculos desde la asignación de aceleración y velocidad hasta encontrar la corriente continua de inyección a ser aplicada al motor y que en la práctica se da.

Agradezco al Ing. Raúl Barrientos Urbina, por el apoyo en la realización de este informe y por la oportunidad de ser parte de este proyecto que se dio el año 2009 y que actualmente está en funcionamiento. También agradezco al Ing. Luis Rojas Miranda, por el apoyo bibliográfico.

CAPÍTULO I ANTECEDENTES

En este capítulo se presenta el objetivo, alcances, la situación inicial y la situación final del sistema de frenado dinámico para winche de izaje de mineral

1.1 Objetivo

En operaciones en mina la seguridad es un factor base para que toda la operación tenga resultados positivos. Los departamentos de seguridad de las unidades mineras tienen como meta cumplir las disposiciones relacionadas a seguridad dictadas por el Ministerio de Energía y Minas así como también por parte de OSINERGMIN.

Estas entidades contribuyen a dictar normas y/o reglamentos que salvaguarden la integridad física del personal y los equipos.

El objetivo del presente informe es de asegurar el cumplimiento de las normas emitidas por el Ministerio de Energía y Minas, normas como Reglamento de Seguridad e Higiene Minera (DECRETO SUPREMO N° 046-2001-EM) que se indica líneas abajo en el tema que aborda este informe.

1.2 Alcances

El presente informe consta de seis capítulos en que se detalla lo referente a la extracción en mina, se identifica cada equipo y/o maquinaria que sirve en el proceso de extracción, se describe la parte mecánica y eléctrica relevante que conforma la máquina de extracción, se describe las propiedades del motor asíncrono y su subdivisión en motor de rotor bobinado, se estudia la cinemática y dinámica de la máquina de extracción, el frenado dinámico y se comprueba matemáticamente los resultados de la instalación del frenado dinámico en el winche de izaje denominado Manuelita.

1.3 Situación inicial

Se analiza, a manera de experiencia exitosa, la implementación del frenado dinámico al winche de izaje de la mina Manuelita. Esta pertenece a la Compañía Minera Argentum S.A., la cual está ubicada en el distrito de Morococha, provincia de la Yauli, departamento de Junín y que se encuentra a 147km de la ciudad de Lima a una altitud de 4476 msnm.

La extracción de minerales, personal y materiales, se realiza por medio de un winche de izaje, que comprende doble tambor en balancín, motor eléctrico, subestación de 4.16/2.3kV, jaula-skip y otros que permiten la extracción e ingreso a mina.

El ingreso y extracción de personal en mina se realizaba de manera normal, pero había un defecto que se tenía que corregir, este era que al momento de ingresar al personal a mina, la jaula-skip que era usada para el traslado, experimentaba un frenado brusco.

Además, en la estación donde se encontraba el operador del equipo (winchero), al momento de aplicar el freno mecánico, por la alta inercia y velocidad, las zapatas del freno se calentaban, resultando un riesgo para este tipo de operaciones.

1.4 Situación final

El Reglamento de Seguridad e Higiene Minera exige ciertas condiciones para brindar la seguridad al operar un winche de izaje, específicamente controlar la velocidad de transporte de las jaulas-skip. Bajo esta base se puede implementar mecanismos que garanticen la seguridad. Una de las implementaciones en seguridad es controlar la velocidad por medio de la implementación del frenado dinámico. La implementación del frenado dinámico permite una parada más suave y no sobre exige al freno mecánico. Actualmente está en funcionamiento el frenado dinámico instalado al winche de izaje de mineral.

CAPÍTULO II GENERALIDADES DE LOS SISTEMAS DE IZAJE

Los sistemas de izaje permiten el contacto e intercambio de equipos, herramientas, personal y materiales entre un nivel superior y otro inferior. Para ello utilizando equipos eléctricos y mecánicos dentro de un área de trabajos mineros.

La Figura 2.1 muestra una máquina de elevación con un tambor cilíndrico. En ello se destaca: (1) tambor de la bobina, (2) frenos, (3) la reducción de engranajes, (4) motores eléctricos (5), consola de control.

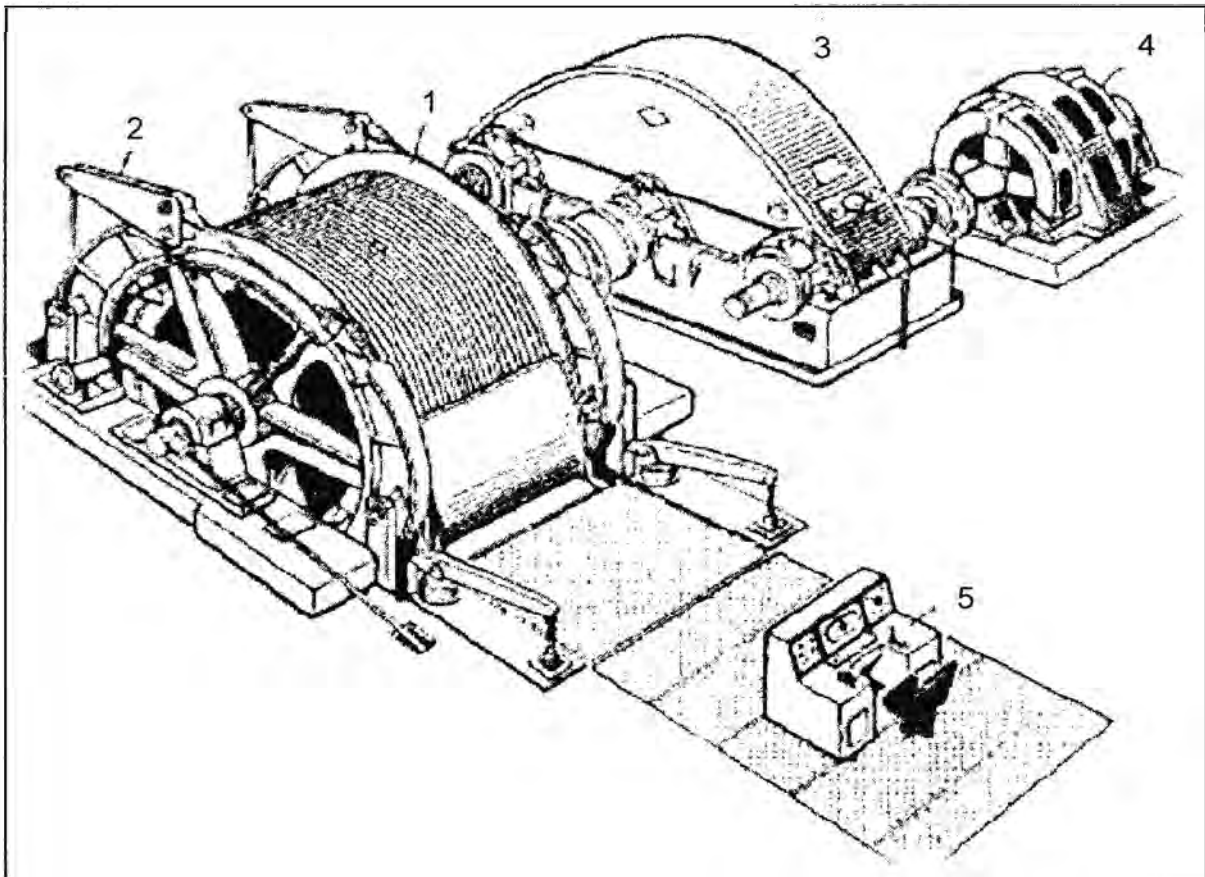


Figura 2.1 Máquina de elevación con un tambor cilíndrico

En el presente capítulo se desarrollan los siguientes aspectos:

- Clasificación de las instalaciones de extracción
- Equipos principales que conforman el sistema de izaje

2.1 Clasificación de las instalaciones de extracción

Las instalaciones de extracción se clasifican:

- **Por el ángulo de inclinación del pozo**, en instalaciones verticales e inclinadas.

- **Por el tipo de recipiente de extracción**, en instalaciones con tachos, con jaulas no volcadoras y volcadoras, con skips y con recipientes combinados (skips y jaulas).
- **Por el tipo del órgano de arrollamiento**, en instalaciones con radio de arrollamiento constante (de un tambor cilíndrico, de dos tambores cilíndricos, de polea de fricción por sistema Koepe), e instalaciones con radio de arrollamiento variable (de tambores cónicos, de tambores bicilindroconicos, de bobinas).
- **Por el tipo de accionamiento**, en instalaciones eléctricas (con motor trifásico, con motor de corriente continua según sistema Leonard) y con máquina de vapor.
- **Por método de igualación**, en sistemas no equilibrados (de tambores cilíndricos sin cable inferior); de sistemas equilibrados (de tambores cilíndricos sin cable inferior).

2.2 Equipos principales que conforman el sistema de izaje

La descripción se realiza para

- La parte mecánica
- La parte eléctrica

2.2.1 Parte mecánica

Consta de los siguientes elementos: recipientes de extracción, guiado, cables de extracción, frenos, reductores de velocidad, dispositivos de control y seguridad, tambor, eje de tamboras, chumaceras y pique.

a. Recipientes de extracción

Por lo general, la extracción del material útil se realiza en skips de carga y descarga automáticas, mientras que la circulación del personal y las operaciones auxiliares se aseguran mediante las instalaciones con jaulas y también se puede encontrar una combinación de las anteriores denominada skip- jaula. Se describirá a continuación brevemente:

a.1 Skips

Actualmente es costumbre armar los pozos de gran producción con skips. Los skips se dividen:

- Según el tipo del pozo, en: skips para pozos verticales y skips para pozos inclinados.
- Según su descarga, en: skips volcadores y skips con descarga en el fondo.
- El peso de los skips, aproximadamente es igual al peso de la carga útil, mientras que con extracción por jaulas la carga útil constituye como de 1/3 del peso de la jaula cargada. Por esto, en extracción por skips disminuyen la potencia del motor, el consumo de energía y el costo de la parte mecánica de la instalación.

Skips para pozos verticales

El skip volcador para pozos verticales (Figura 2.2) se utiliza sobre todo en minería metálica. Consta de un recipiente rectangular 1 sin tapa, marco 2, aparato de

suspensión 3 fijo sobre el marco por el eje 4. A los angulares del marco, del lado exterior se fijan los zapatos que durante el movimiento del skip se deslizan sobre las guíaderas.

El recipiente gira sobre el eje 5 desplazados con respecto al centro de gravedad. Su segundo punto de apoyo es el eje inferior 6 del marco. Al llegar a las guías de descarga, los rodillos 7 del recipiente entra en la curvas, lo desvían y al final vuelcan. Con movimiento inverso el skip vuelve a su posición inicial.

El ángulo del vuelco del recipiente es comúnmente 135° . Dos topes triangulares 8 en la parte superior del recipiente preservan el skip de su volteo completo durante el ascenso excesivo. Para prevenir el vuelco accidental del recipiente del skip durante su movimiento en el pozo, se colocan dos cerrojos automáticos 9 con rodillos 10 que unen el recipiente con el marco. Un momento antes de entrar los rodillos 7 en las curvas de descarga, los cerrojos se levantan automáticamente, ya que sus rodillos encuentran unas rampas presoras instaladas sobre el castillete, y el recipiente del skip se libera para su vuelco.

Las paredes del recipiente del skip se hacen de chapa de acero de 6 a 12mm de espesor, y para el piso, de acero de 2 a 4mm más de acero. Frecuentemente la pared trasera del skip se hace doble.

Las dimensiones interiores del recipiente del skip dependen de la sección del pozo, del tamaño de los trozos del mineral, de la humedad, de la presencia de arcilla, etc.

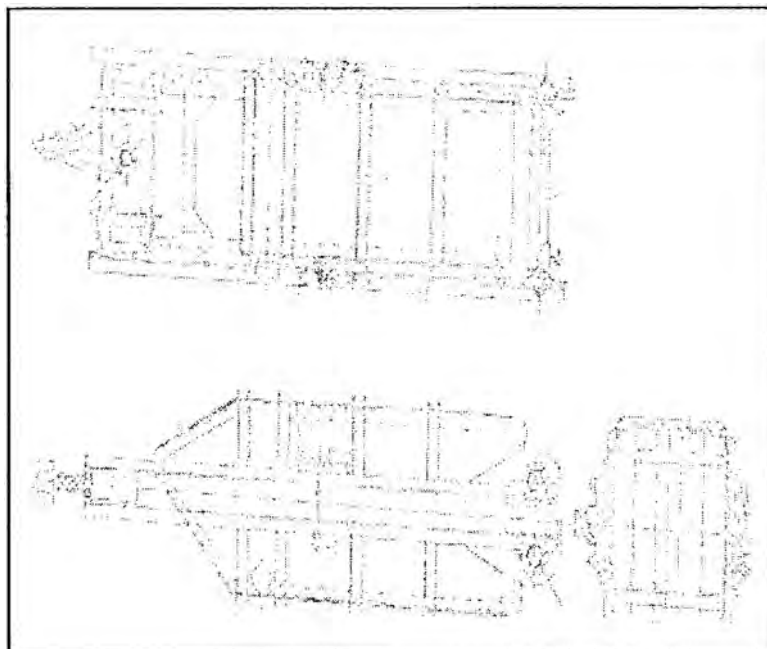


Figura 2.2 Skip Vertical

Skips para pozos inclinados

Los skips para pozos inclinados (Figura 2.3) se caracterizan por la gran variedad de sus construcciones, ya que sobre su contracción influyen no solo los métodos de descarga y tamaño, sino también el ángulo de inclinación del pozo (20° - 70°).

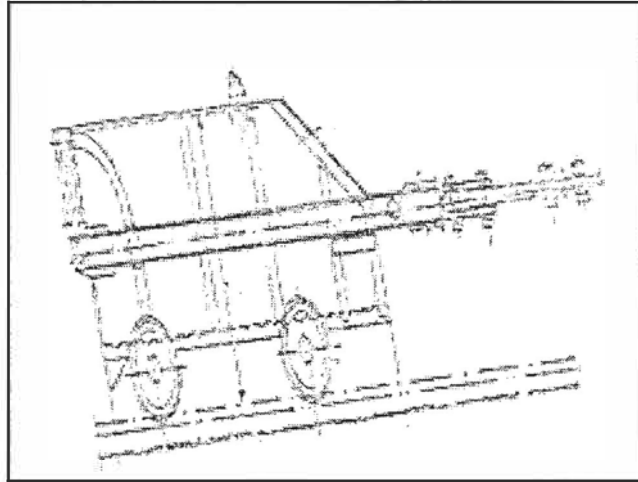


Figura 2.3 Skip Inclinado

a.2 Skips-jaulas para pozos verticales

Los recipientes combinados (Figura 2.4) son para casos en que una instalación se utiliza para la extracción de la carga y para todas las operaciones auxiliares.

Los inconvenientes de la extracción por recipientes combinados:

- Mayor peso muerto.
- Mayor altura del castillete.

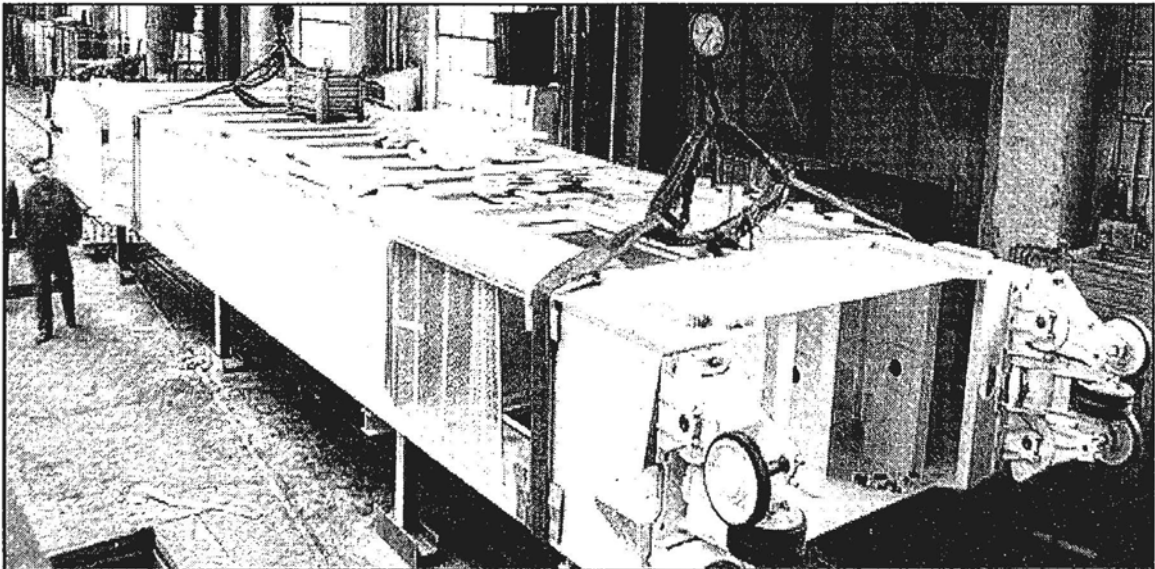


Figura 2.4 Jaula - Skip

a.3 Jaulas

Actualmente la instalación de extracción por jaulas se utiliza como auxiliar para circulación de personal, subida y bajada de roca y de materiales. La jaula (Figura 2.5) se encuentra como recipiente de extracción básico en minas poco profundas de pequeña producción, provistas de una sola instalación y en minas viejas.

Las jaulas se dividen en jaulas de uno, dos y varios pisos. Según el número de vagonetas por piso, las jaulas se construyen para una o dos vagonetas, dispuestas con largos costados paralelos, o a continuación una tras otra.

Se podría afirmar que el peso de la jaula puede determinarse aproximadamente por su carga útil.

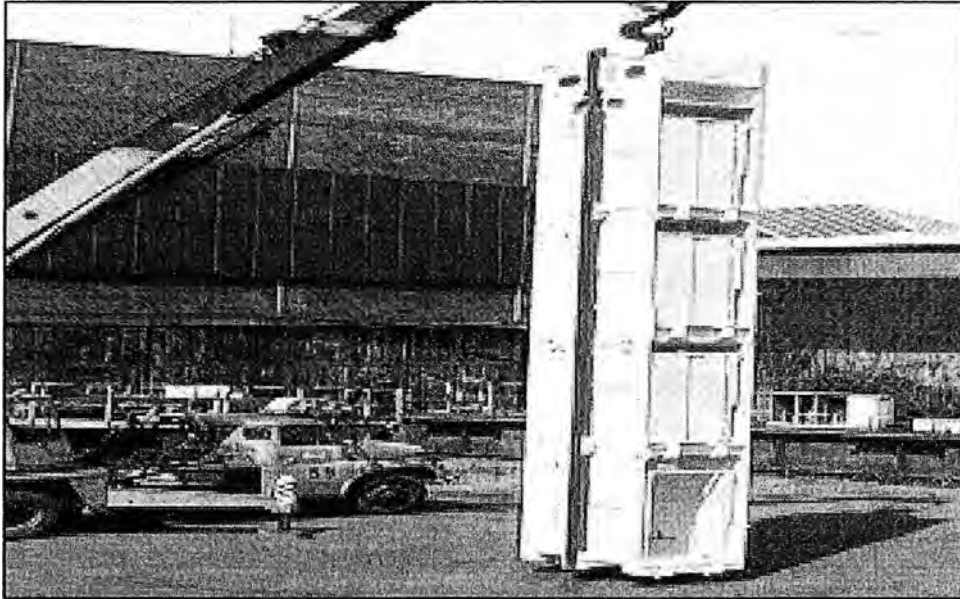


Figura 2.5 Jaula

b. Guiado

La sección de pozos se divide por divisores en los compartimientos: de extracción, de escalas y para tuberías y cables. Las jaulas y los skips en su movimiento están guiados por los dispositivos apropiados – guiaderas (Figura 2.6), fijas sobre los divisores. Según el material utilizado, el guiado de los pozos puede ser:

- Rígido – en madera, metálico o mixto;
- Flexible – por cables.

Las guiaderas de madera se hacen sobre todo de roble o de pino; las maderas exóticas – azobe y pino-tea americano de introducción reciente, más resistentes al desgaste por frotamiento, son más y más utilizadas.

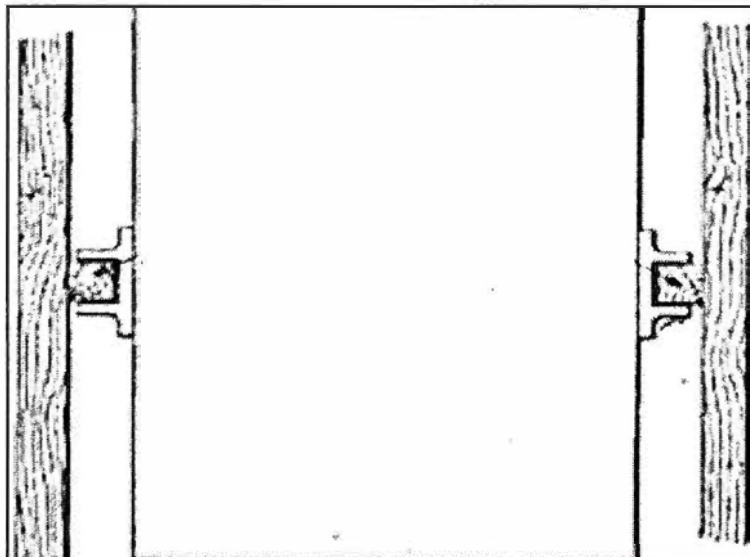


Figura 2.6 Guía de Skip

c. Cables de extracción

Actualmente para la extracción se utilizan casi exclusivamente cables de acero. En algunos lugares de Francia y Bélgica todavía existen algunas instalaciones de extracción con bobinas y cables orgánicos fabricados de cáñamo. Los cables de cáñamo (aloe) de igual resistencia a la ruptura con los cables metálicos, tienen peso mayor y sección mucho mayor.

Los cables de extracción se construyen de alambre de acero Martín o eléctrico, cuyo diámetro varía de 2 a 3.5mm. Su límite de resistencia oscila entre 160 y 220 kg/mm².

Los cables de acero tienen como finalidad conectar el balde de extracción a la polea de izaje. La selección se realiza considerando principalmente aspectos de seguridad, duración y costos.

Antes de que un cable de acero sea seleccionado, es necesario tener un conocimiento completo de las condiciones de operación y un claro entendimiento de las características y propiedades del cable, los cuales se definen a continuación.

c.1 Partes del cable de acero

Un cable de acero está compuesto de las siguientes partes:

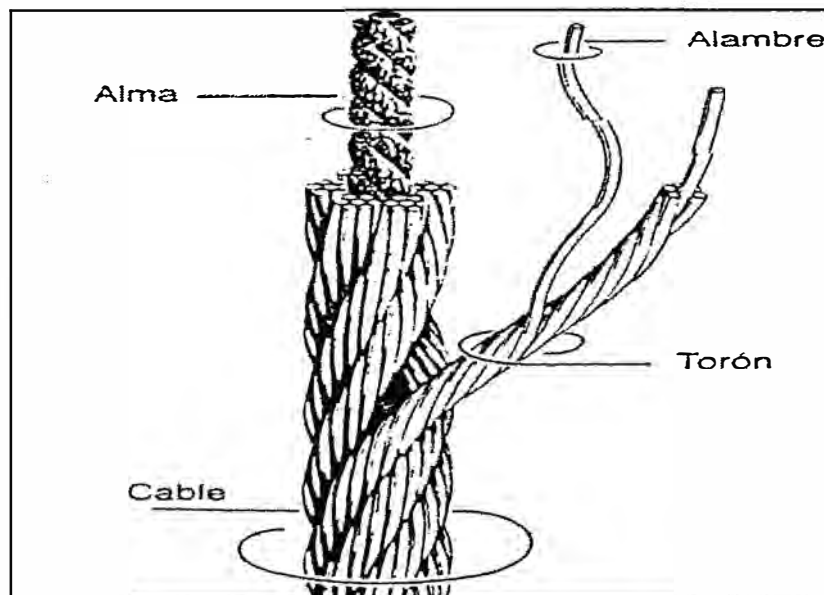


Figura 2.7 Cable de Acero

Núcleo o alma

Sirve como apoyo de los torones soportando a ellos en su posición y previniendo el choque o aplastamiento entre ellos. Es el eje del cable, alrededor del cual se trenzan los torones. Los núcleos pueden ser:

- Núcleo de fibra (manila, algodón o materiales sintéticos), los cuales le dan elasticidad al cable.
- Núcleos de cable de acero independiente, el cual incrementa la resistencia a la rotura en 7 ½% y deben ser usados cuando el valor es intenso.

- Núcleo de torón de alambre, consiste de un torón simple donde un alambre es usado como eje.

Torones y alambres

Un torón es un grupo de alambres y el número de torones en un cable varían desde 3 hasta 18, según su aplicación. El número de alambres en un torón puede variar desde 5 a 46 ó más. Cuando el número de alambres se incrementa, el tamaño del alambre individual disminuye, volviéndose más flexible pero disminuyendo su punto de rotura.

c.2 Propiedades de los cables de acero

Las principales propiedades a considerar son:

- **Resistencia**, la medida de la resistencia de un cable es la llamada resistencia a la rotura. Esta es equivalente a la fuerza externa que aplicada al cable a lo largo de su línea central provoca la falla del mismo. Esta fuerza es expresada en libras o toneladas. La falla puede ocurrir con un esfuerzo tensional menor que el esfuerzo de rotura, es por eso que se hace necesario tener un adecuado factor de seguridad.
- **Flexibilidad y dobladura**, la flexibilidad depende principalmente de su construcción y el límite de su capacidad, es el aplicada al ponerse a doblarse sobre pequeñas poleas. La flexibilidad se incrementa cuando aumenta el número de alambres y torones. El esfuerzo de dobladura es una combinación de esfuerzos de tensión, compresión y corte. Cuando se incrementa la dobladura, los movimientos de alambres y torones son incrementados principalmente en la capas exteriores. Si este doblaje es mayor que el permitido se dañara permanentemente. El doblaje provoca el efecto llamado fatiga, el cual puede ser reconocido por la rotura de algunos alambres del torón.
- **Abrasión**, la resistencia a la abrasión es la capacidad de un cable de oponerse al desgaste cuando opera sobre poleas o tambores. La abrasión es la perdida de metal por el acombamiento del lado exterior de los alambres.
- **Corrosión**, es otra de las causas que provocan que el cable falle y esto es debido al agua acida que en las minas suelen encontrarse. Cuando el cable empieza a corroerse, pierde sección y si esta avanza el cable pierde resistencia a la abrasión, flexibilidad y elasticidad. Cuando se trabaja bajo estas condiciones, es necesario proteger el cable con un lubricante adecuado. Los cables de acero galvanizado son de gran resistencia a la corrosión y superan ampliamente a los de acero al carbono.
- **Aplastamiento y distorsión**, la resistencia al aplastamiento es la capacidad del cable de oponerse al estampamiento y aplanamiento. La resistencia a distorsionarse es la capacidad del cable de prevenir la formación de cocas.
- **Calor**, una temperatura cercana a los 400° F ejerce poco efecto sobre cables de núcleo de acero. Pero un cable de núcleo de fibra a 210 ° F pierde propiedades ya que el núcleo

se vuelve quebradizo. Cuando los cables son sometidos a temperaturas altas por periodos cortos de tiempo, tienden a deformarse.

- **Estiramiento y elasticidad**, el acero es elástico hasta cierto punto. Cuando la carga se aplica el acero se alarga ligeramente y recupera su longitud original al quitarse esta. El lado límite elástico es aproximadamente el 67 % del esfuerzo de rotura. Si se aplica una tensión mayor el acero queda permanentemente alargado y no recobra su longitud.

- **Límite de fatiga**, un número de pruebas han demostrado que hay otro límite, menor que el límite elástico, el cual es más importante para la vida de un cable de acero. Este límite es aproximadamente el 50 % del esfuerzo de rotura y es conocido como límite de fatiga. Las pruebas demostraron que si un cable es tirado fuertemente, repetidas veces hasta llegar al límite de fatiga, su vida será comparativamente menor y finalmente se romperá, esto aun sin haber llegado al límite elástico o al esfuerzo de rotura (Figura 2.8).

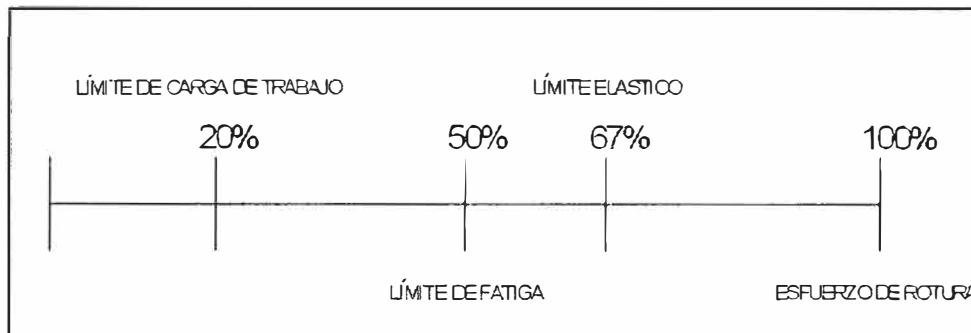


Figura 2.8 Límite de Fatiga de un Cable de acero

- **Fatiga por vibración**, la vibración disminuye la vida de un cable apreciablemente. En el cable de izaje, se produce una concentración de esfuerzos, debido al impacto y vibración producido después de ser cargado el balde o skip con mineral. No se ha descubierto el método que prevenga esta vibración, por eso un apropiado factor de seguridad debe ser seleccionado.

- **Factor de seguridad del cable**, el factor de seguridad de un cable (F.S.) es la relación entre la resistencia de un cable y su esfuerzo de operación. El esfuerzo de operación es el resultado de varios esfuerzos individuales al cual es sometido el cable cuando está trabajando y estos son el de flexión, fricción, aceleración de la carga, desaceleración de la carga y la carga transportada. Es difícil el establecer un F.S. apropiado, debido a que depende de variadas condiciones de operación, si es para transportar mineral o para transportar personal. Cuando una gran longitud del cable es empleado, es posible usar menores valores para el F.S., debido a que un cable largo tiene la habilidad de absorber los esfuerzos de impacto y aceleración a un grado mayor.

d. Frenos

Todas las máquinas de extracción deben estar provistas de frenos (Figura 2.9), que participan en el proceso de conducción de la máquina y detienen el sistema de extracción

durante el estado de reposo (frenado de servicio), además inmoviliza la máquina en caso de averías (frenado de protección). El uso del frenado mediante motor es general para el frenado de fin de cordada y para la bajada de las cargas. La energía de frenado, para tramos con par motor negativo, en las instalaciones de corriente continua, se recupera y se devuelve a la red (frenado de recuperación); mientras que en el sistema trifásico, ésta se pierde en las resistencias (frenado reostático).

Los frenos de protección deben ser obligatoriamente de zapatas. Para el frenado de protección, el uso de pesos es obligatorio; su accionamiento debe ser automático y por operador. La caída de los pesos debe acompañarse con la desconexión automática de la energía de alimentación del motor de extracción.

El servomotor del freno de servicio es accionado más frecuentemente por aire comprimido o mediante aceite. Variando por medio de un regulador su presión, se obtiene el frenado regulable, obligatorio.

Las zapatas de los frenos se preparan de madera blanda (sauce, álamo), de una masa comprimida especial o de cinta de cobre – asbesto (ferrodo). El coeficiente de rozamiento entre el forro y la llanta se adopta igual $\mu = 0.3 - 0.4$. Según el carácter del desplazamiento de las zapatas de freno en las máquinas de extracción, se diferencian dos tipos: frenos de zapatos oscilantes y frenos de zapatas envolventes.

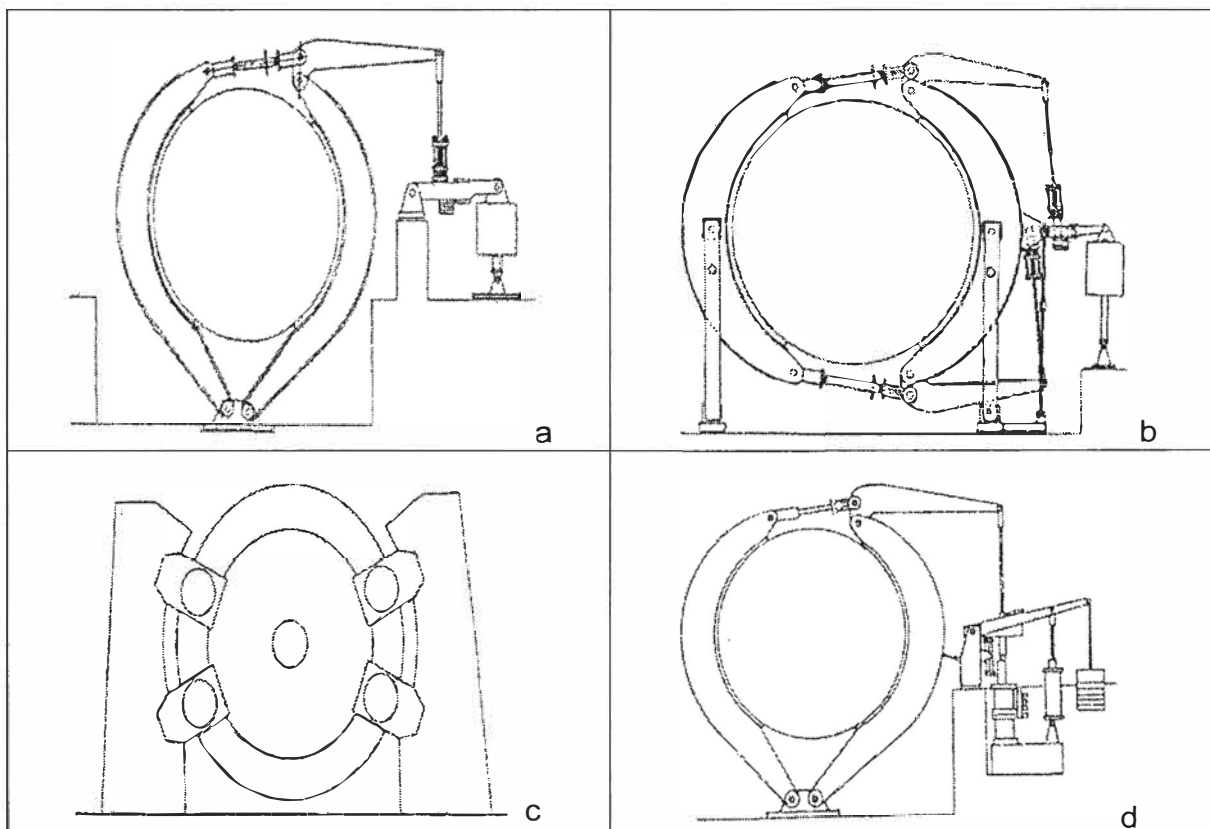


Figura 2.9 Frenos: a) de quijada-hidráulico, b) paralelo neumático, c) de disco, d) de quijada neumático

e. Reductores de velocidad

Los sistemas de izaje son movidos por motores eléctricos de corriente continua o alterna. Dependiendo de su velocidad, estos motores pueden ser conectados al eje de la tambora, directamente o a través de un reductor de velocidad de engranajes (Figura 2.10).

El diseño y selección de un reductor toma las siguientes consideraciones:

- Tamaño, tipo, velocidad, ubicación y número de motores.
- Tamaño, tipo, velocidad, torque requerido y ubicación del sistema de izaje.
- Tipo y ciclo de operación.
- Restricciones físicas.

Los reductores de engranajes pueden ser de simple o doble reducción. El motor de accionamiento más económico, determina la relación de reducción. El primer paso a seguir para asegurarla confiabilidad del sistema, es realizar un apropiado alineamiento durante la instalación seguida de una conveniente lubricación e inspección durante su operación.

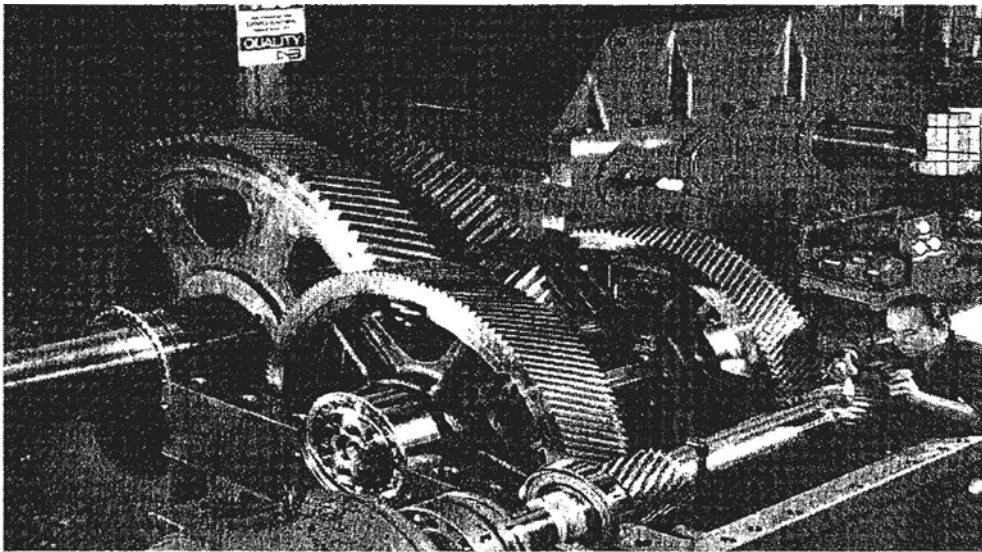


Figura 2.10 Reductor de Velocidad

f. Dispositivos de control y seguridad

Los sistemas de control son utilizados para monitorear la velocidad y localizar el skip o jaula cuando se está moviéndose en el pique. Cuando un skip o jaula excede una velocidad y distancia prefijada, el sistema de control inicia la acción para prevenir el movimiento del skip o jaula.

En adición a estos controles, se tienen los equipos de parada por alta temperatura de operación, exceso de desgaste de los frenos, resbalamiento del cable, pérdida de potencia, etc. También pueden considerarse como sistemas de control las campanas de señalización. Los sistemas de control pueden ser seleccionados para operar de diferentes maneras: manualmente, semiautomáticamente y automáticamente. Siendo los

sistemas de control para una polea de fricción más completa que para una tradicional.

Todos los sistemas de izaje deberán de ser protegidos con sistemas de seguridad contra la sobre velocidad, con limitadores de baja profundidad y de altura. El dispositivo de protección de velocidad produce una parada de emergencia si es que el skip o jaula viaja a una velocidad mayor que la permisible. La velocidad permisible depende de la posición del skip o jaula en el pique. Obviamente la velocidad deberá ser menor en las zonas finales que en la porción central. El más común control de sobre velocidad es el Lilly Control (Figura 2.11). Es casi exclusivamente utilizado en sistemas de izaje y extensamente en las poleas de fricción.

Los limitadores de baja profundidad y de altura son interruptores de van en los límites inferior y superior del recorrido que realiza el winchero (persona que maneja el equipo de izaje) en el pique. Estos interruptores son operados por dispositivos mecánicos que van instalados en el skip o jaula. Guías estructurales también son colocados en los extremos y dan una protección adicional si el winchero sobrepasa estos límites.

Adicionalmente para prevenir que el skip o jaula caiga al fondo del pique en el caso que el cable se rompa, se utilizan un sistema llamado "leonas", que son mecanismos sencillos, que acuñan el skip o jaula en las guías del pique.

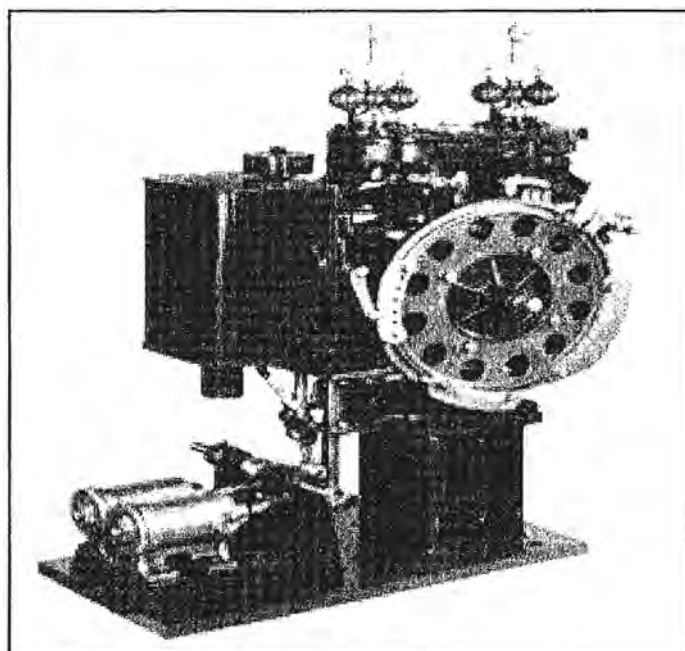


Figura 2.11 Lilly Control.

g. Tambor

Son aquellos en los que el cable se enrolla sobre su superficie durante el proceso de izaje. Se distingue 2 variedades: desbalanceados y balanceados

g.1 Desbalanceados

Es el sistema más simple de izaje, constituido por un solo tambor. Se le emplea generalmente para profundización y/o para producción en minas pequeñas para izar o

bajar materiales y personal.

g.2 Balanceados

Son los más recomendados en las minas que cuentan con varios niveles en operación, debido a la gran flexibilidad que otorga este sistema al adaptarse a diferentes condiciones de trabajo. Este sistema permite trabajar con dos jaulas skip en dos compartimientos interconectados (balanceados), es decir, en un compartimiento se carga y en el otro se descarga, produciéndose una disminución del efecto del torque en el motor eléctrico que se necesita para izar la carga "RopePull".

Por su construcción y aplicación, existen algunas variedades (Figura 2.12):

- **Tambor simple** Los cables se enrollan en un único tambor con la condición de que exista una separación entre ambos de 5 o 6 vueltas, son suficientes para atender uno o varios niveles en las versiones de jaula o skip con contrapeso, trabajando mejor cuando trabaja un solo nivel, debiendo estos contar con una sola camada de cable. No permite su uso a grandes profundidades, salvo que se aumente sus dimensiones y por lo tanto aumentará su costo.

- **Tambor doble con un solo embrague** Son usados eficientemente en winche de servicio (jaula con contrapeso), y en producción con skips balanceados, que por estar ambos interconectados y embragados se facilita la acción sobre el cable por compensación del esfuerzo de jale (ropepull). Su selección debe ser muy bien estudiada estimando si por la condición antes mencionada compensa el mayor costo que se diferencia de un winche de tambor simple dividido.

- **Tambor doble ambos embragados** Esta versión es la más versátil y eficiente cuando se trabaja desde varios niveles y por compartimientos, especialmente cuando la mina trabaja con un solo ingreso, que por su independización permite una operación continúa aunque falle uno de los compartimientos.

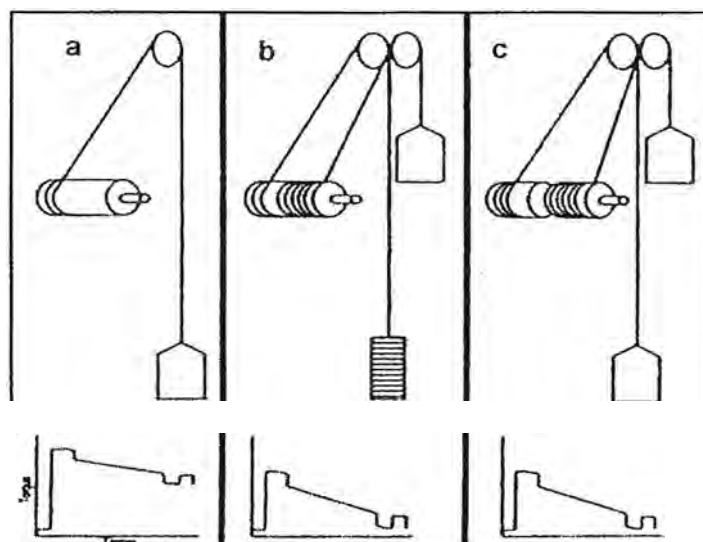


Figura 2.12 Tambor simple (a), tambor simple con contrapeso (b) y tambor doble (c).

h. Eje de tamboras

Eje que es forjado de acero común que soporta a las chumaceras.

i. Chumaceras

La chumacera es una pieza de metal con una muesca en que descansa y gira cualquier eje de maquinaria, para el caso de estudio el eje de la tambora.

j. Pique

Los piques son en su mayoría estructuras verticales que sirven de comunicación entre la mina subterránea y la superficie exterior con la finalidad de subir o bajar al personal, material, equipos y el mineral. La estructura de un Pique, puede ser de madera o de acero.



Figura 2.13 Pique

2.2.2 Parte eléctrica

Consta de los siguientes elementos: Banco de resistencias, Motor de accionamiento, Tableros de control.

a. Banco de resistencias

De acuerdo a la potencia del motor eléctrico, se dividen de la siguiente forma:

- Bancos de fierro fundido
- Bancos de acero inoxidable
- Reóstato en baño de aceite
- Reóstatos líquidos

A continuación se describe brevemente las resistencias mencionadas:

a.1 Banco de fierro fundido

Son utilizadas para potencias medianas hasta aproximadamente 500HP, los

elementos resistivos (Figura 2.14) son agrupados y montados en dos o más ejes aislados con fibra de vidrio, para soportar el alto calor disipado, estos ejes a la misma vez son sujetados en dos planchas laterales, que sirven para el montaje. Como su propio nombre lo indica el material del elemento resistivo es de fiero fundido. Las ventajas fundamentales son:

- Relativamente barato
- Soporta altas vibraciones
- Es robusto y de gran duración

Su gran desventaja es que no disipa con rapidez el calor formado en el banco de resistencias, es por eso su poco uso.

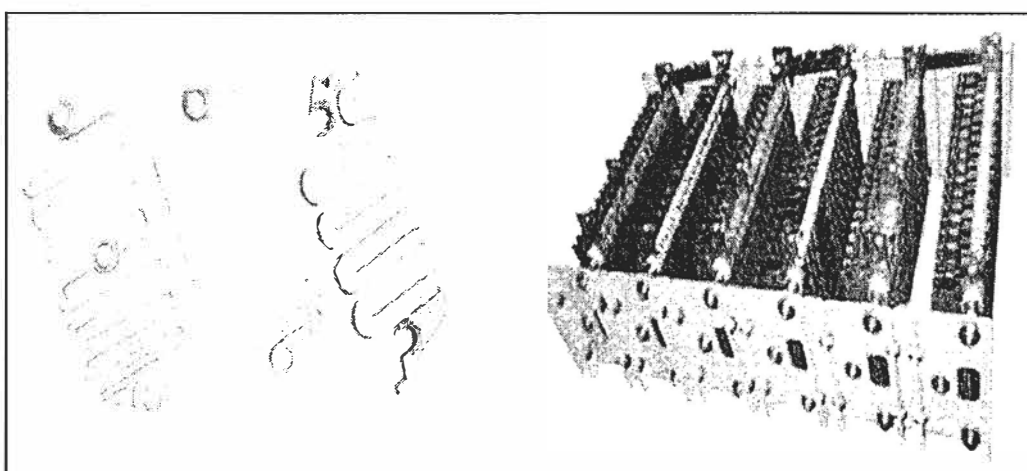


Figura 2.14 Resistencia y Banco de Resistencias de Fierro Fundido

a.2 Bancos de acero inoxidable

Su construcción y potencia es similar a los empleados en los bancos de fiero fundido, actualmente, son los bancos con mayor uso en el campo industrial, los elementos resistivos son de acero inoxidable (Figura 2.15). Sus ventajas importantes son:

- Son relativamente baratos, comparados con los de baño en aceite y reóstatos líquidos.
- Disipa el calor rápidamente
- Tiene poco peso.

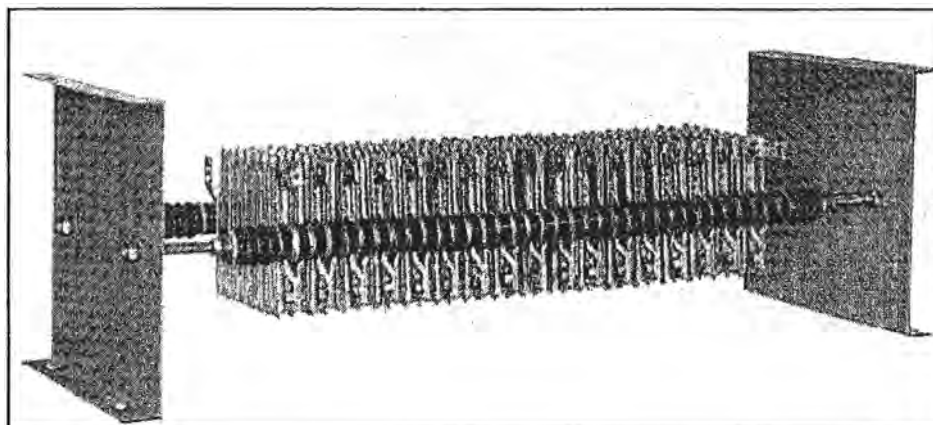


Fig.2.15 Banco de Resistencia de Acero Inoxidable

a.3 Reóstato en baño de aceite

Son equipos más sofisticados y costosos comparados con los tipos de fierro fundido y acero inoxidable, se construyen para potencias encima de los 1000 HP. Se adaptan a todo tipo de industrias que requieren equipos resistentes o manipulación pesada. El tanque es fabricado en chapa de acero y sometido a un riguroso tratamiento anticorrosivo antes de pasar para la pintura de acabado (Figura 2.16) .Estos reóstatos son totalmente estancos, a prueba de polvo de cemento, mineral u otro.

El escalonamiento de la resistencia es realizado por medio de contactores de cobre macizo, perfectamente ajustado sobre un rotor, con avances bien definidos, garantizando una perfecta variación de la resistencia.

Los elementos de la resistencia son fabricados en cinta de níquel-cromo, sobre núcleos cerámicos a prueba de choque térmico, lo que garantiza una larga duración de estos arrancadores.

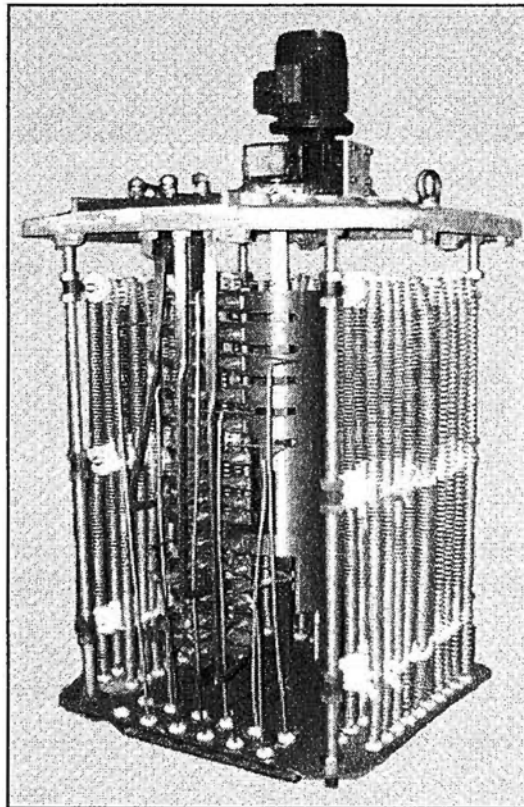


Figura 2.16 Reóstato en Baño de Aceite

a.4 Reóstato líquido

También usado para altas potencias, por encima de los 1000HP, este tipo de reóstato se compone de un conjunto de electrodos fijos que deberán unirse directamente al secundario del motor de rotor bobinado.

La disminución de la resistencia se obtiene aumentando el nivel del electrolito, introducido en el depósito superior, que viene a ser la caja de electrodos. Una motobomba centrífuga lo retira del depósito inferior, funcionando este depósito como

reservorio, y lo conduce al depósito superior, aumentando de este modo, la sección de los electrodos, inmersos en el electrolito; al llegar al nivel máximo donde se produce la resistencia mínima, una llave de nivel parará la motobomba.

Para motores sin dispositivo de corto circuito, cuando el electrolito llegue al nivel de resistencia mínima, un contactor cortocircuitará los anillos, este cortocircuito se producirá con una velocidad aproximadamente de 96% de la nominal, y el electrolito vuelve al depósito inferior. Ver Figura 2.17 y 2.18

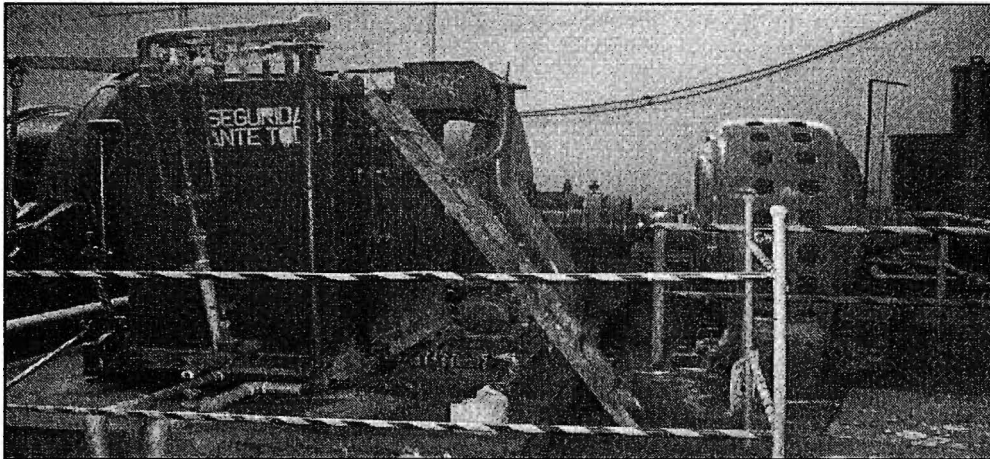


Figura 2.17 Reóstato Líquido

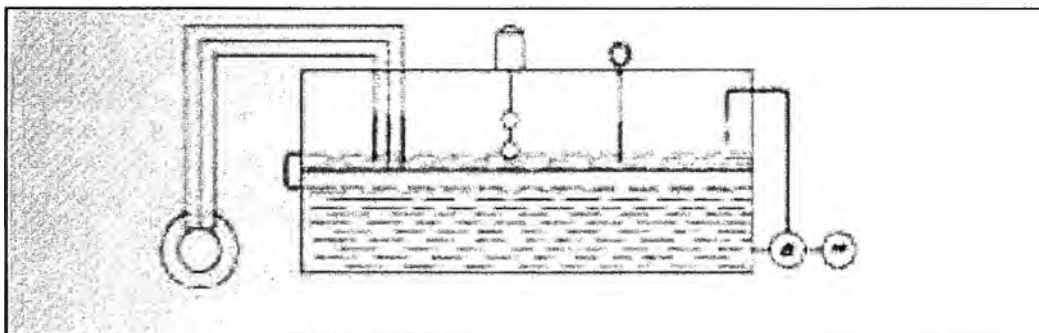


Figura 2.18 Diagrama de Reóstato Líquido

b. Motor de accionamiento

Los motores eléctricos son los de uso común para proveer de movimiento los sistemas de izaje de mineral. Los tipos de motores y sistemas eléctricos generalmente usados para los sistemas de izaje son:

- Motores de corriente alterna de inducción con rotor devanado, con resistencia de control en el secundario.
- Motor de corriente continua con potencia suministrada de un motor generador, regulable con un control en el voltaje del generador y eculización de la demanda de la potencia AC suministrada al sistema.
- Motor de corriente continua alimentada con potencia desde un motor generador síncrono ajustable, con un control de voltaje en el generador.
- Motor de corriente continua alimentado con potencia desde un banco de rectificadores

de silicón (SCR) o llamados tiristores o fuentes estáticas.

La elección de un motor eléctrico de accionamiento para el sistema de izaje depende de seleccionar entre un motor de corriente alterna (AC) y un motor de corriente continua (DC). Un motor de corriente alterna (AC) tiene la ventaja de tener menores costos iniciales y puede ser usado con la potencia de la red normalmente suministrada, sin embargo tienen un mayor torque de arranque y es difícil su automatización. Los motores AC generalmente requieren de un tren de engranajes para mover el sistema de izaje.

Los motores de corriente continua (DC) proveen de un control sensible y exacto, es fácilmente automatizado y tiene un bajo torque de arranque. El motor DC requiere de un generador para convertir la corriente alterna suministrada por la red. Tiene un alto costo inicial de operación causado por la pérdida de potencia a través de la marcha en vacío y el mantenimiento del motor-generador.

Los motores DC pueden ser conectados directamente a los sistemas de izaje, eliminándose la caja reductora de engranajes y como consecuencia ocupara menor espacio. En el presente trabajo se tratara exclusivamente del motor de corriente alterna (rotor devanado-Figura 2.19), porque es comúnmente utilizado en los sistemas de izaje.

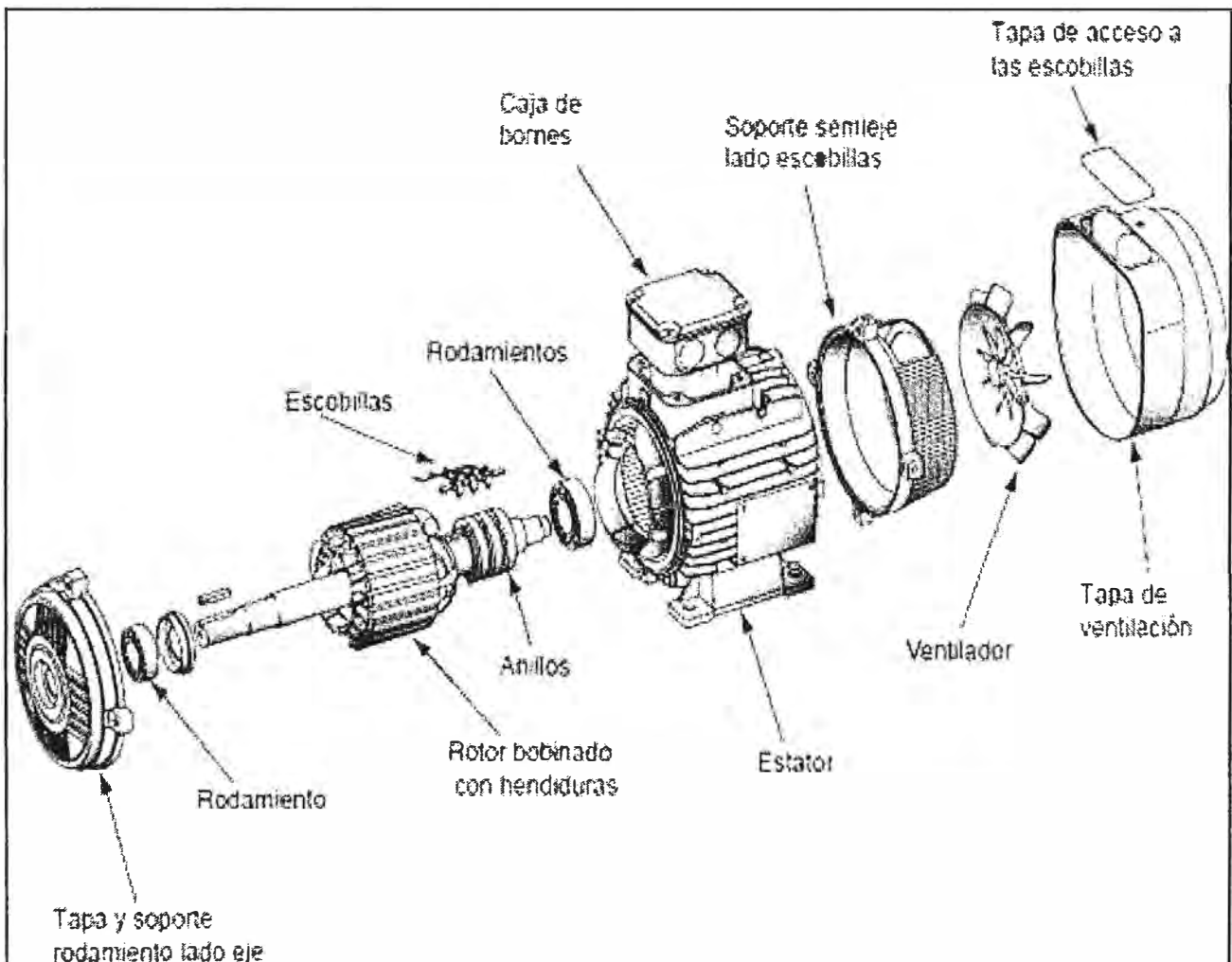


Figura 2.19 Partes de un Motor Asíncrono de Rotor Bobinado

c. Tableros de control

Este tablero constade equipos de control como seccionadores, interruptor de potencia, contactores, relés, puente de diodos, etc., que permite que se pueda controlar y proteger la instalación y su funcionamiento. Figura 2.20, 2.21 y 2.22



Figura 2.20 Tableros eléctricos

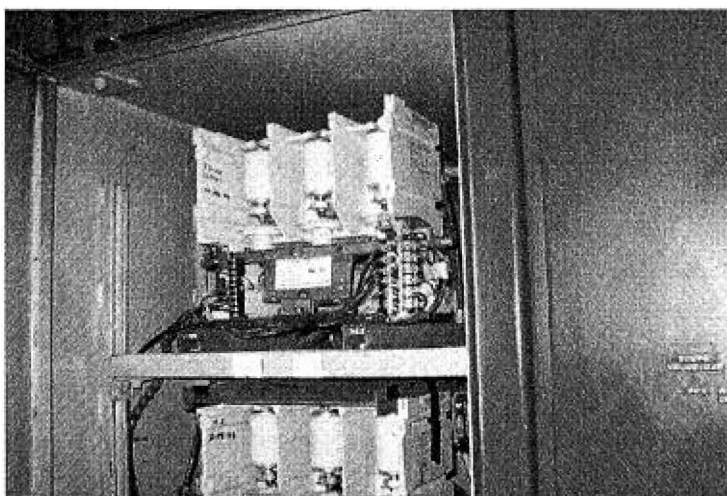


Figura 2.21 Tableros eléctricos (vista de contactor en vacío)

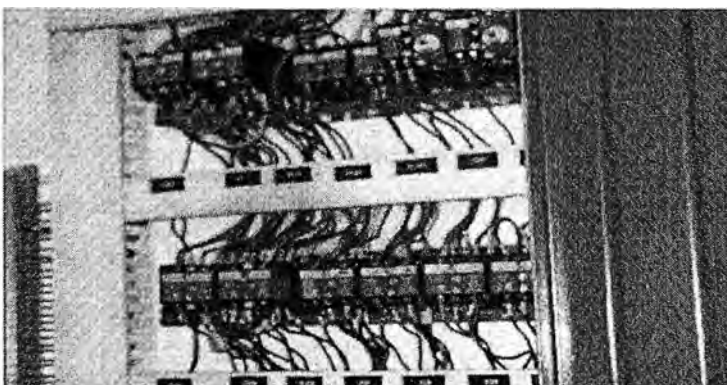


Figura 2.22 Tableros eléctricos (contactores de 120V)

CAPÍTULO III MÁQUINAS ELÉCTRICAS

En el presente capítulo se hace una introducción a las máquinas eléctricas haciendo énfasis en las máquinas asíncronas, consta de: Introducción, clasificación general de las máquinas eléctricas, máquinas asíncronas

3.1 Introducción

Las máquinas eléctricas son el resultado de una aplicación inteligente de los principios del electromagnetismo y en particular de la ley de inducción de Faraday. Las máquinas eléctricas se caracterizan por tener circuitos eléctricos y magnéticos entrelazados. En base a este punto de vista, estrictamente energético, es posible clasificarlas en tres tipos fundamentales:

- **Generador**, transforma la energía mecánica en eléctrica. La acción se desarrolla por el movimiento de una bobina en el campo magnético, resultando una f.e.m. inducida que al aplicarla a un circuito externo produce una corriente que interacciona con el campo y desarrolla una fuerza mecánica que se opone al movimiento.

En consecuencia, el generador necesita una energía mecánica de entrada para producir la energía eléctrica correspondiente.

- **Motor**, transforma la energía eléctrica en mecánica. La acción se desarrolla introduciendo una corriente en la máquina por medio de una fuente externa, que interacciona con el campo produciendo un movimiento de la máquina, aparece entonces una f.e.m. inducida que se opone a la corriente y que por ello se denomina fuerza contra electromotriz. En consecuencia, el motor necesita una energía eléctrica de entrada para producir la energía mecánica correspondiente.

- **Transformador**, transforma una energía eléctrica de entrada (de c.a.) con determinadas magnitudes de tensión y corriente en otra energía eléctrica de salida (de c.a.) con magnitudes diferentes.

3.2 Clasificación general de las máquinas eléctricas

Se han relacionado las frecuencias del inductor e inducido de una máquina eléctrica por medio del número de polos (n_p) y las r.p.m. del rotor, de acuerdo a la ecuación general: $f_2 = f_1 \pm n_p/60$, en donde f_2 es la frecuencia del campo del estator, f_1 es la frecuencia del rotor.

Los diferentes tipos de máquinas se pueden clasificar atendiendo a una serie de criterios selectivos y ordenados que tienen en cuenta la existencia de órganos móviles, el tipo de corriente aplicada al inductor y la forma de las conexiones externas. Ver Figura 3.1.

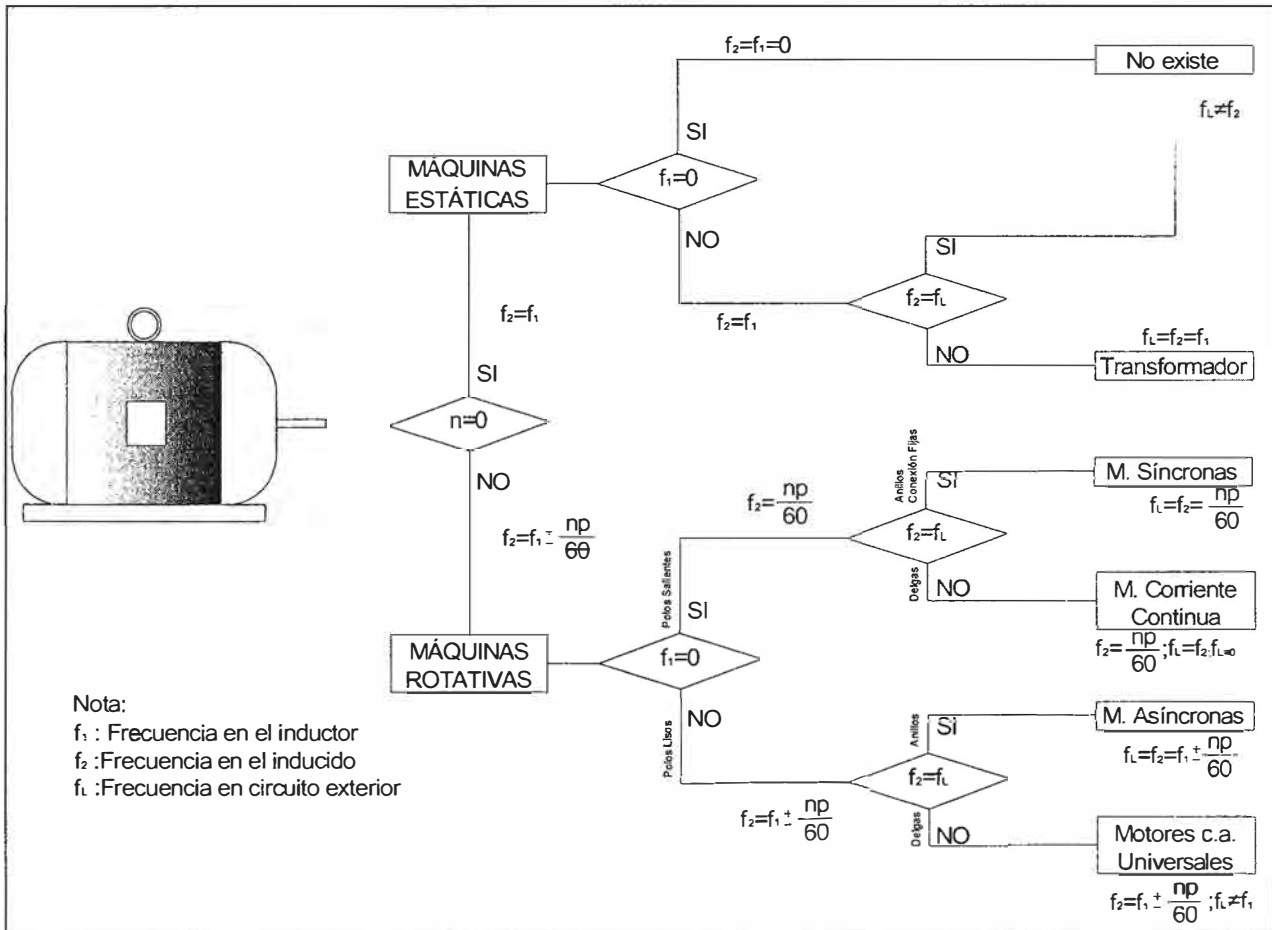


Figura 3.1 Clasificación de la máquinas eléctricas

3.3 Máquinas asíncronas

Esta sección desarrolla los siguientes ítems: aspectos constructivos, principio de funcionamiento, circuito equivalente del motor asíncrono, circuito equivalente aproximado con ajuste de tensión, ensayo de motor asíncrono, balance de potencias, motor de rotor bobinado

3.3.1 Introducción

La diferencia de la máquina asíncrona con los demás tipos de máquinas se debe a que no existe corriente conducida a uno de los arrollamientos.

La corriente que circula por uno de los devanados (generalmente el situado en el rotor) se debe a la f.e.m. inducida por la acción del flujo del otro (estator), y por esta razón se denomina máquinas de inducción.

También reciben el nombre de máquinas asíncronas debido a que la velocidad de giro del rotor no es la de sincronismo impuesta por la frecuencia de la red.

3.3.2 Aspectos constructivos

La máquina asíncrona o de inducción al igual que cualquier otro dispositivo de conversión electromagnética de la energía de tipo rotativo, está formada por un estator y un rotor. En el estator se coloca normalmente el inductor, alimentado por una red monofásica o trifásica. El rotor es el inducido, y las corrientes que circulan por él aparecen como consecuencia de la interacción con el flujo del estator.

Dependiendo del tipo de rotor, estas máquinas se clasifican en:

- rotor en jaula de ardilla o en cortocircuito.
- rotor devanado o con anillos.

El **estator** está formado por un apilamiento de chapas de acero al silicio que disponen de unas ranuras en su periferia interior en las que se sitúa un devanado trifásico distribuido, alimentado por una corriente del mismo tipo, de tal forma que se obtiene un flujo giratorio de amplitud constante distribuido sinusoidalmente por el entrehierro. El estator está rodeado por la carcasa, disponiéndose en esta las correspondientes patas de fijación y los anillos o cáncamos de elevación y transporte.

El **rotor** está constituido por un conjunto de chapas apiladas, formando un cilindro, que tienen unas ranuras en la circunferencia exterior, donde se coloca el devanado.

La máquina asíncrona, además de disponer de un estator y un rotor, está dotada de otros elementos mecánicos necesarios para su funcionamiento: tapas o cubos, rodamientos, ventilador, caja bornera, carcasa, etc.

3.3.3 Principio de funcionamiento

Generalmente la máquina asíncrona suele funcionar como motor. El devanado del estator está constituido por tres arrollamientos desfasados 120° en el espacio y de $2p$ polos. Al introducir por ellos corrientes de una red trifásica de frecuencia f_1 , se produce una onda rotativa de f.m.m., distribuida sinusoidalmente por la periferia del entrehierro, que produce un campo magnético giratorio cuya velocidad mecánica en r.p.m.

$$n_1 = \frac{60f_1}{p} \text{ [r.p.m.]} \quad (3.1)$$

El término n_1 se denomina velocidad de sincronismo. Se conoce como deslizamiento al cociente:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (3.2)$$

Al aumentar la carga mecánica del motor, el par resistente se hace mayor que el par interno y el deslizamiento aumenta, esto provoca un aumento de las corrientes del rotor, gracias a lo cual aumenta el par motor y se establece el equilibrio dinámico de los momentos resistente y motor.

Las frecuencias de las corrientes del rotor, están relacionadas con la frecuencia del

estator por medio de la expresión:

$$f_2 = sf_1 \quad (3.3)$$

En el caso de que el rotor esté parado, se cumple $n=0$, es decir $s=1$, lo que indica que en estas circunstancias, las frecuencias del estator y del rotor coinciden, es decir:

$$f_2 = f_1 \quad (3.4)$$

Si se denomina E_2 el valor eficaz de la f.e.m. por fase del rotor, N_2 al número de espiras por fase, ϕ_m al flujo máximo que lo atraviesa y K_2 al coeficiente del devanado, se cumplirá:

$$E_2 = 4.44K_2f_1N_2\phi_m \quad (3.5)$$

Y de forma similar, si se denomina E_1 al valor eficaz de la f.e.m. inducida por fase en el estator, se tendrá:

$$E_1 = 4.44K_1f_1N_1\phi_m \quad (3.6)$$

Donde N_1 es el número de espiras por fase y K_1 el factor de devanado correspondiente.

Cuando el rotor gira a la velocidad n , en el sentido del campo giratorio, el deslizamiento ya no es la unidad y las frecuencias de las corrientes del rotor son iguales a f_2 . Denominado E_{2s} a la nueva f.e.m. inducida en este devanado, se cumplirá:

$$E_{2s} = 4.44K_2f_2N_2\phi_m \quad (3.7)$$

Y haciendo una comparación, se obtiene:

$$E_{2s} = sE_2 \quad (3.8)$$

Expresión que relaciona las f.e.m.s inducidas en el rotor, según se considere que está en movimiento: E_{2s} o parado: E_2 . La f.e.m. anterior E_{2s} producirá unas corrientes en el rotor de frecuencia f_2 , de tal forma que éstas a su vez crearán un campo giratorio, cuya velocidad respecto a su propio movimiento será:

$$n_2 = \frac{60f_2}{p} \quad (3.9)$$

Ya que el rotor está devanado con el mismo número de polos que el estator. Como la máquina gira a n r.p.m., la velocidad del campo giratorio del rotor respecto a un referencial en reposo será $n_2 + n$. Si se tienen en cuenta las expresiones anteriores:

$$f_2 = sf_1 = \left(\frac{n_1-n}{n_1}\right)\left(\frac{pn_1}{60}\right) = \frac{p(n_1-n)}{60} \quad (3.10)$$

Y al comparar con la ecuación (3.9) se deduce:

$$n_2 = n_1 - n \quad (3.11)$$

Y en consecuencia, la velocidad absoluta del campo de rotor será:

$$n_2 + n = (n_1 - n) + n = n_1 \quad (3.12)$$

Lo que indica que el campo del rotor gira en sincronismo con el campo del estator.

3.3.4 Circuito equivalente del motor asíncrono

El circuito equivalente de un motor tiene como objetivo, al igual que en el caso de transformadores, obtener una red que explique el comportamiento de la máquina, pero en la que no aparezca la acción transformadora entre los circuitos de primario y secundario, lo cual trae consigo el reducir las magnitudes de un devanado al otro, generalmente del rotor al estator.

Si se desean establecer las ecuaciones de comportamiento eléctrico del estator y del rotor, será preciso tener en cuenta que los arrollamientos tienen unas resistencias R_1 y R_2 ohmios/fase y que además existen flujos de dispersión en los devanados del estator y rotor que dan lugar a las autoinducciones L_{d1} y L_{d2} . En consecuencia, las reactancias de los arrollamientos en reposo, cuando la pulsación de la red es $\omega_1 = 2\pi f_1$ serán:

$$X_1 = L_{d1}\omega_1 = L_{d1}2\pi f_1 ; X_2 = L_{d2}\omega_1 = L_{d2}2\pi f_1 \quad (3.13)$$

Sin embargo, al girar el rotor la frecuencia secundaria cambia al valor f_2 , dando lugar a la reactancia X_{2s} , que en función de X_2 vale:

$$X_{2s} = L_{d2}\omega_2 = L_{d2}2\pi f_2 = sX_2 \quad (3.14)$$

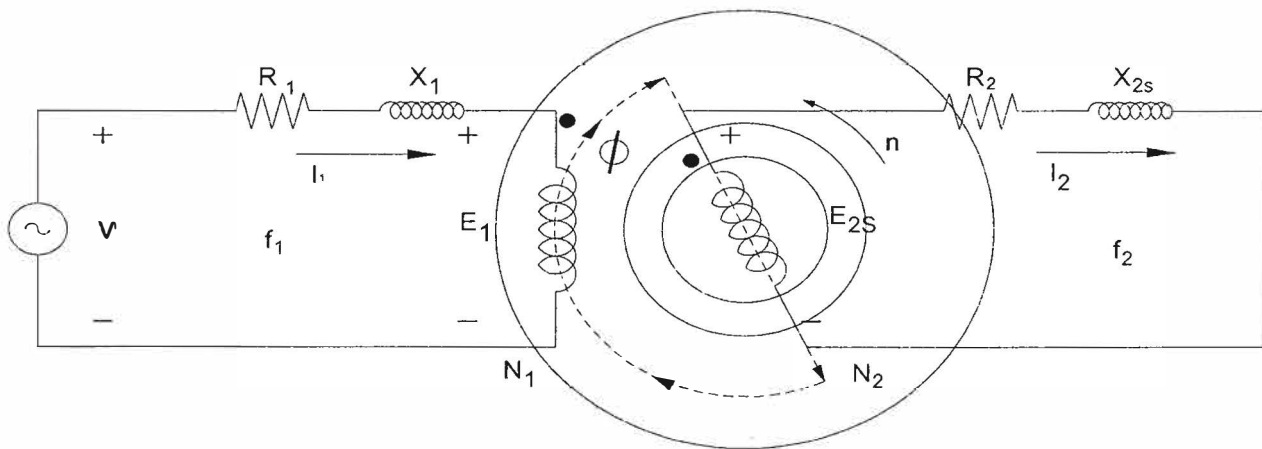


Figura 3.2 Circuito equivalente por fase del motor asíncrono trifásico

En la Figura 3.2, podemos observar que el primario está alimentado por la red de tensión V_1 y debe vencer las caídas de tensión en la impedancia de este devanado, el flujo común a estator y rotor induce en los arrollamientos f.e.m.s E_1 y E_{2s} .

La impedancia del rotor está formada por la resistencia R_2 y la reactancia X_{2s} , estando este devanado cerrado en cortocircuito. Las ecuaciones eléctricas correspondientes, se obtendrán aplicando el segundo lema de Kirchhoff a las mallas de primario y secundario, resultando:

$$\vec{V}_1 = \vec{E}_1 + R_1 \vec{I}_1 + jX_1 \vec{I}_1 ; \vec{E}_{2s} = R_2 \vec{I}_2 + jX_{2s} \vec{I}_2 \quad (3.15)$$

Debe tenerse en cuenta además, que las frecuencias de ambos circuitos son diferentes y de valores f_1 y f_2 respectivamente.

En el motor las frecuencias de las corrientes de estator y del rotor son diferentes, como puede observarse. En el circuito de la figura 3.2, la corriente que circula por el rotor, será:

$$\vec{I}_2 = \frac{\vec{E}_{2s}}{R_2 + jX_{2s}} \quad (3.16)$$

Y teniendo en cuenta las igualdades (3.8) y (3.14) aplicadas a la ecuación anterior (3.16), tendremos:

$$\vec{I}_2 = \frac{\vec{E}_{2s}}{R_2 + jX_{2s}} = \frac{s\vec{E}_2}{R_2 + jsX_2} = \frac{\vec{E}_2}{\frac{R_2}{s} + jX_2} \quad (3.17)$$

Obsérvese que en la ecuación (3.16) los parámetros de la f.e.m. (E_{2s}) y reactancia (X_{2s}) están referidos, a la frecuencia f_2 del rotor en movimiento. Sin embargo, se puede ver en la ecuación (3.17) están referidos, a la frecuencia f_1 del estator. Ahora bien, se conoce que la frecuencia de rotor coincide con la del estator cuando la máquina está parada. Por este motivo la ecuación (3.17) describe en definitiva el comportamiento de un rotor pseudo estacionario con unos parámetros E_2 y X_2 referidos a rotor parado (independientes del deslizamiento), pero en el que la nueva resistencia del rotor para tener en cuenta estos cambios es ahora R_2/s en vez de R_2 .

Para entender mejor lo anterior se procede a usar como base los gráficos de la Figura 3.3. La ecuación de la corriente en el rotor responde a la ecuación (3.16). En la Figura 3.3 se ha modificado el circuito del rotor para adaptarlo a la ecuación (3.17); nótese en este nuevo secundario que E_2 y X_2 son, respectivamente, la f.e.m. y la reactancia del rotor en reposo, independientes del movimiento; el efecto de éste se incluye en R_2/s . De tal modo que la frecuencia de este rotor estacionario ficticio es f_1 .

Para ver el cambio que se ha producido en la resistencia del rotor, se puede hacer una transformación de la ecuación (3.17).

$$\vec{I}_2 = \frac{\vec{E}_2}{R_2 + jX_2 + R_2 \left(\frac{1}{s} - 1\right)} \quad (3.18)$$

En la Figura 3.3, muestra el circuito correspondiente a la expresión anterior (3.18), que consta de la resistencia propia del rotor R_2 más otra resistencia de valor:

$$R_c = R_2 \left(\frac{1}{s} - 1\right) \quad (3.19)$$

Que depende del movimiento (del valor del deslizamiento). La resistencia R_c se denomina resistencia de carga y representará el efecto equivalente a la carga mecánica que lleve el motor, o de otro modo la potencia eléctrica disipada en R_c (multiplicada por el número de fases) representará la potencia desarrollada por el motor en su movimiento de

rotación, es decir, la potencia mecánica en el eje.

Pero se puede ver que en la Figura 3.3, aún se conserva los acoplamientos magnéticos, el siguiente paso es realizar una reducción del rotor al estator.

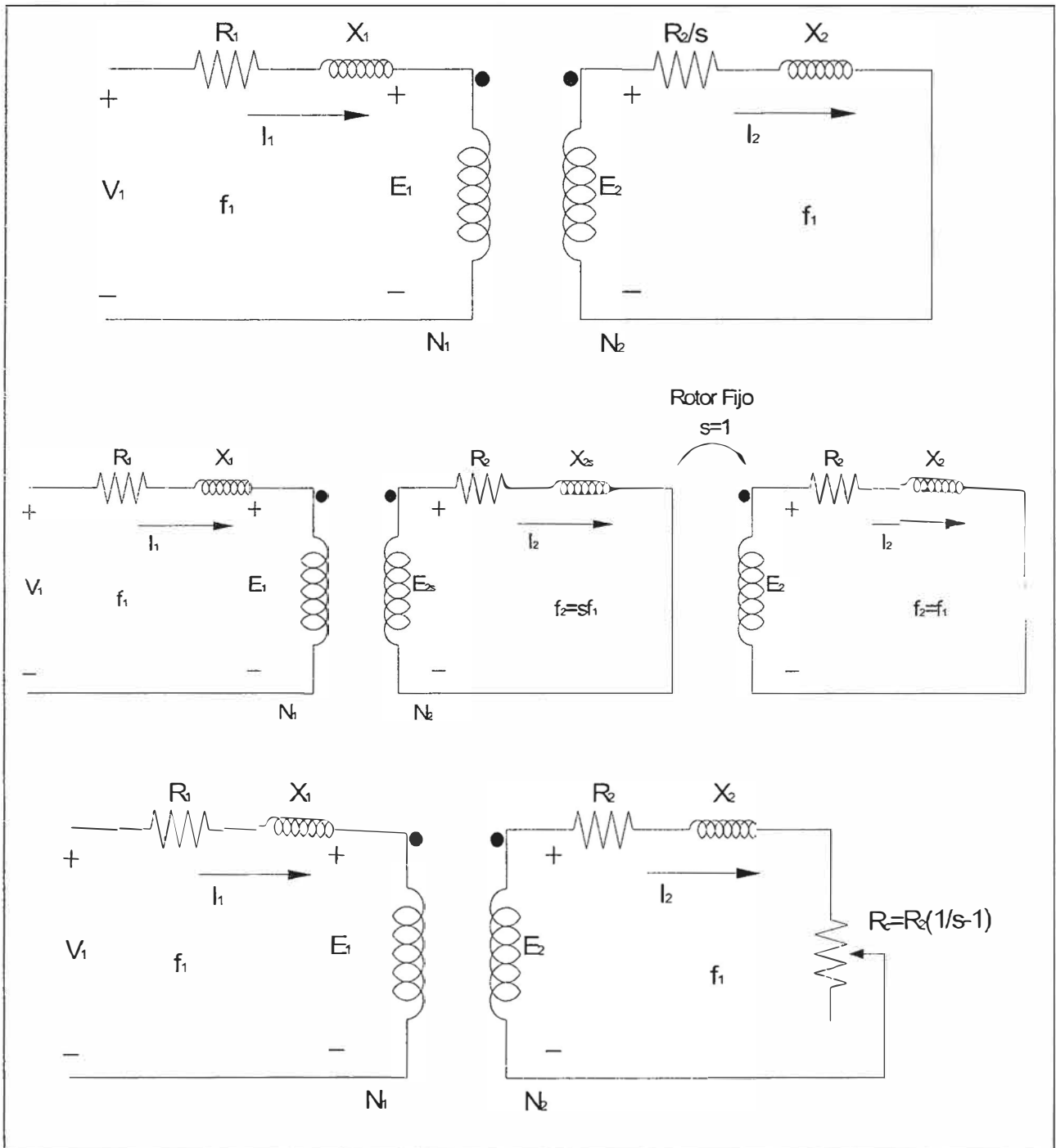


Figura 3.3 Desarrollo del circuito equivalente por fase del motor asincrono

Para tal fin se usa como base la Figura 3.4, en esta figura se ha utilizado un secundario equivalente en el que las magnitudes correspondientes se han señalado con tilde.

En cada caso se han indicado en los circuitos el número de fases y factores de devanado tanto del estator como del rotor.

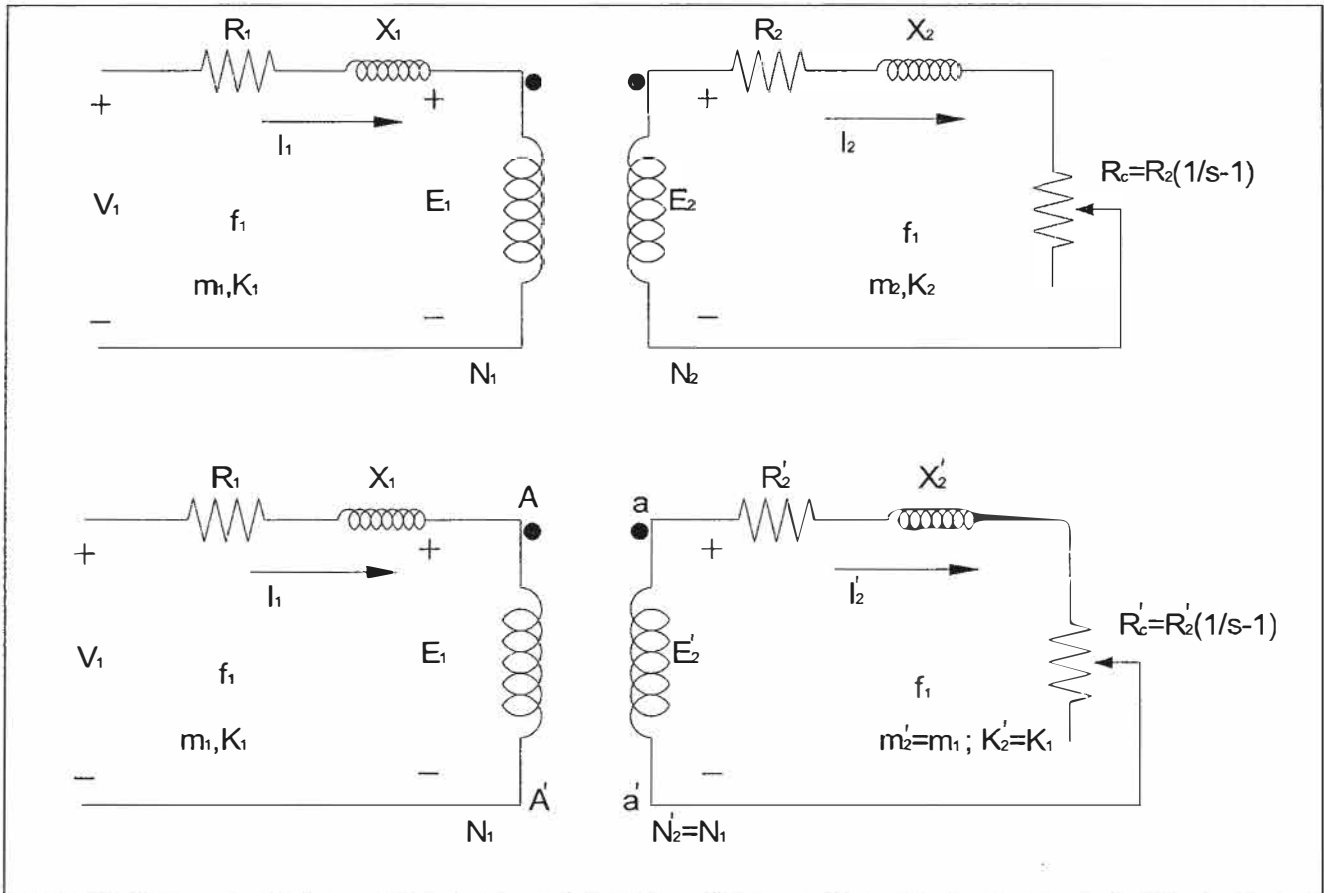


Fig.3.4 Circuito equivalente reducido al estator por fase del motor asíncrono trifásico

En la figura 3.4, se ha mostrado un circuito equivalente, en el que se conserva intacto el primario pero en el que las magnitudes del secundario son:

ROTOR EQUIVALENTE:

m_2 = número de fases del rotor equivalente.

K_2 = factor de devanado del rotor equivalente.

N_2 = número espiras del rotor equivalente.

E_2 = f.e.m del rotor equivalente.

V_2 = tensión aplicada al rotor equivalente.

I_2 = corriente del rotor equivalente.

R_2 = resistencia del rotor equivalente.

X_2 = reactancia del rotor equivalente.

Si este nuevo rotor se quiere reducir al estator, para conseguir una simplificación posterior, se tendrán que adaptar sus parámetros a los del primario, lo que significa proceder a las igualdades siguientes:

$$m_2' = m_1; K_2' = K_1; N_2' = N_1 \quad (3.20)$$

Luego de estas asignaciones, los nuevos parámetros del rotor serán: La fuerza electromotriz E_2' , la corriente I_2' y las impedancias R_2' , X_2' , R_c'

a. Fuerza electromotriz E_2

De acuerdo a las ecuaciones (3.5), (3.6) y (3.20) se podrá escribir:

$$E_2 = 4.44K_2f_1N_2\phi_m = 4.44K_1f_1N_1\phi_m = E_1 \quad (3.21)$$

Es decir el nuevo rotor tiene una f.e.m. E_2 igual a E_1 , lo que permitirá luego unir el primario con el secundario, que es lo que se trata de conseguir:

Se puede realizar la división de las ecuaciones (3.5) entre (3.6) resultando:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{K_1N_1}{K_2N_2} = m_v \quad (3.22)$$

Que se denominará **relación de transformación** de tensiones. Y se obtiene, de la ecuación (3.21) y (3.22):

$$E_2 = m_v E_1 \quad (3.23)$$

Que determina la f.e.m. del nuevo rotor E_2 frente a la real E_1

b. Corriente I_2

Si los dos secundarios de la Figura 3.4 son equivalentes, deberán suministrar la misma potencia rotórica, es decir:

$$m_2 E_2 I_2 = m_1 E_1 I_1 = m_1 E_2 I_2 \quad (3.24)$$

Y teniendo en cuenta (3.23) da lugar a:

$$I_2 = \frac{m_1}{m_2} \frac{1}{m_v} I_1 = \frac{m_1 K_2 N_2}{m_2 K_1 N_1} I_1 = \frac{I_1}{m_i} \quad (3.25)$$

Donde m_i es igual a:

$$m_i = \frac{m_1 K_1 N_1}{m_2 K_2 N_2} = \frac{m_1}{m_2} m_v \quad (3.26)$$

Que se denomina **relación de transformación de corrientes**.

c. Impedancias R_2, X_2, R_c

Para ver la regla de transformación de impedancias deberá aplicarse el principio de igualdad energética. Si se consideran, por ejemplo, las pérdidas en el cobre en los circuitos de la Figura 3.4 se podrá escribir:

$$m_2 R_2 I_2^2 = m_1 R_1 I_1^2 = m_1 R_2 I_2^2 \quad (3.27)$$

Y teniendo en cuenta (3.25) y (3.26) resultará:

$$R_2 = m_v m_i R_1 \quad (3.28)$$

Y de modo análogo:

$$X_2 = m_v m_i X_1 ; R_c = m_v m_i R_c \quad (3.29)$$

Donde el producto $m_v m_i$ constituye la denominada **relación de transformación de impedancias**.

Teniendo en cuenta los valores transformados del nuevo rotor, y de acuerdo con la

igualdad (3.21), se podrán unir los terminales A-A' del primario (estator) con los correspondientes a-a' del secundario (rotor) en la figura 3.4, lo anteriormente mencionado se representa en la figura 3.5, que representa al esquema equivalente, donde se muestra una rama en paralelo por la que circulara la corriente de vacío del motor. La ecuación que relaciona las corrientes de estator y rotor aplicando el primer lema de Kirchhoff en el nudo "A", da lugar a:

$$\vec{I}_1 = \vec{I}_0 + \vec{I}_2 = \vec{I}_0 + \frac{\vec{I}_2'}{m_i} \quad (3.30)$$

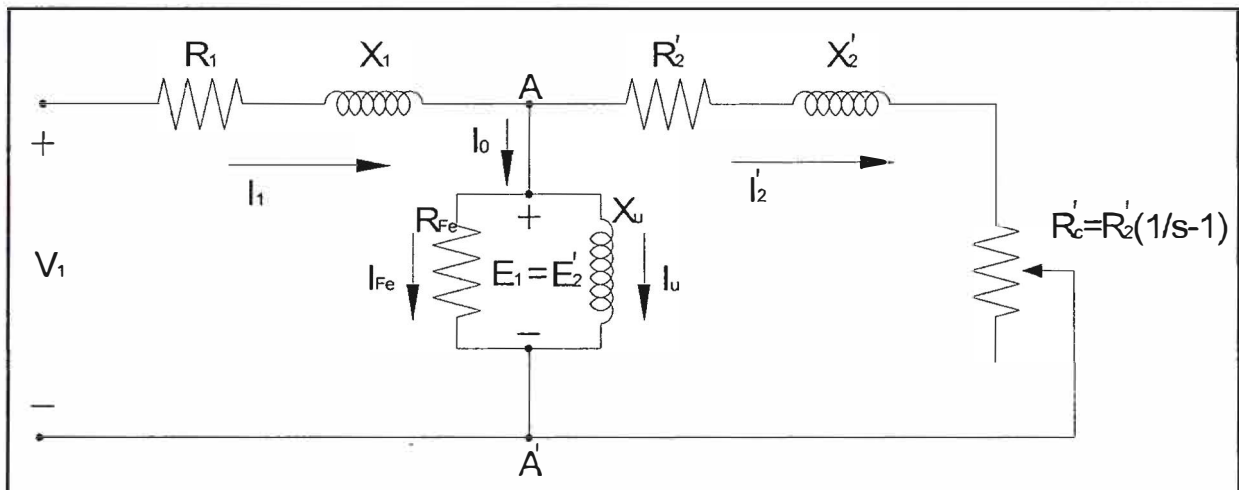


Fig.3.5 Circuito equivalente por fase del motor asíncrono trifásico exacto

Y las ecuaciones eléctricas de primario y secundario correspondiente serán:

$$\vec{V}_1 = \vec{E}_1 + R_1 \vec{I}_1 + jX_1 \vec{I}_1 \quad (3.31)$$

$$\vec{E}_2 = R_2' \vec{I}_2' + R_c' \vec{I}_2' + jX_2' \vec{I}_2' \quad (3.32)$$

También se puede llegar a una aproximación del diagrama (Figura 3.5), trasladando la rama de vacío a los terminales de entrada, pero con la limitación que habrá errores debido a que la presencia del entrehierro en los motores, que hace que la corriente de vacío sea entre 35-40% de la corriente nominal.

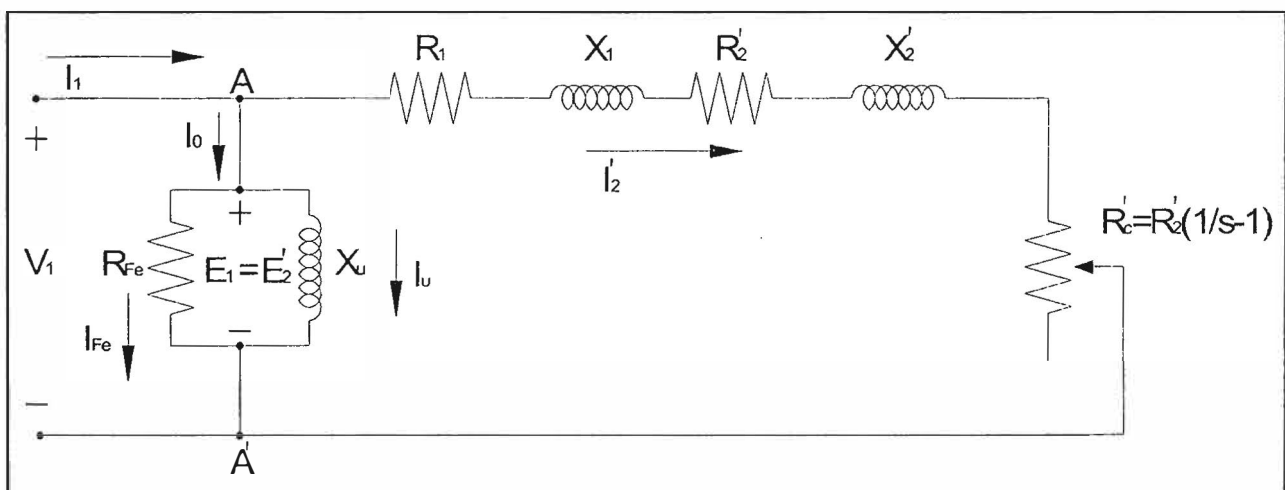


Fig.3.6 Circuito equivalente aproximado por fase del motor asíncrono trifásico

3.3.5 Circuito equivalente aproximado con ajuste de tensión

Se realizará una aproximación más cercana al circuito equivalente que la presentada en la Figura 3.5 reduciendo el valor de la tensión de alimentación, tal como se demuestra a continuación.

Para ello se parte del circuito equivalente exacto (Figura 3.5) y teniendo en cuenta la ecuación (3.31) y (3.32), se puede escribir:

$$\vec{V}_1 = \vec{E}_1 + (R_1 + jX_1)\vec{I}_1 \quad (3.33)$$

Y como se recuerda que (ecuación 3.2.30).

$$\vec{I}_1 = \vec{I}_0 + \vec{I}_2 \quad (3.34)$$

Donde el valor de \vec{I}_0 según el circuito equivalente exacto es igual a:

$$\vec{I}_0 = \vec{E}_1 \left[\frac{1}{R_{Fe}} + \frac{1}{jX_u} \right] \approx \frac{\vec{E}_1}{jX_u} \quad (3.35)$$

Lo que representa que se desprecia la corriente I_{Fe} frente a la corriente de imantación I_u . Sustituyendo las ecuaciones (3.33) y (3.34) en (3.35), resulta:

$$\vec{V}_1 = \vec{E}_1 + (R_1 + jX_1) \left[\frac{\vec{E}_1}{jX_u} + \vec{I}_2 \right] \quad (3.36)$$

Y de acuerdo con la ecuación (3.32), se tiene:

$$\vec{E}_1 = \vec{E}_2 = \left(\frac{R_2}{s} + jX_2 \right) \vec{I}_2 \quad (3.37)$$

Esta última ecuación se reemplaza en (3.36), lo que da:

$$\vec{V}_1 = \left(R_1 + jX_1 + \frac{R_2}{s} + jX_2 \right) \vec{I}_2 + \left(\frac{R_1 + jX_1}{jX_u} \right) \vec{E}_1 \quad (3.38)$$

Y dado que normalmente $X_u \gg R_1$ y admitiendo que \vec{E}_1 es poco menor pero con un valor cercano a \vec{V}_1 en el rango de funcionamiento normal, la ecuación anterior se transforma en:

$$\vec{V}_1 = \vec{V}_1 \left(1 - \frac{X_1}{X_u} \right) = \left(R_1 + jX_1 + \frac{R_2}{s} + jX_2 \right) \vec{I}_2 \quad (3.39)$$

Esta última ecuación corresponde a la Figura 3.7, que es similar a la Figura 3.6 pero con la diferencia que se ha corregido la tensión primaria para obtener valores más reales de las corrientes I_1 y I_2 .

Se debe tomar en cuenta que este circuito (Figura 3.7) es un circuito aproximado que sirve para determinar magnitudes como: corrientes, potencias perdidas, potencias mecánicas, etc., pero si se desea calcular la potencia absorbida por el motor de la red se deberá utilizar la tensión real V_1 aplicada al motor y no \vec{V}_1 .

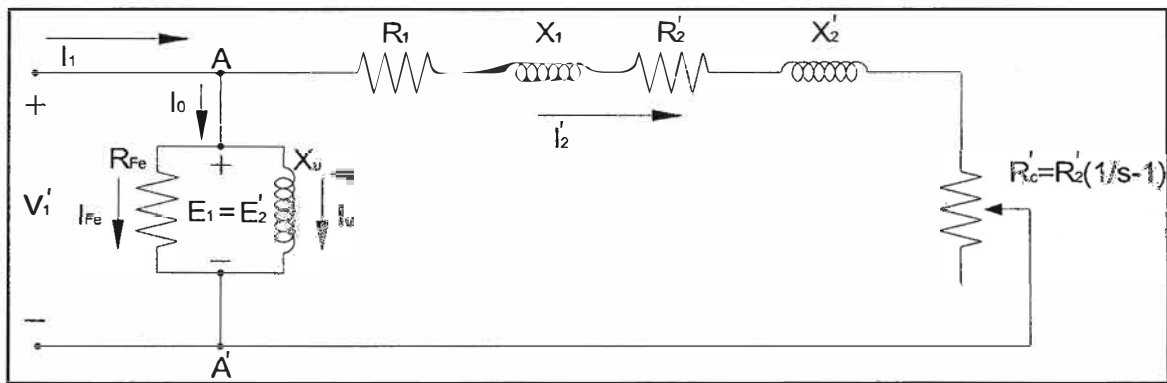


Fig. 3.7 Circuito equivalente aproximado corregido por fase del motor asíncrono trifásico.

3.3.6 Ensayo de motor asíncrono

Los ensayos del motor asíncrono permiten determinar los parámetros del circuito equivalente de la máquina. Se verán 2 tipos de pruebas comunes y además algunas pruebas prácticas que ayuden a determinar los parámetros eléctricos del motor asíncrono y en este caso al motor de rotor bobinado.

a. Ensayo de vacío o de rotor libre

Consiste en hacer funcionar el motor sin ninguna carga mecánica en el eje, es decir la máquina trabaja a rotor libre. Se debe aplicar la tensión asignada al primario V_{1n} , midiendo la potencia absorbida P_0 y la corriente de vacío I_0 .

Si la máquina pudiera funcionar en esta prueba a la velocidad de sincronismo $n=n_1$, el deslizamiento sería igual a cero, lo que indicaría, en el circuito equivalente exacto, que la resistencia de carga R'_c se hace infinita y, en consecuencia, I_2 sería nula. Pero como se conoce por la teoría anterior, el motor asíncrono no puede girar a la velocidad de sincronismo, ya que I_2 sería nula y no existiría ningún par electromagnético en el eje.

En estas circunstancias lo que sucede realmente es que el motor en vacío gira a una velocidad muy cercana a la del campo giratorio, lo que indica que el valor de R'_c es elevado pero no infinito. Como no hay carga en el eje, la potencia disipada en esta resistencia (R'_c) representa la pérdida en rozamiento y ventilación del motor.

También la corriente I_2 es pequeña debido a la alta impedancia de R'_c , se podrá despreciar las pérdidas en el cobre del devanado del rotor. Denominando P_{cu1} a las pérdidas en el cobre del estator, P_{Fe} a las pérdidas en el hierro y P_m a las pérdidas mecánicas, se cumplirá:

$$P_0 = P_{Fe} + P_m + P_{cu1} \quad (3.40)$$

Para realizar la medición de cada una de las potencias anteriores, se procede de la siguiente forma:

P_{cu1} , medir la resistencia R_1 de cada fase del estator indirectamente, para ello medir la corriente y tensión en una fase del primario y luego aplicar la ley de Ohm. Tener

pendiente pero el efecto pedicular o Skin en los conductores, en la práctica se suele aumentar al valor de 10 a 20%.

P_{Fe} y P_m , se alimenta el motor con tensión variable, comenzando por el valor nominal V_{1n} o algo superior y luego ir reduciendo hasta un valor de 30 a 50% del V_{1n} , en cada caso tomar los valores de P_0, I_0 , y V_1 , y a partir de ellos se deducen las pérdidas $P_{Fe}+P_m$ en cada caso, de acuerdo a la ecuación:

$$P_{Fe} + P_m = P_0 - P_{cu1} = P_0 - m_1 R_1 I_0^2 \quad (3.41)$$

Al representar $P_{Fe}+P_m$ en función de V_1 se obtiene una curva de tipo parabólico, como se indica en la Figura 3.8. Se procede a extrapolar la curva, hasta que corte el eje de ordenadas, y se obtiene para el $V_1=0$, el valor de las pérdidas mecánicas P_m , ya que entonces las pérdidas en el hierro son nulas al no existir flujo. El valor de las pérdidas en el hierro, a la tensión asignada, vendrá dado por la ordenada existente entre la curva P_m+P_{Fe} y la horizontal P_m a esa tensión, como se muestra la Figura 3.7.

Para reducir errores en la extrapolación de la curva parabólica de la Figura 3.8, es más práctico representar P_m+P_{Fe} en función del cuadrado de la tensión V_1 , tal como se muestra en la Figura 3.8. En este caso la curva se transforma en una línea recta, cuya ordenada en el origen representa la pérdida mecánica del motor P_m .

Conocidas las pérdidas P_{Fe} (separadamente de P_m) se podrá calcular la rama paralelo del circuito equivalente, como muestra la Figura 3.8, que absorberá la potencia P_{Fe} , de acuerdo con las siguientes expresiones aproximadas:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_{Fe}}{m_1 V_{1n} I_0}; I_{Fe} = I_0 \cos \varphi_0; I_{\mu} = I_0 \sin \varphi_0 \quad (3.42)$$

De donde se deduce:

$$R_{Fe} = \frac{V_{1n}}{I_{Fe}}; X_{\mu} = \frac{V_{1n}}{I_{\mu}} \quad (3.43)$$

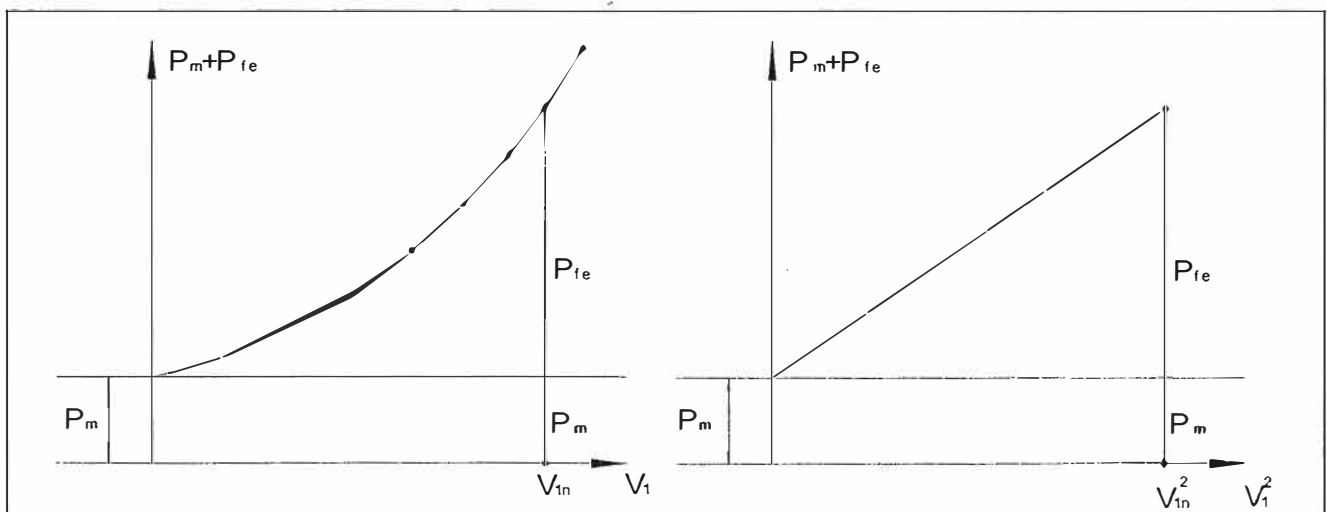


Fig. 3.8 Reparto de las pérdidas en vacío en función de la tensión

b. Ensayo de cortocircuito o de rotor bloqueado

Este ensayo se realiza bloqueando el rotor impidiéndole que gire, es decir, $n=0$, por lo que se tendrá: $s=1$, $R_c=0$, lo que indica que el motor se comporta como un transformador con el secundario en cortocircuito. Al estator se le aplica una tensión creciente, partiendo de cero, hasta que la corriente absorbida sea la asignada, $I_{1cc}=I_{1n}$ (por fase), midiendo a la vez la tensión aplicada V_{1cc} (fase) y la potencia absorbida P_{cc} (total). La corriente de vacío I_0 es entonces despreciable frente a I_{1n} debido a la pequeña tensión necesaria, resultando el circuito equivalente de la Figura 3.9, que se obtiene al despreciar la rama paralelo del esquema de la Figura 3.5 y hacer $R_c=0$, debido a que en estas condiciones el deslizamiento es la unidad.

De las medidas efectuadas puede obtenerse el f.d.p. en cortocircuito:

$$\cos \varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{m_1 V_{1cc} I_{1n}} \quad (3.44)$$

Y de aquí resultan los valores:

$$R_{cc} = R_1 + R_2' = \frac{V_{1cc}}{I_{1n}} \cos \varphi_{cc} \quad (3.45)$$

$$X_{cc} = X_1 + X_2' = \frac{V_{1cc}}{I_{1n}} \sin \varphi_{cc} \quad (3.46)$$

En consecuencia, el ensayo de cortocircuito permite obtener los parámetros de la rama serie del motor. Además de que R_1 se ha determinado con un ensayo en c.c., la ecuación (3.45) permitirá calcular R_2' , valor que es necesario conocer, ya que está incluido en R_c . Si se desea utilizar en el estudio del motor el circuito equivalente exacto, habrá que repartir la cantidad X_{cc} entre X_1 y X_2' . A falta de información se elegirá $X_1=X_2'$.

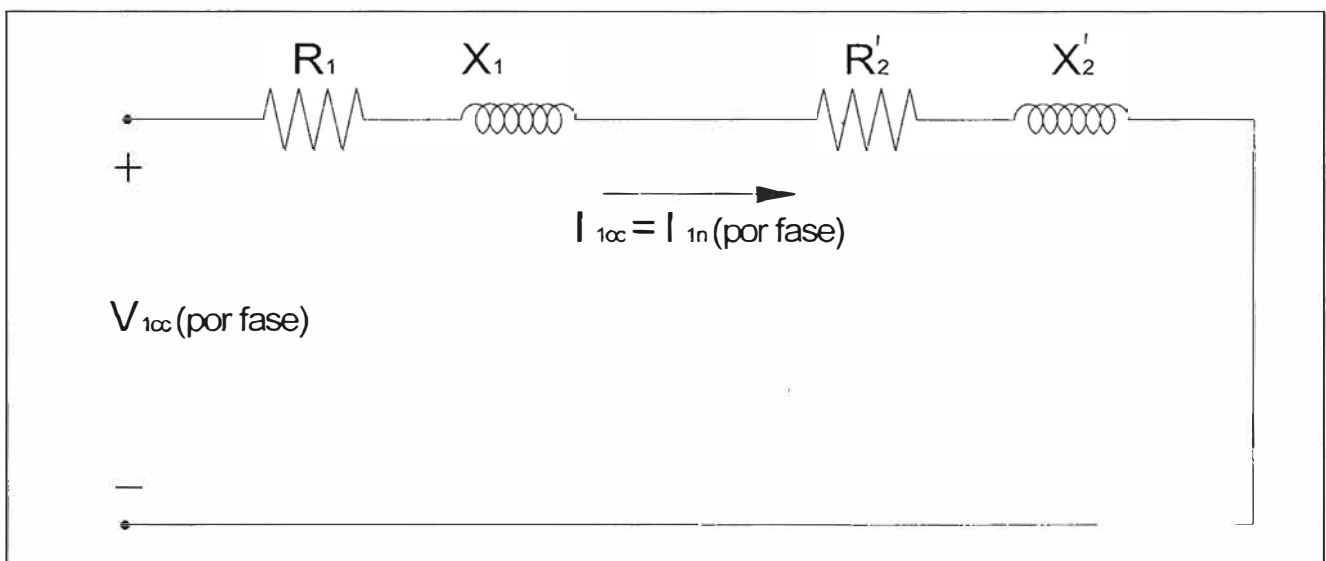


Fig. 3.9 Circuito equivalente en cortocircuito

3.3.7 Balance de potencias

En un motor asíncrono existe una transformación de energía eléctrica en mecánica

que se transmite desde el estator al rotor, a través del entrehierro; el proceso de conversión está inevitablemente ligado con las pérdidas en los diferentes elementos de la máquina. A continuación se analiza el balance de energía que se produce en el funcionamiento del motor.

La potencia que la máquina absorbe de la red, si V_1 es la tensión aplicada por fase, I_1 la corriente por fase y φ el desfase entre ambas magnitudes, será:

$$P_1 = m_1 V_1 I_1 \cos \varphi_1 \quad (3.47)$$

Esta potencia llega al estator, y una parte se transforma en calor por efecto Joule en sus devanados, cuyo valor es:

$$P_{cu1} = m_1 R_1 I_1^2 \quad (3.48)$$

Y la otra parte se pierde en el hierro: P_{Fe1} .

La suma de ambas pérdidas representa la disipación total en el estator P_{p1} :

$$P_{p1} = P_{cu1} + P_{Fe1} \quad (3.49)$$

Ya que las frecuencias de las corrientes en el rotor son muy reducidas, debido a que los deslizamientos en la máquina suelen ser pequeños, se considera entonces que prácticamente es el hierro del estator el único origen de las pérdidas ferromagnéticas. De acuerdo con el circuito equivalente del motor de la Figura 3.5, se podrá escribir:

$$P_{Fe} = P_{Fe1} = m_1 E_1 I_{Fe} \approx m_1 V_1 I_{Fe} \quad (3.50)$$

La potencia electromagnética que llegara al rotor a través del entrehierro, y que se denomina P_a (Potencia del entrehierro), tendrá una magnitud:

$$P_a = P_1 - P_{p1} = P_1 - P_{cu1} - P_{Fe} \quad (3.51)$$

En el rotor aparecen unas pérdidas adicionales debidas al efecto Joule, P_{cu2} , y de valor:

$$P_{cu2} = m_2 R_2 I_2^2 = m_2 R_2' I_2'^2 \quad (3.52)$$

Las pérdidas en el hierro del rotor son despreciables debido al pequeño valor de f_2 . La potencia que llegará al árbol de la máquina, denominada potencia mecánica interna, P_{mi} , será:

$$P_{mi} = P_a - P_{cu2} \quad (3.53)$$

Que teniendo en cuenta el significado de la resistencia de carga R_c del circuito equivalente, se podrá poner:

$$P_{mi} = m_1 R_2' \left(\frac{1}{s} - 1 \right) I_2'^2 \quad (3.54)$$

La potencia útil en el eje será algo menor, debido a las pérdidas mecánicas por rozamiento y ventilación; denominando P_m a estas pérdidas y P_u a la potencia útil, resultará la ecuación siguiente:

$$P_u = P_{mi} - P_m \quad (3.55)$$

El rendimiento del motor vendrá expresado por el cociente:

$$\eta = \frac{P_u}{P_1} = \frac{P_u}{P_u + P_m + P_{cu2} + P_{Fe} + P_{cu1}} \quad (3.56)$$

Existen algunas relaciones útiles entre las potencias anteriores:

$$\frac{P_{cu2}}{P_{mi}} = \frac{s}{1-s} \quad (3.57)$$

Por otra parte, la potencia que atraviesa el entrehierro P_a se puede poner:

$$P_a = P_{mi} + P_{cu2} = m_1 \frac{R_2}{s} I_2^2 = \frac{P_{cu2}}{s} = \frac{P_{mi}}{1-s} \quad (3.58)$$

Que relaciona P_a con P_{cu2} .

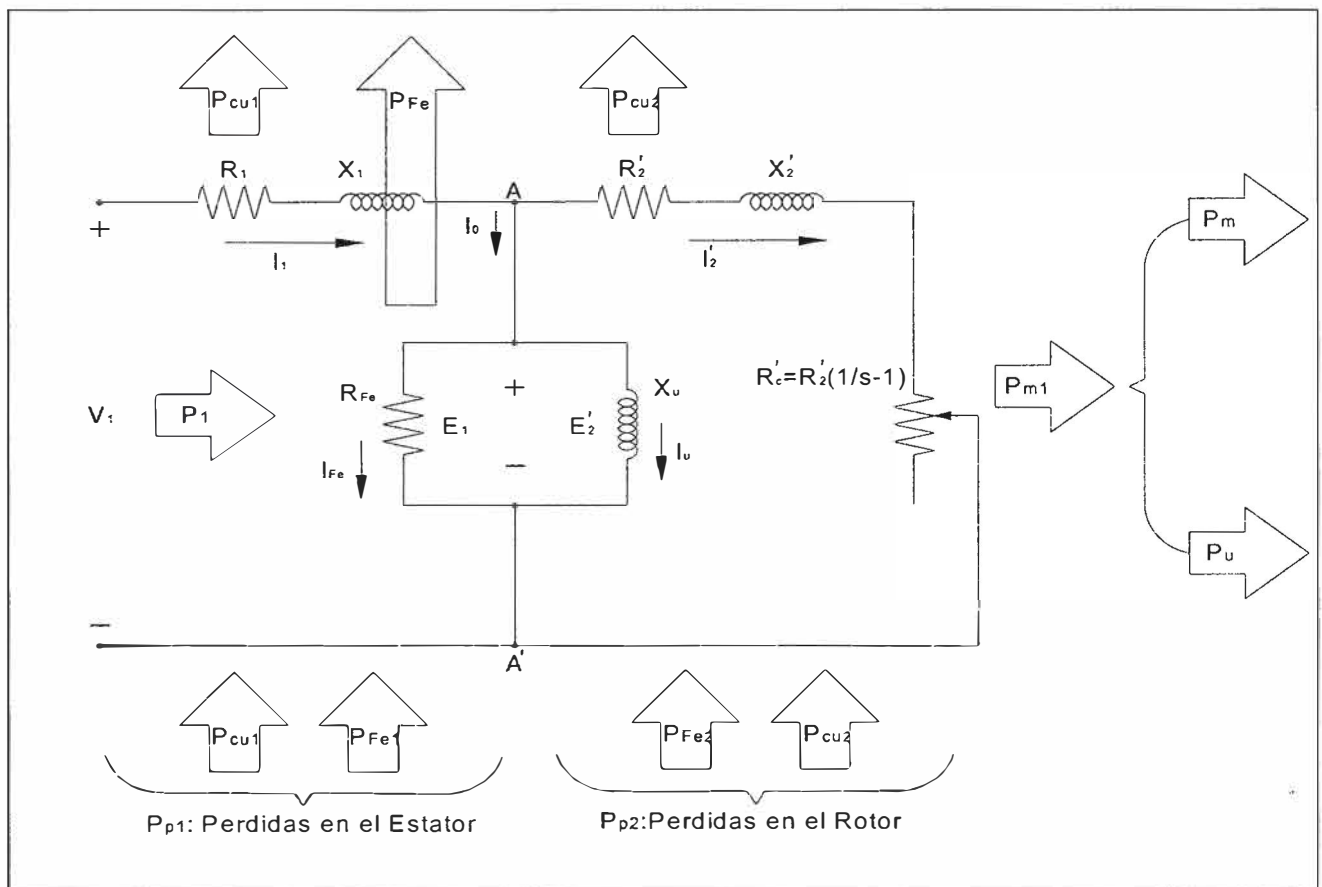


Fig. 3.10 Distribución de potencias en el motor

3.3.8 Motor de rotor bobinado

En esta sección describe diversos aspectos relacionados al motor de rotor bobinado.

- Características naturales
- Características artificiales
- Par de rotación
- Balance de potencias
- Familia de características artificiales

La Figura 3.11 ilustra las partes de este tipo de motor.

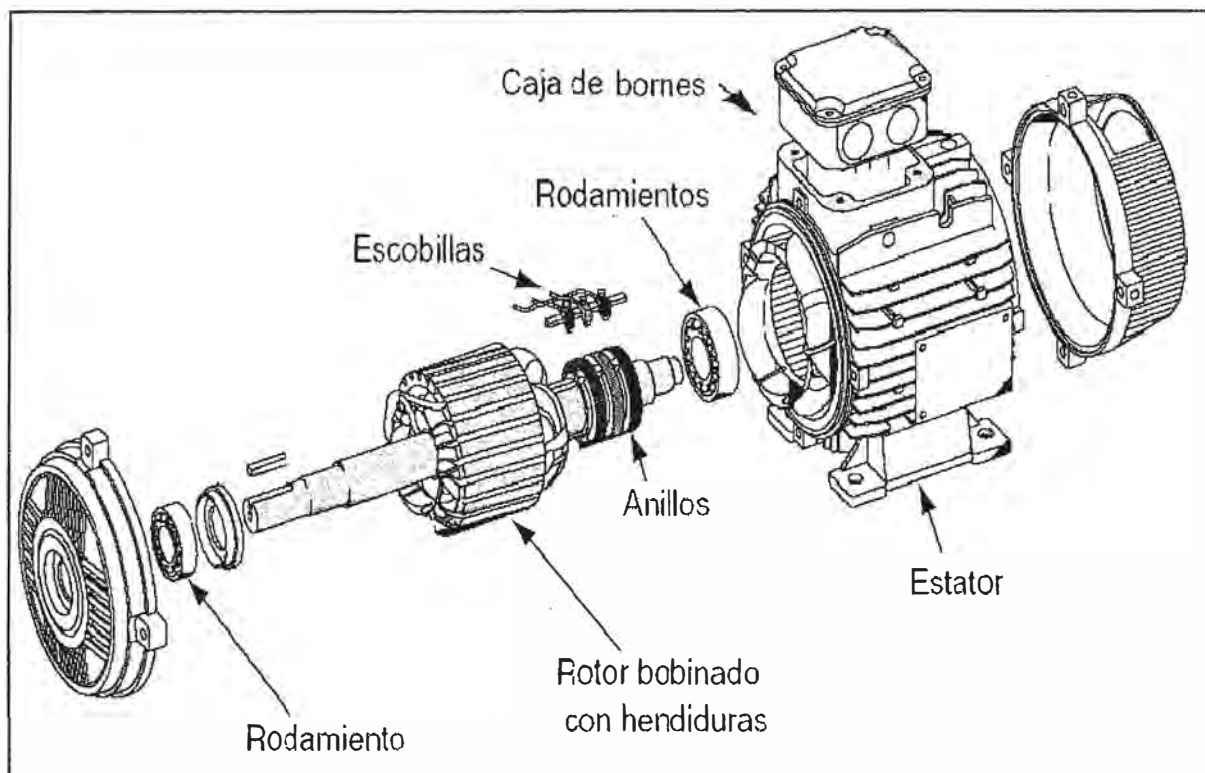


Figura 3.11 Partes del motor

a. Introducción

En los motores de corriente alterna con rotor bobinado, para efectuar el proceso de puesta en marcha se instala un reóstato de arranque conectado a los anillos rozantes del motor de manera de aumentar a voluntad la resistencia rotórica total (Figura 3.12).

En este método, el motor arranca con toda la resistencia en serie con el circuito del rotor. Luego por medios manuales o automáticos, en forma continua o escalonada, se va reduciendo la resistencia a medida que la máquina gana velocidad, hasta que en régimen permanente el reóstato queda en cortocircuito.

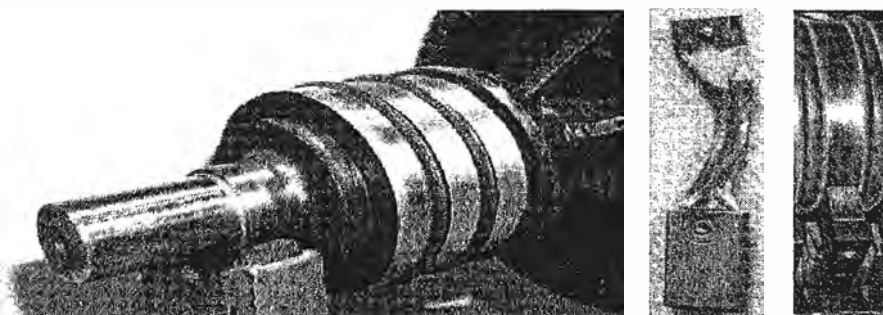


Figura 3.12 Colector de 3 anillos, escobilla y anillo con escobilla

El rotor bobinado se justifica en los casos fundamentales siguientes:

- Para las grúas de puente normales y de marcha rápida, donde es necesaria la regulación de la velocidad en los accionamientos del puente, carro y elevación.
- Para los accionamientos de volante con deslizamiento complementario: cizallas, prensas, accionamientos principales de los trenes de laminado, etc.

- Para los accionamientos, por ejemplo, en los talleres de laminación con conexiones muy frecuentes cuando los motores asíncronos con rotor en cortocircuito no entran en el cálculo debido al calentamiento o no dan las requeridas características de frenado dinámico; en estos casos muchas veces los motores con rotor bobinado y con resistencias en el rotor conectadas permanentemente cuya magnitud es 0.15 – 0.4 de la nominal dan características satisfactorias.

b. Características naturales

Considerando las características principales establecidas en la Figura 3.13, como se ilustra para una de las ejecuciones de los motores asíncronos. La magnitud n^{fr} corresponde a la velocidad síncrona del motor, es decir, a la velocidad del rotor igual a la velocidad de rotación del flujo del estator. En este caso, en el rotor no se induce ninguna f.e.m y por lo tanto la corriente en éste y el momento en el árbol son iguales a cero. Entre tanto, a través del devanado del estator fluye corriente de imantación (corriente de la marcha en vacío ideal) que se designa como $I_{es.v}$. Esta corriente engendra un flujo magnético en el estator que induce una *fem* opuesta que compensa casi totalmente la tensión exterior aplicada.

En los motores asíncronos calculados para régimen permanente de trabajo, el entrehierro entre el estator y el rotor se hace muy estrecho (fracciones de milímetros). Se tiene que la corriente del estator de la marcha en vacío en estos motores es relativamente pequeña y constituye una pequeña parte de la corriente nominal del estator, a saber:

$$I_0 \approx (0.2-0.4)I_{1n} \quad (3.59)$$

En los motores tipo MT de las grúas metalúrgicas, calculados para un régimen intermitente, que trabajan con arranques frecuentes y con carga de impacto, el entrehierro se hace (de acuerdo con las condiciones de seguridad) de mayor tamaño. Así que la corriente del estator de la marcha en vacío resulta mayor y es de:

$$I_0 \approx (0.6-0.75)I_{1n} \quad (3.60)$$

Estas corrientes tan grandes del estator de la marcha en vacío son admisibles solo en caso de régimen intermitente de los motores y son aplicables en el régimen permanente de trabajo, ya que estas corrientes reactivas provocan el calentamiento de los devanados del estator y reducen el factor de potencia de la red, particularmente de cargas pequeñas. Con la disminución de la velocidad el momento incrementa, al principio aproximadamente de acuerdo con la ley rectilínea, a continuación, su crecimiento disminuye algo; el momento alcanza su máximo y cae bruscamente.

c. Características artificiales

Las características artificiales se distinguen de las naturales en que en lugar de la

resistencia pura interna de la línea del rotor se introduce otra impedancia pura que representa la suma de las resistencias internas y exterior:

$$R_c = R_2 + R_{ad} \quad (3.61)$$

Ahora se examinará como depende el deslizamiento máximo de la resistencia pura de las líneas del rotor:

Si para la característica natural el deslizamiento máximo es:

$$S_{\max.\text{nat}} = \frac{R_2}{\sqrt{(R_1)^2 + (X_1 + X_2)'^2}} \quad (3.62)$$

Para las características artificiales:

$$S_{\max.\text{art}} = \frac{R_2 + R_{ad}}{\sqrt{(R_1)^2 + (X_1 + X_2)'^2}} \quad (3.63)$$

Se puede observar que el deslizamiento máximo artificial es tantas veces mayor que el natural.

d. Familia de características artificiales

Para obtener características mecánicas requeridas y los cálculos de las resistencias, es conveniente hacer uso de características construidas con fórmulas exactas.

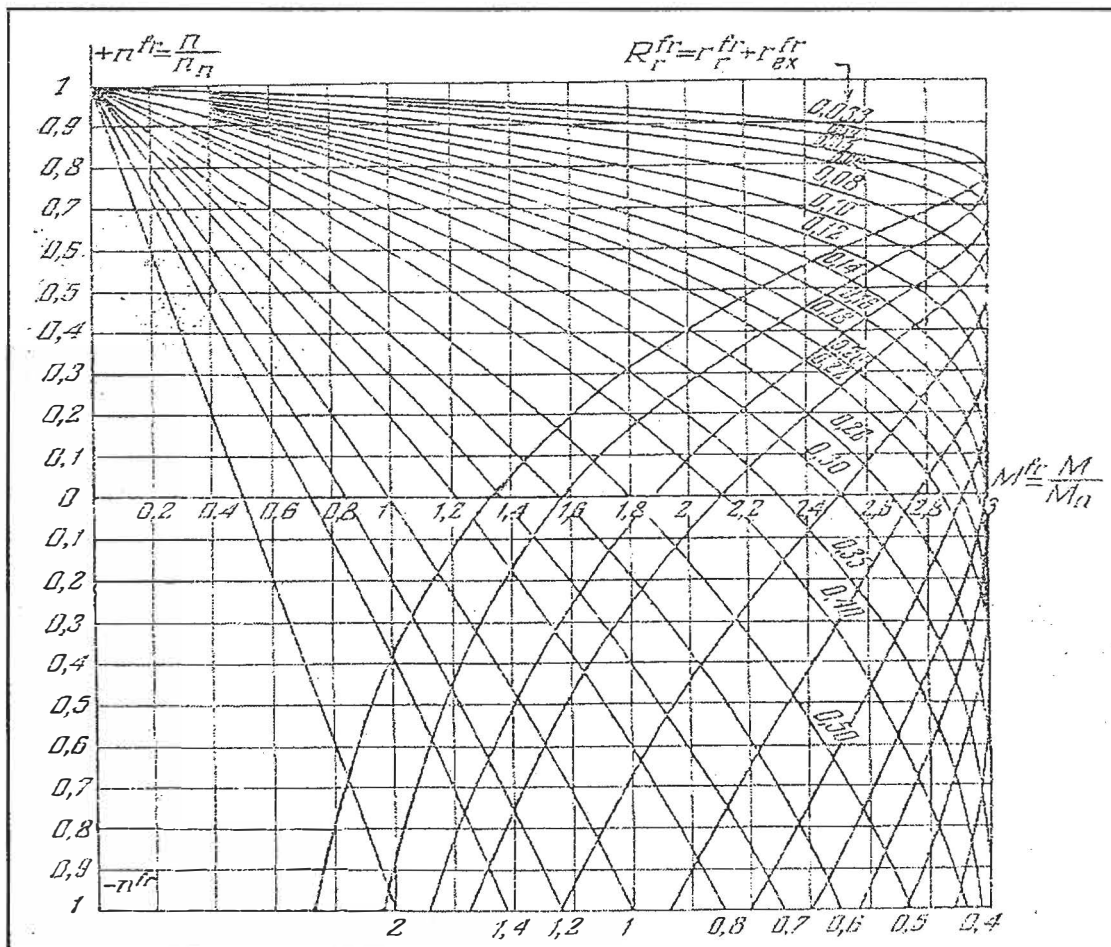


Fig. 3.13 Características mecánicas universales de motores asíncronos con rotor bobinado tipo MT.

e. Balance de potencias

La potencia que la máquina asíncrona de rotor bobinado, absorbe de la red (Figura 3.14):

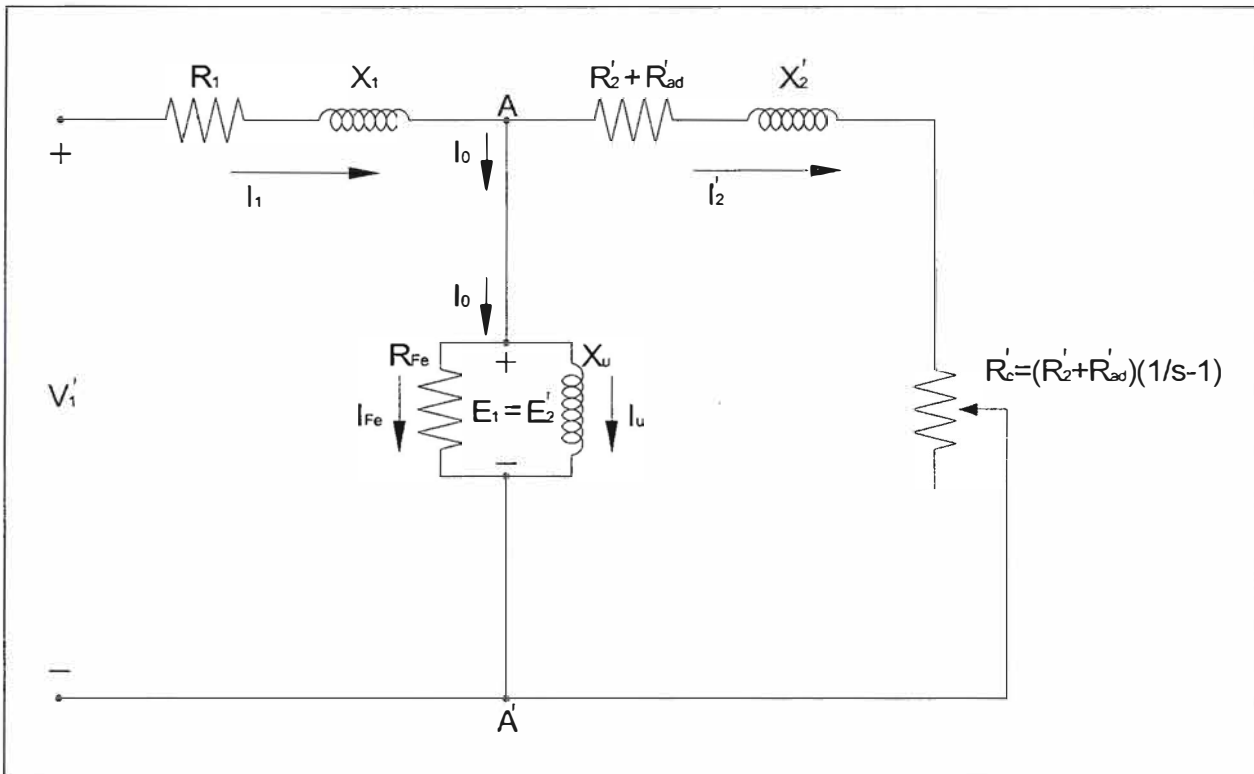


Fig. 3.14 Circuito equivalente del motor de rotor bobinado

$$P_1 = m_1 V_1 I_1 \cos \varphi_1 \quad (3.64)$$

Dónde:

m_1 = Número de fases del estator

V_1 = Tensión aplicada al estator por fase

I_1 = Corriente por fase que consume la máquina

φ_1 = Ángulo de desfase entre la corriente y tensión absorbidas.

- El efecto joule en los devanados del estator:

$$P_{cu1} = m_1 R_1 I_1^2 \quad (3.65)$$

- Pérdidas ferromagnéticas en la máquina:

En estas pérdidas solo serán consideradas las pérdidas en el estator, debido a que el deslizamiento es pequeño lo que indicaría que la frecuencia en el rotor sería muy pequeña.

$$P_{fe} = P_{fe1} = m_1 E_1 I_{fe} \approx m_1 V_1 I_{fe} \quad (3.66)$$

- Disipación de potencia total en el estator:

$$P_{p1} = P_{cu1} + P_{fe1} \quad (3.67)$$

- La potencia electromagnética que llegara al rotor por el entrehierro:

$$P_a = P_1 - P_{p1} = P_1 - P_{cu1} - P_{fe1} \quad (3.68)$$

- El efecto joule en los devanados del rotor:

$$P_{cu2} = m_2(R_1 + R_{ad})I_2^2 = m_1(R_2' + R_{ad}')I_2^2 \quad (3.69)$$

- La potencia que llegara al árbol de la máquina, se llamara potencia mecánica interna:

$$P_{mi} = P_a - P_{cu2} \quad (3.70)$$

$$P_{mi} = P_1 - P_{cu1} - P_{fe1} - P_{cu2} \quad (3.71)$$

- También fundamentando en que la disipación de potencia mecánica en la carga es:

$$P_{mi} = m_1 \left(R_2' \left(\frac{1}{s} - 1 \right) + R_{ad}' \right) I_2^2 \quad (3.72)$$

La potencia útil será entonces:

$$P_u = P_{mi} - P_m \quad (3.73)$$

Dónde P_m = Esta potencia mecánica disipada por efecto de rozamiento y ventilación.

f. Par de rotación

$$T = \frac{P_u}{2\pi \frac{n}{60}} = \frac{m_1 \left((R_2' + R_{ad}') \left(\frac{1}{s} - 1 \right) \right) I_2^2 - P_m}{2\pi \frac{n}{60}} \quad (3.74)$$

También se tiene presente que:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad ; \quad n = n_1(1-s) \quad (3.75)$$

Finalmente se tiene:

$$T = \frac{m_1 \left((R_2' + R_{ad}') \left(\frac{1}{s} - 1 \right) \right) I_2^2 - P_m}{2\pi \frac{n_1(1-s)}{60}} \quad (3.76)$$

Ahora, para calcular la corriente I_2 , se usa el diagrama equivalente aproximado:

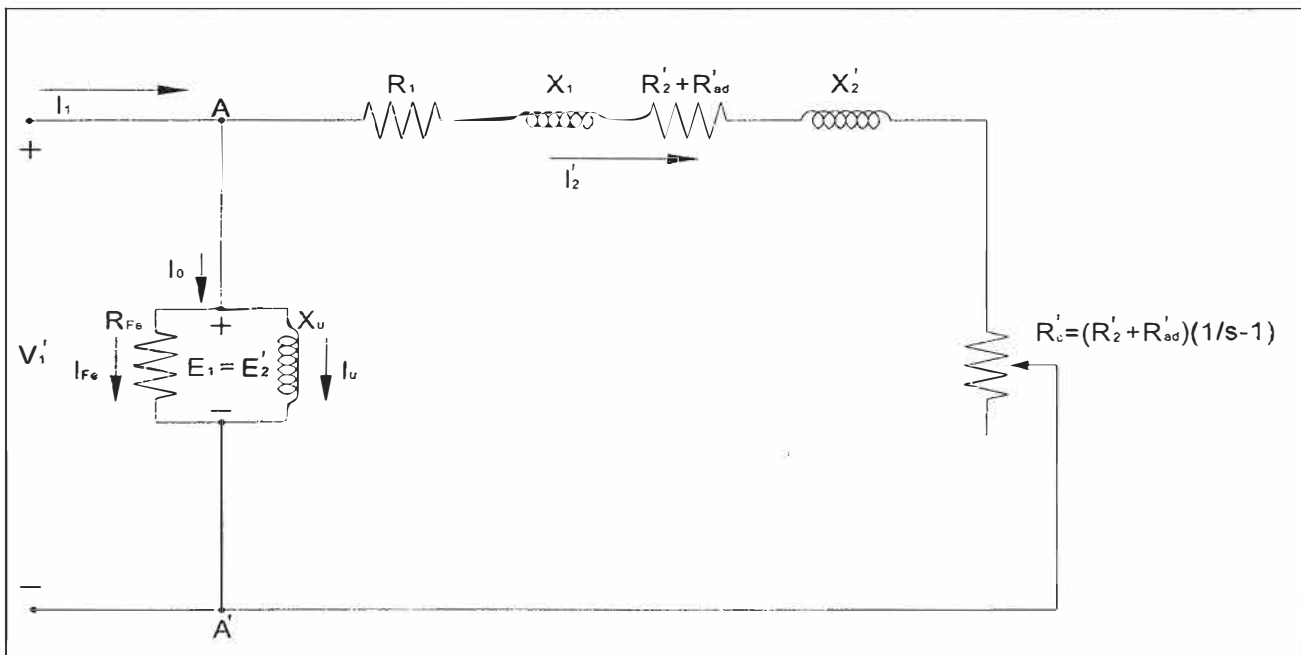


Fig. 3.15 Circuito equivalente aproximado para motor de rotor bobinado.

$$I_2' = \frac{V_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2 + R_{ad}}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2}} \quad (3.77)$$

Entonces se tiene:

$$T = \frac{m_1 \left((R_2' + R_{ad}) \left(\frac{1}{s} - 1 \right) \right) \left(\frac{V_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2 + R_{ad}}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2}} \right)^2 - P_m}{2\pi \frac{n_1(1-s)}{60}} \quad (3.78)$$

Se puede obviar $P_m=0$, obteniéndose finalmente:

$$T = \frac{m_1 \left((R_2' + R_{ad}) \left(\frac{1}{s} - 1 \right) \right) \left(\frac{V_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2 + R_{ad}}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2}} \right)^2}{2\pi \frac{n_1(1-s)}{60}} \quad (3.79)$$

$$T = m_1 \frac{(R_2' + R_{ad})}{2\pi \frac{n_1}{60} s} \frac{V_1^2}{\left(\left(R_1 + \frac{R_2 + R_{ad}}{s} \right)^2 + (X_1 + X_2')^2 \right)} \quad (3.80)$$

CAPÍTULO IV DETALLES DE WINCHE DE IZAJE A ANALIZAR

Se presenta datos técnicos del winche. Se toca los siguientes aspectos: Parte mina, parte eléctrica, parte mecánica.

4.1 Parte mina

Se presenta el esquema de casa winche (Figura 4.1) y las características de la parte minera.

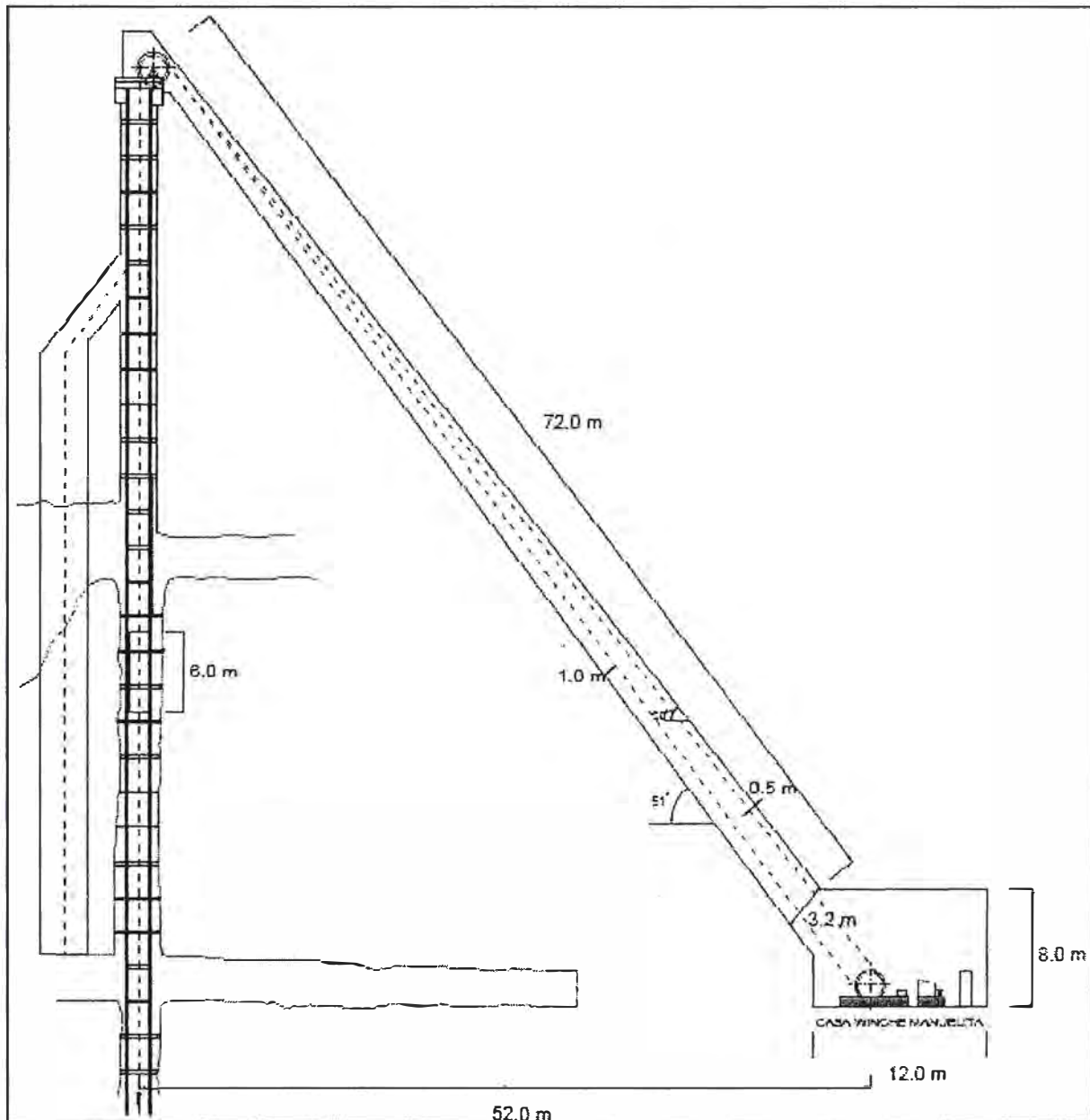


Figura 4.1 Esquema de casa winche

Tabla 4.1 Características de la parte minera [8]

| | |
|-------------------------------|--|
| Profundidad del pique | 555 metros (1820.866 ft). |
| Longitud de izaje | 520 metros (1706.036 ft). |
| Producción de mina | 1000 tm/día. |
| Horas efectivas | 11.0 horas. |
| Capacidad del skip-Jaula | 3.11 tm. |
| Capacidad de la Jaula | 8 - 16 personas (incluido timbrero). |
| Sistema de izaje | Balanceado. |
| Inclinación | Vertical |
| Ubicación | Unidad Minera Manuelita. |
| Altura sobre el nivel del mar | 4 476 metros. |
| Tiempo entre izaje e izaje | Depende del nivel de carga y descarga. |
| Velocidad del skip | Según normalización del MEM. |

4.2 Parte eléctrica

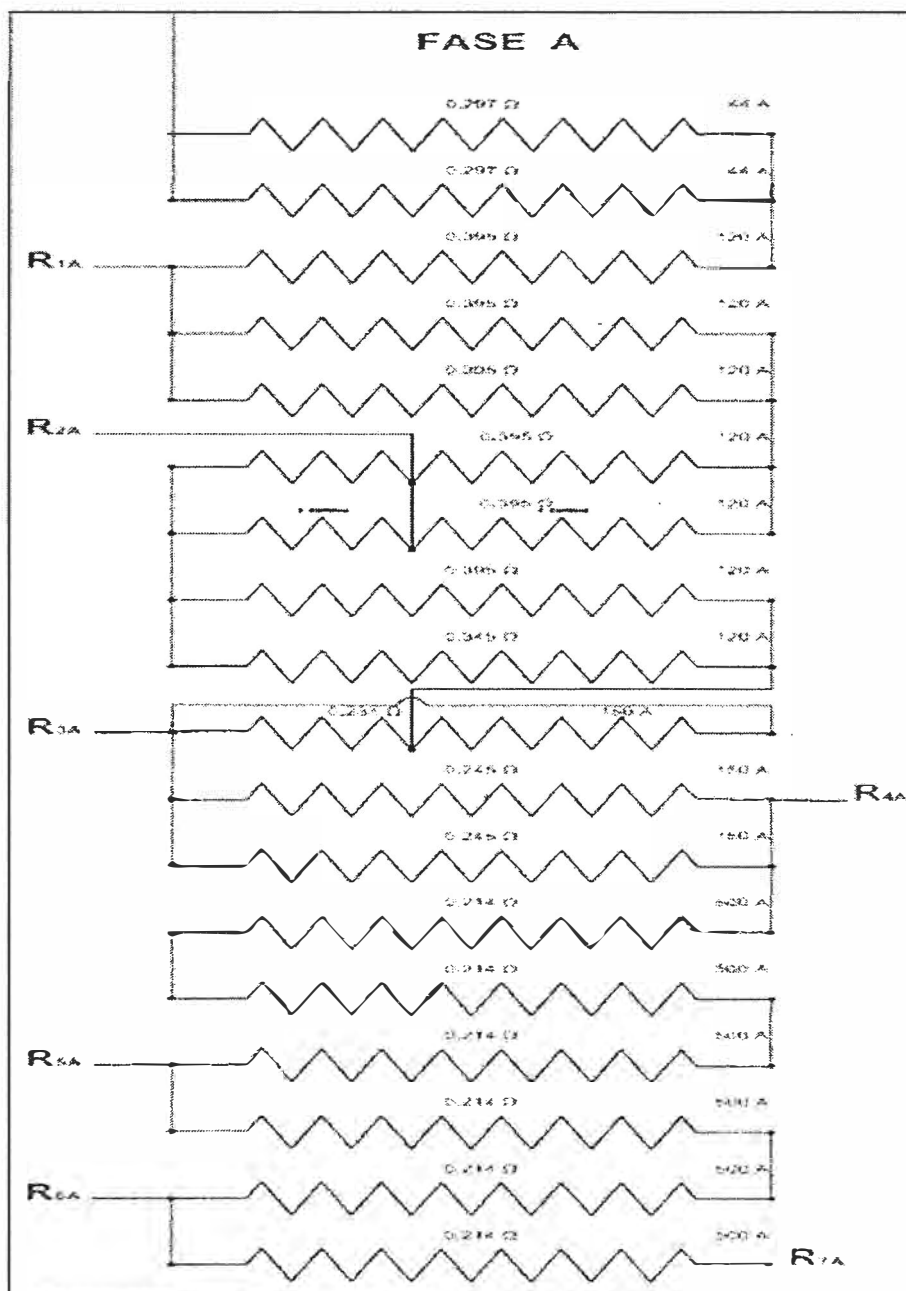


Fig.4.2 Grafica de arreglo de banco de resistencias de la fase A, en el caso de la fase B y fase C se cumple igual arreglo.

Tabla 4.2 Características de la parte eléctrica [8]

| a) Motor eléctrico | Datos Tomados en campo |
|---|---|
| Motor de anillos deslizantes | |
| Marca | GENERAL ELECTRIC |
| Tipo | MT |
| Frame | 17B |
| Modelo | 86688A |
| Número de Serie | 680440 |
| Potencia | 440 HP |
| Tensión de estator | 2300 voltios AC |
| Tensión de rotor | 460 voltios |
| Clase de aislamiento de las bobinas del rotor | H |
| Clase de aislamiento de las bobinas del estator | H |
| Fase | Trifásico |
| Montaje | Horizontal |
| Salida de borneras | Existentes |
| Corriente de estator | 98 Amperios |
| Corriente de rotor | 395 Amperios |
| Velocidad | 585 rpm |
| Número de polos | 12 polos |
| Número de cojinetes | 2 |
| Frecuencia | 60 Hz |
| Factor de servicio | 1.15 |
| b) Rodamientos | |
| Lado transmisión | 22226 E |
| Lado opuesto transmisión | 22222 E |
| c) Resistencias | |
| Tipo | Fierro fundido |
| Se encuentra cuatro valores en los bancos de resistencias para lograr los 7 puntos de corte y así obtener determinada velocidad y torque. | |
| Banco de resistencia | 0.297 ohmios y 44 amperios, tipo UNA-FORM y marca CLARK. |
| Banco de resistencia 2 | 0.395 ohmios y 120 amperios, tipo UNA-FORM y marca CLARK. |
| Banco de resistencia 3 | 0.245 ohmios y 150 amperios, tipo UNA-FORM y marca CLARK. |
| Banco de resistencia 4 | 0.214 ohmios, 500 amperios, tipo TW500-D, clase 6715 y marca d tabWeld. |

4.3 Parte mecánica

La Tabla 4.1 muestra las características de la parte mecánica. Se tocan los siguientes aspectos: Cable de acero, tambora, winche, freno, sistema de control, skip-jaula, compresora.

Tabla 4.3 Características de la parte mecánica [8]

| | |
|---|---|
| a) Cable de acero | |
| Tipo de Cable | Round Strand 6x19 |
| Diámetro | 1" (26.0 mm) |
| Resistencia a la ruptura | 41.8 toneladas |
| Factor de Seguridad | |
| Para Personal | 10.66 |
| Para Carga | 6.51 |
| Masas reducidas | 4.5 |
| Peso aproximado | 2.5 Kg/m |
| Longitud del cable desde la tolva de carga hasta el volteo del skip | 530 metros (1738.845 ft) |
| Longitud de empalmes y amarres | 38.28 metros (125.6 ft) |
| b) Tambora | |
| Diámetro | 72" |
| Cara | 60" |
| Tipo | Winche con doble tambor embragado c/u. Mejora independencia entre cada compartimiento (entre niveles y da mayor seguridad). |
| c) Winche | |
| Marca | CANADIAN INGERSOLL RAND |
| Medida | 72" x 60" |
| Tipo | Double drum hoist (winche de doble tambor). |
| Velocidad de tambor | 62.56 r.p.m. |
| Velocidad de cable | 1.240 pies/min. (378.8m/min.). |
| Tipo de tambor | Doble paralelo ranurado para cable de acero 1". |
| Catalina | Doble helicoidal de 187 dientes. |
| Piñón | Doble helicoidal de 20 dientes. |
| Diámetro del eje principal del tambor | 10 1/2" |
| d) Freno | |
| Tipo | Freno paralelo neumático. |
| Accionamiento | Manual por medio de palanca de mano. |
| e) Sistema de control | |
| Tipo | Lilly control |
| Modelo | D |
| Marca | LOGAN |
| f) Skip-jaula | |
| Fabricante | Nacional |
| Peso | 2440 kg |
| Material | Acero |
| Año de fabricación | 2009 |
| Cantidad de skips-jaula | 2 |
| g) Compresora | |
| Potencia eléctrica | 15 Hp |
| Tensión de alimentación | 440 voltios |

CAPÍTULO V CÁLCULOS MECÁNICOS

Para realizar el cálculo del tiempo de aceleración y desaceleración se utiliza la Tabla 5.1 (construida en función de datos tomados en mina y el reglamento de seguridad e higiene minera), cabe mencionar que los tiempos asumidos se aproximan de manera sorprendente con los tomados en la práctica utilizando cronometro y que se indicará más adelante. Es bueno resaltar que los valores de tiempo de aceleración y desaceleración se basaran en esta tabla para hacer todo el cálculo mecánico.

Tabla 5.1 Características de trabajo MINE PLANT DESIGN – W.W.Stanley [6]

| | | | | | |
|-------------------------------------|--------------------------------------|------------|-------------|-------------|---------|
| Profundidad(pies) | 500 | 500 - 1000 | 1000 - 2000 | 2000 - 2500 | 3000 |
| Factor de seguridad estático | 8 | 7 | 6 | 5 | 4.75 |
| Velocidad recomendada(pies/min) | 600 - 900 | 600 - 1200 | 900 - 1800 | 1200 - 1240 | 1500 |
| Tiempo de aceleración (seg.) | 5 - 10 | 8 - 12 | 10 - 15 | 12 - 20 | 12 - 20 |
| Aceleración(pies/seg ²) | 1 - 3 | 1 - 3 | 1 - 35 | 1 - 4 | 1.5 - 6 |
| Tiempo de desaceleración (seg.) | 50% - 100% del tiempo de aceleración | | | | |

De acuerdo a la tabla de del MINE PLANT DESIGN – Stanley, el emplazamiento se ubica a 1640.42pies (500 metros de profundidad). Por lo que se elige:

Ta = Tiempo de aceleración

Td = Tiempo de desaceleración

Para los cálculos de tiempos de aceleración y desaceleración, se realizó interpolando la Tabla y se comprobó tomando tiempos con cronometro en el funcionamiento del winche de izaje.

Tabla 5.2 Tiempos de aceleración y desaceleración para cada nivel de la mina tomada de las características de trabajo MINE PLANT DESING – Stanley [6].

| Nivel | unidad | Nv. 240 | Nv. 315 | Nv. 385 | Nv. 450 | Nv. 500 |
|------------------------------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Profundidad (metros) | m | 240 | 315 | 385 | 450 | 500 |
| Profundidad (pies) | pie | 787 | 1033 | 1263 | 1476 | 1640 |
| Tiempo de aceleración Ta (seg.) | seg. | 10.30 | 10.17 | 11.32 | 12.38 | 13.20 |
| Tiempo de desaceleración Td (seg.) | seg. | 10.30 | 10.17 | 11.32 | 12.38 | 13.20 |

5.1 Cinemática de la extracción

En esta sección se muestra el diagrama de velocidad y se explica la dinámica de extracción

5.1.1 Diagrama de velocidad

De acuerdo con la altura de extracción H y la duración de una cordada T . Se deben determinar los elementos de la cinemática: velocidades, aceleraciones y duración de los diversos periodos.

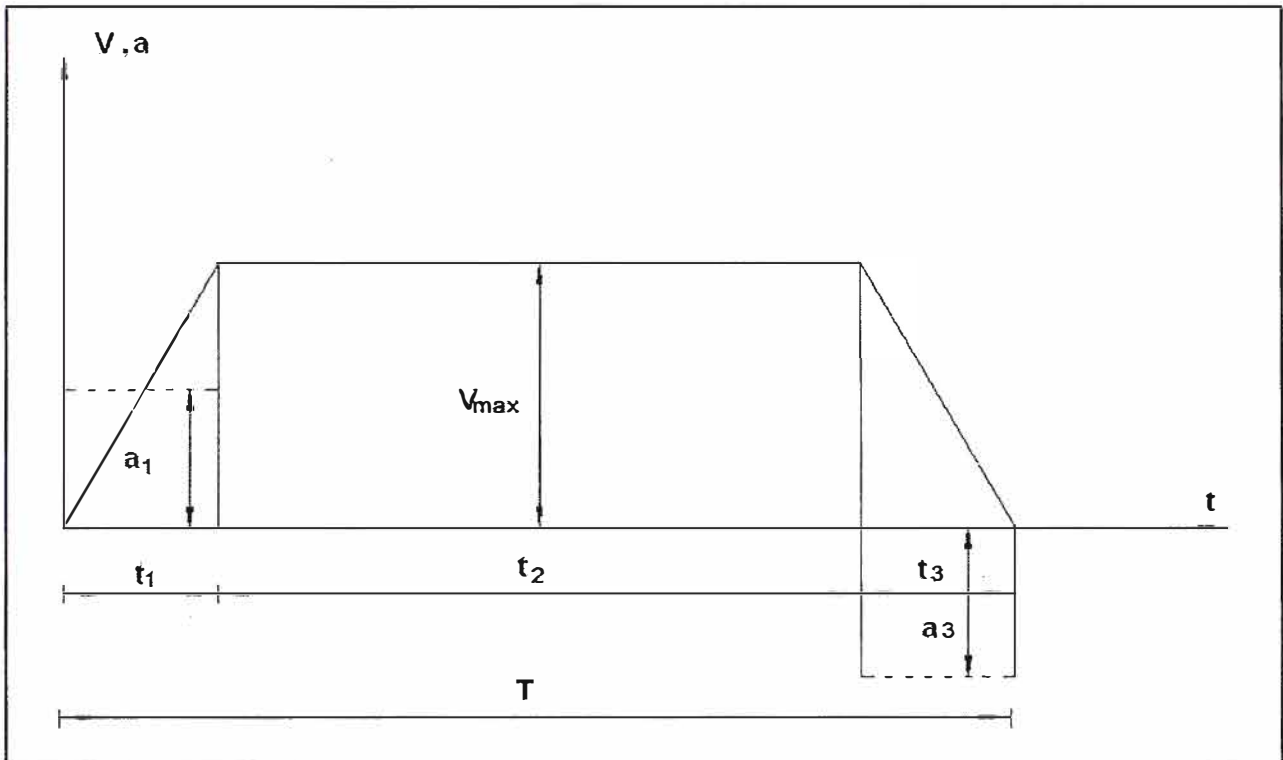


Fig. 5.1 Diagrama trapezoidal de la velocidad en extracción con skip-jaula

Este tipo de diagrama se emplea en extracción por motor asíncrono. Consta de 3 periodos claramente visibles.

- **Primer periodo t_1** , que es un movimiento uniformemente acelerado.
- **Segundo periodo t_2** , que es un movimiento a velocidad constante.
- **Tercer periodo t_3** , que es un movimiento de retardación constante.

A continuación se determina la velocidad máxima V_{max} . Como conocemos que el producto $v \times t$ es igual al camino, la superficie del diagrama es igual a la altura de extracción.

$$H = \frac{V_{max} t_1}{2} + V_{max} t_2 + \frac{V_{max} t_3}{2} \quad (5.1)$$

Y como:

$$t_1 + t_2 + t_3 = T \quad (5.2)$$

Entonces:

$$H = \frac{T + t_2}{2} V_{\max} = \frac{2T - t_1 - t_3}{2} V_{\max} \quad (5.3)$$

Además:

$$t_1 = \frac{V_{\max}}{a_1} \quad (5.4)$$

$$t_3 = \frac{V_{\max}}{a_3} \quad (5.5)$$

De donde se puede observar a_1 y a_3 aceleración y retardación.

$$H = \frac{2T - \frac{V_{\max}}{a_1} - \frac{V_{\max}}{a_3}}{2} V_{\max} \quad (5.6)$$

$$2H = 2TV_{\max} - V_{\max}^2 \left(\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_3} \right) \quad (5.7)$$

$$V_{\max}^2 - 2 \left(\frac{a_1 a_3}{a_1 + a_3} \right) TV_{\max} + 2 \left(\frac{a_1 a_3}{a_1 + a_3} \right) H = 0 \quad (5.8)$$

$$V_{\max} = \left(\frac{a_1 a_3}{a_1 + a_3} \right) T - \sqrt{\left(\left(\frac{a_1 a_3}{a_1 + a_3} \right) T \right)^2 - \left(2 \left(\frac{a_1 a_3}{a_1 + a_3} \right) H \right)} \quad (5.9)$$

Los elementos restantes del diagrama de velocidad:

Tiempos parciales:

$$t_1 = \frac{V_{\max}}{a_1} \quad (5.10)$$

$$t_2 = \frac{2H}{V_{\max}} - T \quad (5.11)$$

$$t_3 = \frac{V_{\max}}{a_3} \quad (5.13)$$

Caminos parciales

$$h_1 = \frac{V_{\max} t_1}{2} = \frac{V_{\max}^2}{2a_1} \quad (5.14)$$

$$h_2 = V_{\max} t_2 \quad (5.15)$$

$$h_3 = \frac{V_{\max} t_3}{2} = \frac{V_{\max}^2}{2a_3} \quad (5.16)$$

5.1.2 Dinámica de la extracción

Durante el funcionamiento de la máquina de extracción, el momento aplicado al árbol de su órgano de arrollamiento M_m , a cada instante es igual a la suma de los momentos siguientes:

$$M_m = M_{st} + M_r + M_d \text{ (kgm)} \quad (5.17)$$

Dónde:

M_{st} = Momento estático producido por las cargas contenidas en las jaula-skip.

M_r = Momento de resistencias pasivas de la instalación.

M_d = Momento dinámico correspondiente a la aceleración de las masas.

En esta sección se desarrolla los siguientes aspectos:

- Momento Estático
- Momento de resistencias pasivas
- Momento dinámico
 - Dinámica de la máquina de extracción con radio de arrollamiento constante
 - Determinación de la suma de masas reducidas
 - Determinación previa de la potencia del motor
 - Dinámica de la instalación de extracción por jaulas
 - Diagrama trapezoidal de esfuerzos y de potencias
 - Aplicación

a. Momento Estático

El momento resultante en el árbol del órgano de arrollamiento por la acción de la diferencia de las tensiones estáticas de los cables ascendente y descendente se determina por:

$$M_{st} = [Q_u + Q_m + p_1(H - x_a + H_c - l_1 \text{sen} \varphi_1)]R_a - [Q_m + p_1(x_d + H_c - l_2 \text{sen} \varphi_2)]R_d \quad (5.18)$$

Dónde:

Q_u = Carga útil del recipiente, kg.

Q_m = Peso del recipiente, kg.

p_1 = Peso lineal del cable de extracción, kg/m.

H = Altura de extracción, m.

x_a y x_d = Caminos recorridos por los recipientes ascendente y descendente, m.

H_c = Altura entre la polea y área de carga.

R_a y R_d = Radios de arrollamiento de los cables ascendente y descendente, m.

$l_1 \approx l_2$ = Distancia entre el eje de la máquina de extracción y la polea, m.

$\varphi_1 \approx \varphi_2$ = Ángulo de inclinación de los cables de extracción, grados.

b. Momento de resistencias pasivas

Las resistencias pasivas de la instalación se deben a la resistencia opuesta por el aire y los rozamientos de los recipientes de extracción sobre las guideras y en los cojinetes. Para valuar estas resistencias se han creado numerosas fórmulas empíricas.

$$M_r = kM_{sr} \text{ (kgm)} \quad (5.19)$$

c. Momento dinámico

La energía cinética del sistema es igual a la suma de las energías cinéticas de todos los elementos que intervienen en el mismo.

$$\frac{1}{2} \sum m v^2 = \frac{1}{2} \sum m (wr)^2 = \frac{1}{2} \sum m w^2 r^2 = \frac{I w^2}{2} \quad (5.20)$$

m = Masa de los elementos

$v = wr$ = Velocidad tangencial, m/seg.

$w = \frac{d\varphi}{dt}$ = Velocidad angular, 1/seg.

φ = Ángulo de giro del tambor en el tiempo, t.

r = Radio de rotación del elemento considerado, m.

$I = \sum m r^2$ = momento de inercia total de todos los elementos en movimiento de la máquina de extracción, con respecto al eje del tambor.

La variación de fuerza viva.

$$\int_0^\varphi M_d d\varphi = \int_0^t M_d w dt = \frac{I w^2}{2} \quad (5.21)$$

Se procede a derivar la expresión anterior:

$$M_d w = \frac{1}{2} \left(2I w \frac{dw}{dt} + w^2 \frac{dI}{dt} \right) \quad (5.22)$$

Dónde: $\frac{dw}{dt}$ aceleración angular, 1/seg²

De aquí:

$$M_d = I \frac{dw}{dt} + \frac{w dI}{2 dt} \quad (5.23)$$

En la práctica industrial frecuentemente la noción del momento de inercia I se reemplaza por PD^2 que se expresa por:

$$I = \sum m r^2 = \frac{\sum P D^2}{g \cdot 4} = \frac{P D^2}{4g} \quad (5.24)$$

$$P D^2 = 4gI \quad (5.25)$$

De donde P es el peso reducido del sistema referido al diámetro D . Estas últimas expresiones se pueden interpretar como que el momento de inercia del sistema con respecto al eje es igual al momento de inercia de una masa P/g situada a una distancia $D/2$ de este eje.

d. Dinámica de la máquina de extracción con radio de arrollamiento constante

A estos casos pertenecen las máquinas de extracción con tambores cilíndricos y con polea Koepe.

En vista de la constancia del radio de arrollamiento $R = \text{constante}$, la ecuación de extracción toma la forma:

$$M_m = M_{st} + M_r + I \Psi \quad (\text{kgm}) \quad (5.26)$$

Ya que $dI = 0$ con $r = \text{const.}$

Por otra parte se puede escribir:

$$M_m = F_m R; M_{st} = F_{st} R; M_r = X R; I = \sum m R^2 \quad (5.27)$$

De donde:

F_m = Esfuerzo motor en la circunferencia del tambor.

X = Resistencias al movimiento de los recipientes de extracción.

Después de la sustitución se obtiene:

$$F_m R = F_{st} R + X R + \sum m R^2 \Psi \quad (5.28)$$

Obsérvese que $R\Psi = a$, que es la aceleración lineal.

$$F_m = F_{st} + X + \sum m a \quad (5.29)$$

El esfuerzo estático para una instalación con cable inferior es igual:

$$F_{st} = F_a - F_d \quad (5.30)$$

Dónde:

F_a = Tensión estática del cable cargado ascendente, kg.

F_d = Tensión estática del cable descendente, kg.

$$F_a = Q_u + Q_m + p_1 (x_d + H_c + l_1 \text{sen} \varphi_1) \quad (5.31)$$

$$F_d = Q_m + p_1 (H - x_a + H_c + l_2 \text{sen} \varphi_2) \quad (5.32)$$

$$F_{st} = Q_u + p_1 (x_d + x_a - H + l_1 \text{sen} \varphi_1 - l_2 \text{sen} \varphi_2) \quad (5.33)$$

Aquí se considera que: $\varphi_1 \approx \varphi_2 \approx \varphi$ (Para el caso esto también se presenta).

El segundo miembro de la ecuación generalmente se valúa en tanto por ciento de la carga útil.

$$X = k Q_u \quad (5.34)$$

Para la extracción por dos jaulas se toma $k = 0.2$ y para la extracción por dos skips $k = 0.15$.

e. Determinación de la suma de masas reducidas

Las siguientes expresiones permitirán la determinación de las masas reducidas de todas las partes en movimiento de la instalación de extracción con 2 tambores cilíndricos, reducida al perímetro del arrollamiento.

$$\sum m = \sum \frac{P}{g} \quad (5.35)$$

De donde:

$\sum P$ = Suma de los pesos reducidos de todas las partes en movimiento, cuyo valor es:

$$\sum P = Q_u + 2Q_m + 2P_1 + 2P_p + 2P_t + P_r + P_e \quad (5.36)$$

P_1 = Peso del cable de extracción, kg.

P_p = Peso reducido de la polea del castillete, kg.

P_t = Peso reducido del tambor, kg.

P_r = Peso reducido del rotor, kg.

P_e = Peso reducido del engranaje, kg.

El largo total del cable de extracción: $L_c = H + H_c + l + h_r + 4\pi D_t$, m.

De donde:

H = Altura de extracción, m.

H_c = Altura del castillete, m.

l = Largo de la cuerda, m.

h_r = Largo del trozo de reserva, m.

$4\pi D_t$ = Cuatro vueltas de fijación, m.

Los valores de carga útil Q_u , peso del recipiente de extracción y de las vagonetas vacías Q_m , peso del cable de extracción P_1 , están sobre el perímetro de arrollamiento del cable; por eso su peso reducido es igual al peso real.

El peso reducido de la polea, es igual:

- Para poleas con forro de madera

$$P_p = 150D_p^2 \quad (5.37)$$

- Para poleas con forro metálico

$$P_p = 170D_p^2 \quad (5.38)$$

- Para poleas de tipo aliviado

$$P_p = 90D_p^2 \quad (5.39)$$

De donde D_p diámetro de polea, m.

Tabla 5.3 Pesos reducidos de poleas [1]

| Diámetro de polea m | Con forro de madera kg | Con forro metálico kg |
|---------------------|------------------------|-----------------------|
| 3 | 1400 | 1750 |
| 4 | 2200 | 2710 |
| 5 | 3715 | 4360 |
| 6 | 5480 | 6250 |

El peso reducido de los tambores cilíndricos se puede determinar por las siguientes fórmulas:

- Para tambor único para dos cables.

$$P_r = (140+75B)D_t^2, \text{ kg.} \quad (5.40)$$

- Para cada uno de los dos tambores cilíndricos.

$$P_r = (132+75B)D_t^2, \text{ kg.} \quad (5.41)$$

De donde:

B = Ancho del tambor, m.

D_t = Diámetro del tambor, m.

Tabla 5.4 Pesos reducidos de tambores cilíndricos para máquinas de extracción de dos tambores [1].

| diámetro (m) | ancho (m) | peso reducido de cada tambor (kg) |
|--------------|-----------|-----------------------------------|
| 2.5 | 0.75 | 1100 |
| | 1 | 1600 |
| 3 | 1 | 2000 |
| | 1.3 | 2600 |
| 3.5 | 1.5 | 4200 |
| 4 | 1.7 | 5700 |
| 5 | 1.7 | 7600 |
| | 2.3 | 10300 |
| 6 | 2.4 | 14800 |

Para determinar el peso reducido del rotor P_r del motor, se escribe la relación.

$$\frac{Iw^2}{2} = \frac{I'w_t^2}{2} \quad (5.42)$$

De donde:

I = Momento e inercia del rotor con respecto a su eje.

I' = Momento de inercia del rotor, reducido al eje del tambor.

De la ecuación, se obtiene:

$$I' = I \frac{w^2}{w_1^2} \quad (5.43)$$

De donde:

$w/w_1 = i$, relación de reducción.

$$I = \sum mR^2 = \frac{\sum P}{g} \left(\frac{D}{2}\right)^2 = \frac{(PD^2)}{4g} \quad (5.44)$$

$$I' = P_r \frac{D_r^2}{4g} \quad (5.45)$$

Entonces:

$$P_r = \frac{(PD^2)i^2}{D_t^2} \quad (5.46)$$

A continuación se dan los valores de PD^2 en el gráfico siguiente, para motores eléctricos de extracción. Curvas de momentos de inercia de los rotores de motores asíncronos.

El peso reducido de la transmisión se determina en tanto por ciento del peso reducido del rotor y se toma igual a 20% para engranaje simple y de 25 a 40% para engranaje doble. La tabla 5.5 muestra Valores de PD^2 de los motores eléctricos.

Tabla 5.5 Valores de PD^2 de los motores eléctricos [1]

| Potencia cv | Velocidad de rotación rpm | Del rotor kg.m2 |
|--|---------------------------|-----------------|
| motores trifásicos | | |
| 300 | 500 | 500 |
| 860 | 500 | 1450 |
| 1500 | 500 | 4700 |
| 370 | 375 | 950 |
| 1500 | 375 | 7000 |
| 340 | 300 | 1450 |
| 600 | 300 | 4500 |
| 1000 | 300 | 5000 |
| 1500 | 300 | 19000 |
| Motores de corriente continua de baja velocidad | | |
| 860 | 51.1 | 56000 |
| 1100 | 38.2 | 65000 |
| 2000 | 51 | 125000 |
| 2800 | 49 | 200000 |
| 3600 | 38.4 | 320000 |
| 4400 | 69 | 180000 |
| Motores de corriente continua de alta velocidad | | |
| 750 | 500 | 1000 |
| 950 | 500 | 1600 |
| 1000 | 260 | 5200 |
| 1500 | 550 | 3300 |
| 2600 | 600 | 8200 |
| 3770 | 400 | 17000 |

f. Determinación previa de la potencia del motor

La potencia del motor de extracción que podría orientarnos a elegir uno de similar potencia se podría determinar de la siguiente forma:

$$N = \frac{kQ_u H Q}{102T\eta} \quad (5.47)$$

Dónde:

k = Coeficiente de resistencia del pozo

Q_u = Carga útil, kg.

H = Altura de extracción, m.

T = Tiempo de una cordada, seg.

Q = Característica del régimen dinámico 1.4-1.5 para extracción con jaulas y 1.2 – 1.4 para extracción con skips.

η = Rendimiento de la transmisión: 0.92 para engranaje simple y 0.85 para engranaje doble.

El número de revoluciones del tambor:

$$n_t = \frac{60V_{\max}}{\pi D_t} \quad (5.48)$$

Y como:

$$n_m = i n_t \quad (5.49)$$

Se puede fijar el número de revoluciones del motor n_m y la relación de reducción "i". Si $i < 12$, se adopta la transmisión simple y con $i > 15$, se adopta la transmisión doble.

g. Dinámica de la instalación de extracción por jaulas

La dinámica de la instalación de extracción, se enfoca en determinar los esfuerzos y momentos de acuerdo a una cinemática dada.

Según la ecuación dinámica de la instalación de extracción con radio de arrollamiento constante.

$$F_m = (1+k)Q_u - p(H - 2x + l_1 \text{sen}\varphi_1 - l_2 \text{sen}\varphi_2) + \sum ma \quad (5.50)$$

Los esfuerzos a producir por el motor en diferentes instantes de la extracción, serán diferentes, lo que se debe al cambio de los dos últimos miembros.

h. Diagrama trapezoidal de esfuerzos y de potencias

Al comienzo del primer periodo (de aceleración): $x=0$ y $a=a_1$ y la ecuación se transforma en:

$$F_1 = (1+k)Q_u - p_1(H) + \sum ma_1 \quad (5.51)$$

Al final del primer periodo:

$$x = \frac{a_1 t_1^2}{2} = h_1 \quad (5.52)$$

$$a = a_1 \quad (5.53)$$

Entonces se tendrá:

$$F_1' = (1+k)Q_u + p_1(H - 2h_1) + \sum ma_1 \quad (5.54)$$

En el primer periodo el esfuerzo F_1 se cambia según una parábola (ya que $x = \frac{a_1 t_1^2}{2}$), pero por ser la curvatura de poca importancia, en el diagrama de esfuerzos los puntos F_1 y F_1' pueden unirse por una recta.

Al comienzo del segundo periodo (de marcha a velocidad constante). $x=h_1$ y $a=0$, por lo cual:

$$F_2 = (1 + k)Q_u + p_1(H - 2h_1) \quad (5.55)$$

Al final del segundo periodo $x = h_1 + h_2$, donde $h_2 = V_{\max}t_2$ y $a=0$ y la ecuación:

$$F_2' = (1 + k)Q_u + p_1(H - 2(h_1 + h_2)) \quad (5.56)$$

El cambio del esfuerzo en el segundo periodo se hace según una línea recta. Al comienzo del tercer periodo:

$$x = h_1 + h_2 \quad (5.57)$$

$$a = -a_3 \quad (5.58)$$

De donde:

$$F_3 = (1 + k)Q_u + p_1(H - 2(h_1 + h_2)) - \sum ma_3 \quad (5.59)$$

Al final del tercer periodo;

$$x = h_1 + h_2 + h_3 = H \quad (5.60)$$

$$h_3 = \frac{a_3 t_3^2}{2} \quad (5.61)$$

$a = -a_3$, entonces

$$F_3' = (1 + k)Q_u - p_1(H) - \sum ma_3 \quad (5.62)$$

El cambio del esfuerzo en el tercer periodo, de igual modo que en el primer periodo, se hace según una parábola.

En relación con el valor de $\sum ma$, F_3 puede ser positivo o negativo. La potencia aplicada al árbol del tambor, se calcula por la fórmula:

$$N = \frac{Fv}{102} \quad (5.63)$$

Al comienzo del primer periodo $F=F_1$ y como $v=0$, entonces $N_1=0$. Al final del primer periodo, $F_m=F_1'$ y $v=V_{\max}$, de aquí la potencia es igual a:

$$N_1' = \frac{F_1' V_{\max}}{102} \quad (5.64)$$

Al comienzo del segundo periodo, $F_m = F_2$ y $v = V_{\max}$, por esto

$$N_2 = \frac{F_2 V_{\max}}{102} \quad (5.65)$$

Al final del segundo periodo, $F_m = F_2'$ y $v = V_{\max}$, entonces.

$$N_2' = \frac{F_2' V_{\max}}{102} \quad (5.66)$$

Al comienzo del tercer periodo, $F_m = F_3$ y $v = V_{\max}$, por esto:

$$N_3 = \frac{F_3 V_{\max}}{102} \quad (5.67)$$

Al final del tercer periodo $F_m = F_3$ y $v = 0$, entonces $N_3 = 0$.

i. Aplicación

Con la base teórica expuesta, se procede a realizar los cálculos respectivos en una aplicación. Para ello se utiliza el diagrama de la Figura 2.5.

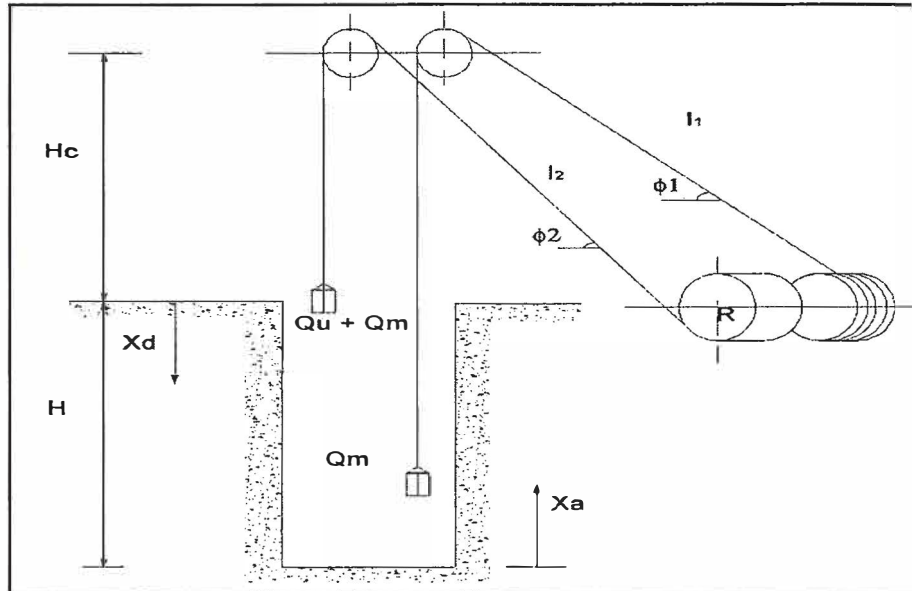


Fig. 5.2 Sistema que es analizado

Se hace un análisis para las fuerzas ascendentes y descendentes:

$$F_d = Q_u + Q_m + p(x_d + H_c + l_1 \sin \varphi_1) \quad (5.68)$$

$$F_a = Q_m + p(H - x_a + H_c + l_2 \sin \varphi_2) \quad (5.69)$$

Dónde:

F_a = Tensión estática del cable cargado ascendente, kg.

F_d = Tensión estática del cable descendente, kg.

Q_u = Carga útil (peso de las personas transportadas, kg).

Q_m = Carga de los skips, kg.

p = Peso lineal del cable de izaje, kg/m.

x_a, x_d = Distancia recorrida por el cable de acero, m.

H = Altura de extracción, m.

H_c = Altura del castillete, m.

φ_1, φ_2 = Ángulo de inclinación de los cables de extracción, grados.

l_1, l_2 = Distancia entre el eje de la máquina de extracción y la polea, m.

Finalmente se tiene:

$$F_m = (k - 1)Q_u + p(H - 2x + l_2 \sin \varphi_2 - l_1 \sin \varphi_1) \quad (5.70)$$

Esta fórmula será la base para calcular la fuerza F_m (esfuerzo motor en la circunferencia del tambor), par de la carga, potencia de la carga, desplazamiento de la

carga en los diferentes niveles a analizar (Nv. 240, Nv. 315, Nv. 385, Nv. 450 y Nv. 500).

Tabla 5.6 Tabla general de trabajo [8]

| | | | | | | |
|---|-------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Profundidad del pique | metros | 520 | 520 | 520 | 520 | 520 |
| Longitud de izaje | metros | 240 | 315 | 385 | 450 | 500 |
| Producción diaria | ton/día | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| Horas efectivas | horas | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 |
| Capacidad del skip-jaula | toneladas | 3.11 | 3.11 | 3.11 | 1 | 3.11 |
| Altura sobre el nivel del mar | metros | 4476 | 4476 | 4476 | 4476 | 4476 |
| Rendimiento | skip/hora | 29.23 | 29.23 | 29.23 | 29.23 | 29.23 |
| Producción de izaje | ton/hora | 96.96 | 96.96 | 96.96 | 96.96 | 96.96 |
| Diámetro del cable | metros | 0.0254 | 254 | 0.0254 | 0.0254 | 0.0254 |
| Peso lineal del cable | kg.-f/metro | 2.69 | 2.69 | 2.69 | 2.69 | 2.69 |
| Peso del skip-jaula | kg.-f | 2449.4 | 2449.4 | 2449.4 | 2449.4 | 2449.4 |
| Peso de personal en skip-jaula | kg.-f | 1451.52 | 1451.52 | 1451.52 | 1451.52 | 1451.52 |
| Resistencia de ruptura del cable | kg.-f | 41800 | 41800 | 41800 | 41800 | 41800 |
| Factor de seguridad de la carga | | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 |
| Factor de seguridad de personal | | 10.66 | 10.66 | 10.66 | 10.66 | 10.66 |
| Factor de seguridad e masas reducidas | | 4.5 | 4.5 | 4.5 | 4.5 | 4.5 |
| Diámetro del tambor | metros | 1.8288 | 1.8288 | 1.8288 | 1.8288 | 1.8288 |
| Ancho del tambor | metros | 1.524 | 1.524 | 1.524 | 1.524 | 1.524 |
| Ángulo fleje | grados | 0° 30min | 0° 30min | 0° 30min | 0° 30min | 0° 30min |
| Tiempo de aceleración | segundos | 10.30 | 10.17 | 11.32 | 12.38 | 13.20 |
| Tiempo de desaceleración | segundos | 10.30 | 10.17 | 11.32 | 12.38 | 13.20 |
| Tiempo total del ciclo de izaje | segundos | 85.36 | 105.78 | 124.84 | 142.54 | 156.16 |
| Tiempo a velocidad uniforme | segundos | 44.76 | 65.45 | 82.21 | 97.78 | 109.76 |
| Tiempo muerto(carga-descarga) | segundos | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Velocidad uniforme | | 4.36 | 4.17 | 4.12 | 4.08 | 4.07 |
| Aceleración | | 0.42 | 0.41 | 0.36 | 0.33 | 0.31 |
| Desaceleración | | 0.42 | 0.41 | 0.36 | 0.33 | 0.31 |
| Distancia entre el eje de winche y la polea | metros | 80.60 | 80.60 | 80.60 | 80.60 | 80.60 |
| Distancia entre el eje y zona de descarga | metros | 61.97 | 61.97 | 61.97 | 61.97 | 61.97 |
| Angulo de inclinación de distancia de eje a la polea(l_1 y l_2) | | 50° y 51° | 50° y 51° | 50° y 51° | 50° y 51° | 50° y 51° |
| Número de dientes del piñón | dientes | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Número de dientes de la catalina | dientes | 187 | 187 | 187 | 187 | 187 |

Se realiza el cálculo utilizando la cinemática (MRUV), para hallar el primer lugar:

i.1 Hallando el valor de H:

Utilizando las fórmulas vistas en 5.1.

$$H = \frac{V_{\max} t_1}{2} + V_{\max} t_2 + \frac{V_{\max} t_3}{2} \quad (5.71)$$

Y como:

$$t_1 + t_2 + t_3 = T \quad (5.72)$$

Entonces:

$$H = \frac{T + t_1}{2} V_{\max} = \frac{2T - t_1 - t_3}{2} V_{\max} \quad (5.73)$$

Además:

$$t_1 = \frac{V_{\max}}{a_1} \quad (5.74)$$

$$t_3 = \frac{V_{\max}}{a_3} \quad (5.75)$$

De donde se observa a_1 y a_3 aceleración y retardación.

$$H = \frac{2T - \frac{V_{\max}}{a_1} - \frac{V_{\max}}{a_3}}{2} V_{\max} \quad (5.76)$$

$$2H = 2TV_{\max} - V_{\max}^2 \left(\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_3} \right) \quad (5.77)$$

$$V_{\max}^2 - 2 \left(\frac{a_1 a_3}{a_1 + a_3} \right) TV_{\max} + 2 \left(\frac{a_1 a_3}{a_1 + a_3} \right) H = 0 \quad (5.78)$$

$$V_{\max} = \left(\frac{a_1 a_3}{a_1 + a_3} \right) T - \sqrt{\left(\left(\frac{a_1 a_3}{a_1 + a_3} \right) T \right)^2 - \left(2 \left(\frac{a_1 a_3}{a_1 + a_3} \right) H \right)} \quad (5.79)$$

Los elementos restantes del diagrama de velocidad:

- Tiempos parciales

$$t_1 = \frac{V_{\max}}{a_1} \quad (5.80)$$

$$t_2 = \frac{2H}{V_{\max}} - T \quad (5.81)$$

$$t_3 = \frac{V_{\max}}{a_3} \quad (5.82)$$

- Caminos parciales

$$h_1 = \frac{V_{\max} t_1}{2} = \frac{V_{\max}^2}{2a_1} \quad (5.83)$$

$$h_2 = V_{\max} t_2 \quad (5.84)$$

$$h_3 = \frac{V_{\max} t_3}{2} = \frac{V_{\max}^2}{2a_3} \quad (5.85)$$

Para el caso de estudio, el valor de "H", es conocido, las fórmulas anteriores permitirán encontrar las velocidades, tiempos y aceleraciones de cada tramo de trabajo.

i.2 Cálculo de tiempos de operación

Con las fórmulas mencionadas se hallan los tiempos los cuales son indicados en la Tabla 5.7, esto indicado para cada nivel de viaje en la mina:

Tabla 5.7 Tiempos de operación del ciclo de trabajo. Los tiempos de aceleración y desaceleración son calculados según la tabla 1.

| | | | | | |
|--|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Tiempo Total del Ciclo de Izaje (seg.) | 85.36 | 105.78 | 124.84 | 142.54 | 156.16 |
| Tiempo del ciclo de izaje de personal T_t (seg.): | 65.36 | 85.78 | 104.84 | 122.54 | 136.16 |
| Nivel | Nv. 240 | Nv. 315 | Nv. 385 | Nv. 450 | Nv. 500 |
| Profundidad (metros) | 240 | 315 | 385 | 450 | 500 |
| Profundidad (pies) | 787 | 1033 | 1263 | 1476 | 1640 |
| Tiempo de aceleración T_a (seg.) | 10.30 | 10.17 | 11.32 | 12.38 | 13.20 |
| Tiempo de desaceleración T_d (seg.) | 10.30 | 10.17 | 11.32 | 12.38 | 13.20 |
| Tiempo muerto en carga y descarga de personal T_m (seg.) | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Tiempo a velocidad uniforme T_u (seg.) | 44.76 | 65.45 | 82.21 | 97.78 | 109.76 |

i.3 Cálculo de aceleración y desaceleración:

Se procede a hallar las aceleraciones resultantes, también para cada nivel de la mina la cual se determina con Cinemática de la extracción (5.1).

Tabla 5.8 Cálculo de la aceleración y desaceleración calculada según tiempos de la tabla 1(W.W.Staley) [6]

| | | | | | |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Nivel | Nv. 240 | Nv. 315 | Nv. 385 | Nv. 450 | Nv. 500 |
| Profundidad (metros) | 240 | 315 | 385 | 450 | 500 |
| Profundidad (pies) | 787 | 1033 | 1263 | 1476 | 1640 |
| aceleración a (metros/seg ²) | 0.42 | 0.41 | 0.36 | 0.33 | 0.31 |
| desaceleración d ((metros/seg ²)) | 0.42 | 0.41 | 0.36 | 0.33 | 0.31 |

i.4 Cálculo de las velocidades

Se procede a hallar la velocidad máxima a la que debe viajar la jaula-skip, teniendo presente que el rango de esta velocidad está limitada por:

El Reglamento de Seguridad e Higiene Minera (DECRETO SUPREMO N° 046-2001-EM) y las formulas mencionadas y explicadas en líneas arriba (Cinemática de la extracción (5.1)).

Tabla 5.9 Cálculo de velocidades máximas

| Cálculo de velocidad de la jaula - skip | | 85.4seg. | 105.8seg. | 124.8seg. | 142.5seg. | 156.2seg. |
|---|--------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Nivel | Und. | Nv. 240 | Nv. 315 | Nv. 385 | Nv. 450 | Nv. 500 |
| Profundidad (metros) | m | 240 | 315 | 385 | 450 | 500 |
| Profundidad (pies) | pie | 787 | 1033 | 1263 | 1476 | 1640 |
| Velocidad máxima de la jaula - skip (metros/seg.) | m/s | 4.36 | 4.17 | 4.12 | 4.08 | 4.07 |
| Velocidad máxima de la jaula - skip (metros/min.) | m/min. | 261.54 | 249.96 | 246.99 | 245.09 | 243.99 |
| Velocidad máxima de la jaula - skip (pies/seg.) | pies/s | 14.30 | 13.67 | 13.51 | 13.40 | 13.34 |

En la Tabla 5.9 se puede observar que el valor de la velocidad en cada uno de los niveles estudiados está dentro de lo que el Reglamento de Seguridad e Higiene Minera, indica, salvo una pequeña diferencia en el Nv. 240.

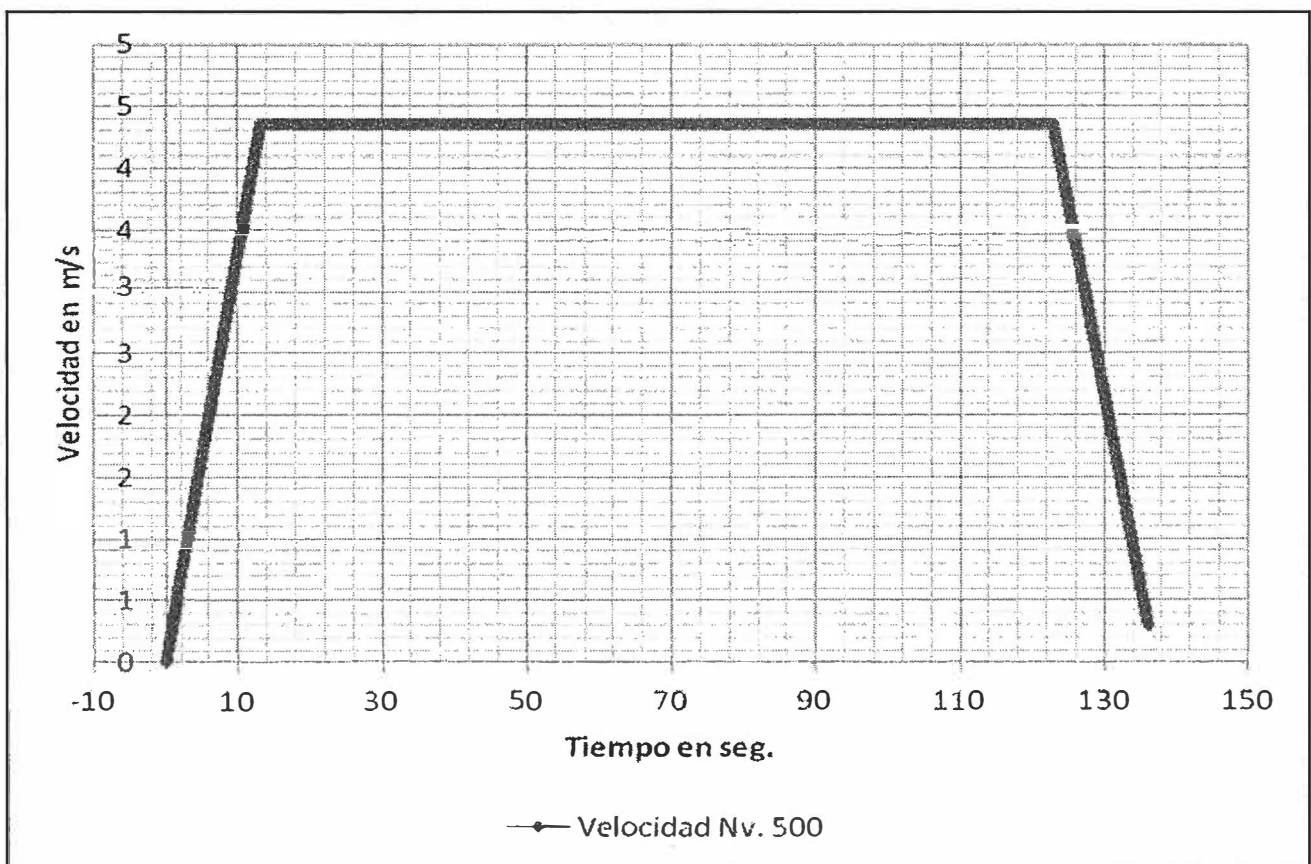


Figura 5.3 Diagrama trapezoidal para el caso estudiado, considerando el ciclo de izaje desde el Nv. 0 al Nv. 500

En la Figura 5.3 se puede observar las tres zonas de movimiento desde la aceleración, velocidad uniforme y desaceleración para hacer circular el skip-jaula desde el Nv. 0 hasta el Nv. 500.

i.5 Reglamento de Seguridad e Higiene Minera (D.S. N° 046-2001-EM)

En su artículo 350, inciso C, indica:

“La velocidad de las jaulas para el transporte de personal no podrá exceder de ciento cincuenta (150) metros por minuto para piques de menos de doscientos (200) metros de profundidad. Para piques de mayor profundidad, esta velocidad no debe exceder de doscientos cincuenta (250) metros por minuto, de acuerdo con las especificaciones del fabricante.”

En resumen:

- 150 m/min = 2.5 m/s, esta velocidad es para piques menores a 200m de profundidad.
- 250 m/min = 4.167 m/s, esta velocidad aplicable para piques mayores de 200m de profundidad, el cual es el caso de estudio (500 metros).

Se debe tener en cuenta que están dentro de los límites de velocidad permitidas para el transporte de personal. Finalmente se puede obtener el valor de x, que fue calculado con ayuda del Excel y graficado para ver la variación según la aceleración, velocidad uniforme máxima, desaceleración y tiempos.

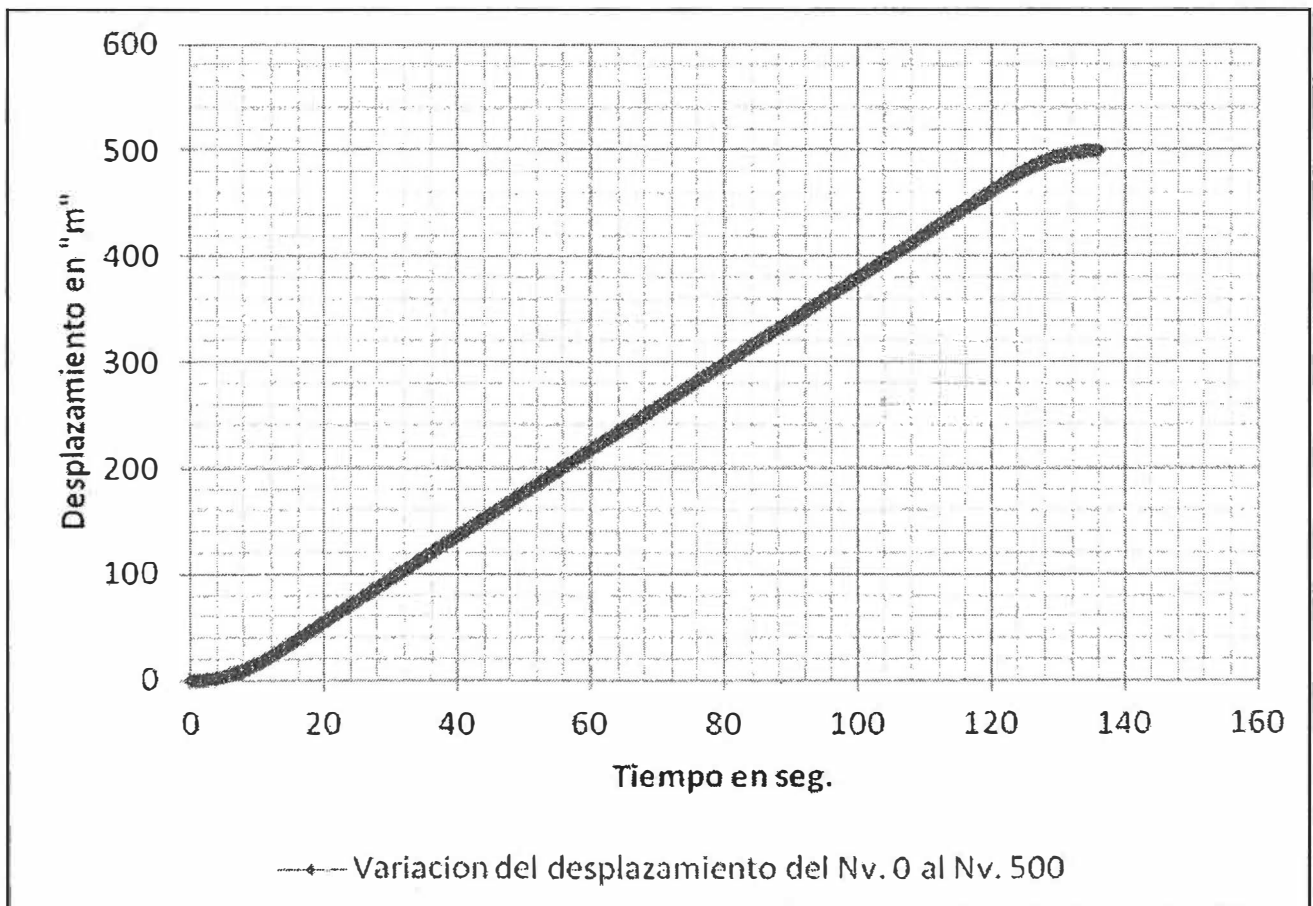


Figura 5.4 Desplazamiento en función del tiempo desde el Nv. 0 al Nv. 500

i.6 Cálculo de las masas reducidas

Se tiene que hallar el valor de "m", denominada masas reducidas. Para ello se recurre a las fórmulas indicadas líneas arriba (fórmulas de 5.35 al 5.46):

$$\sum m = \sum P/g \quad (5.86)$$

De donde, $\sum P$ = Suma de los pesos reducidos de todas las partes en movimiento:

$$\sum P = Q_u + 2Q_m + 2P_1 + 2P_p + 2P_t + P_r + P_e \quad (5.87)$$

El largo total del cable de extracción: $L_c = H + H_c + l + h_r + 4\pi D_t$, en metros. Realizando los cálculos se puede indicar la Tabla 5.10 que da la masa reducida total del sistema de izaje. Esta tabla ayudará a calcular el par de la carga que se le aplica al motor.

Tabla 5.10 Cálculo de pesos reducidos

| Descripción | Unidad | Nv. 240 | Nv. 315 | Nv. 385 | Nv. 450 | Nv. 500 |
|-------------------------------------|-----------------|---------|----------|----------|----------|----------|
| Carga útil | Q_u | 1451.52 | 1451.52 | 1451.52 | 1451.52 | 1451.52 |
| Coefficiente | k | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.20 |
| Densidad lineal del cable | p | 2.69 | 2.69 | 2.69 | 2.69 | 2.69 |
| Altura de izaje | H | 500.00 | 500.00 | 500.00 | 500.00 | 500.00 |
| Longitud de la polea al winche | $l_1 = l_2 = l$ | 80.60 | 80.60 | 80.60 | 80.60 | 80.60 |
| Longitud del cable a considerar | L_c | 429.80 | 504.80 | 574.80 | 639.80 | 689.80 |
| Aceleración | a | 0.42 | 0.41 | 0.36 | 0.33 | 0.31 |
| Desaceleración | d | 0.42 | 0.41 | 0.36 | 0.33 | 0.31 |
| Peso de la carga útil | Q_u | 1451.52 | 1451.52 | 1451.52 | 1451.52 | 1451.52 |
| Peso de la jaula skip | Q_m | 4898.80 | 4898.80 | 4898.80 | 4898.80 | 4898.80 |
| Peso reducido de la polea | P_p | 602.01 | 602.01 | 602.01 | 602.01 | 602.01 |
| Peso reducido del tambor cilíndrico | P_t | 7.51 | 1647.51 | 1647.51 | 1647.51 | 1647.51 |
| Peso reducido del rotor | P_r | 8887.78 | 9731.03 | 9966.43 | 10120.94 | 10213.02 |
| Peso reducido del engranaje | P_e | 2221.95 | 2432.76 | 2491.61 | 2530.24 | 2553.26 |
| Peso reducido del cable | P_c | 1157.70 | 1359.72 | 1548.27 | 1723.35 | 1858.03 |
| Peso reducido total | $\sum P$ | 20867 | 22123 | 22606 | 22974 | 23224 |
| Factor seguridad | FS | 4.5 | 4.5 | 4.5 | 4.5 | 4.5 |
| Masa reducida total | m_T | 9572.14 | 10148.32 | 10369.79 | 10538.70 | 10653.28 |
| Ángulo φ_1 | φ_1 | 50.00 | 50.00 | 50.00 | 50.00 | 50.00 |
| Ángulo φ_2 | φ_2 | 51.00 | 51.00 | 51.00 | 51.00 | 51.00 |

i.7 Graficas de variación de momentos aplicados al motor

Muestra variación de momentos aplicados al motor y el momento resultante (valores obtenidos usando fórmulas mencionadas y el Excel para ver la variación en el tiempo).

- Variación del desplazamiento de la jaula-skip, desde el nivel 0 hasta el nivel 500(500 metros de recorrido).

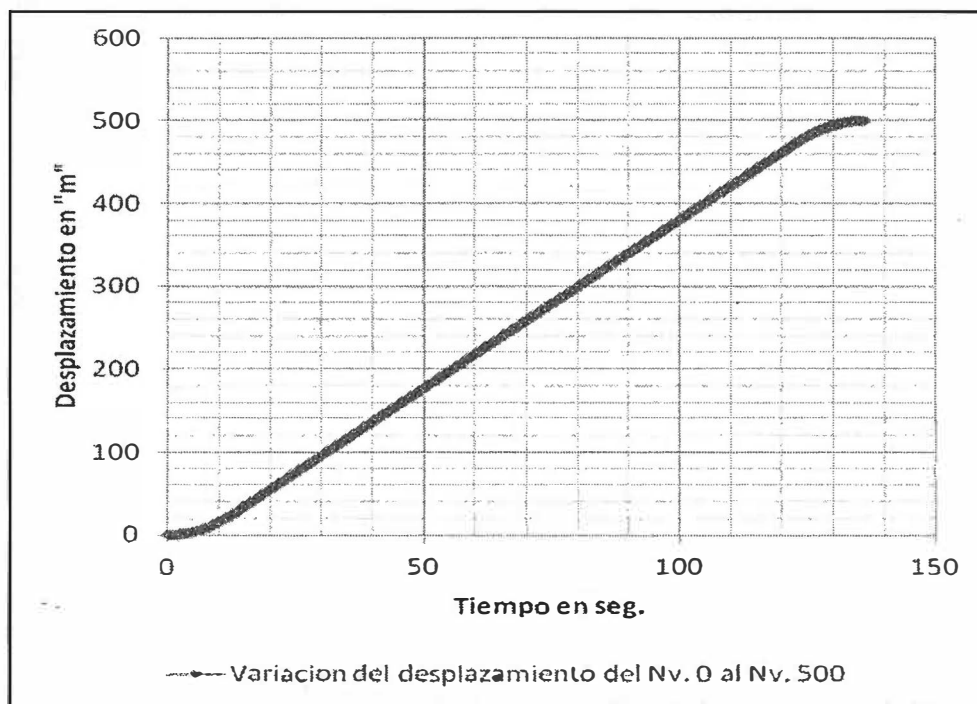


Figura 5.5 Diagrama del desplazamiento del Nv. 0 al Nv. 500

Variación del momento estático " M_{st} ", desde el nivel 0 hasta el nivel 500(500 metros de recorrido).

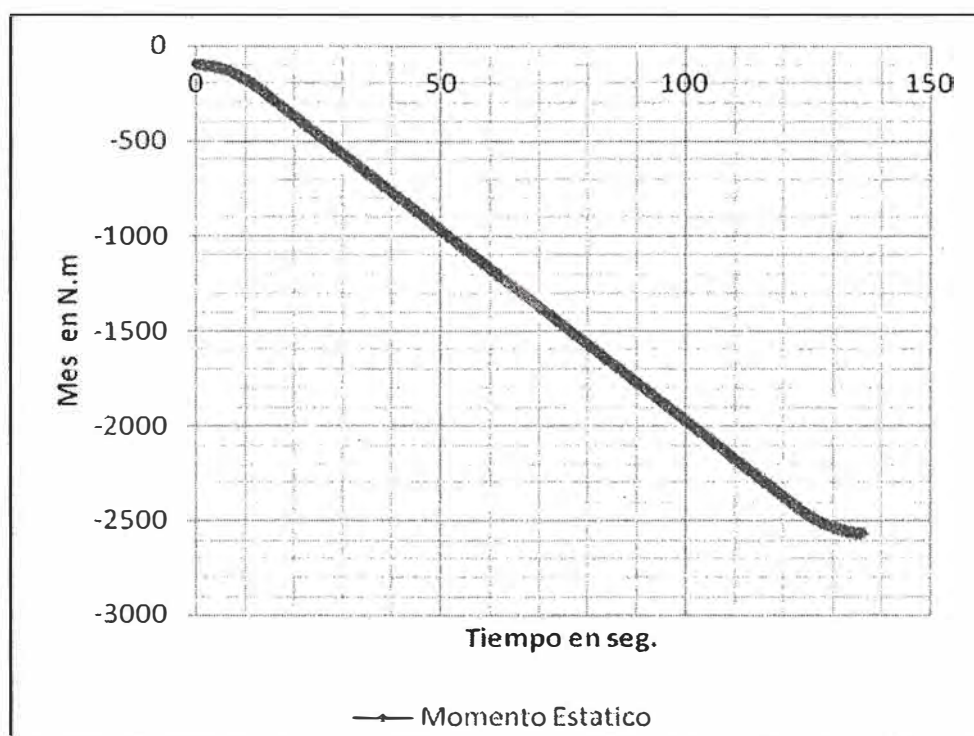


Figura 5.6 Momento estático vs. Tiempo, desde el Nv. 0 al Nv. 500

Variación del momento de resistencia pasivas al movimiento " M_r ", desde el nivel 0 hasta el nivel 500(500 metros de recorrido).

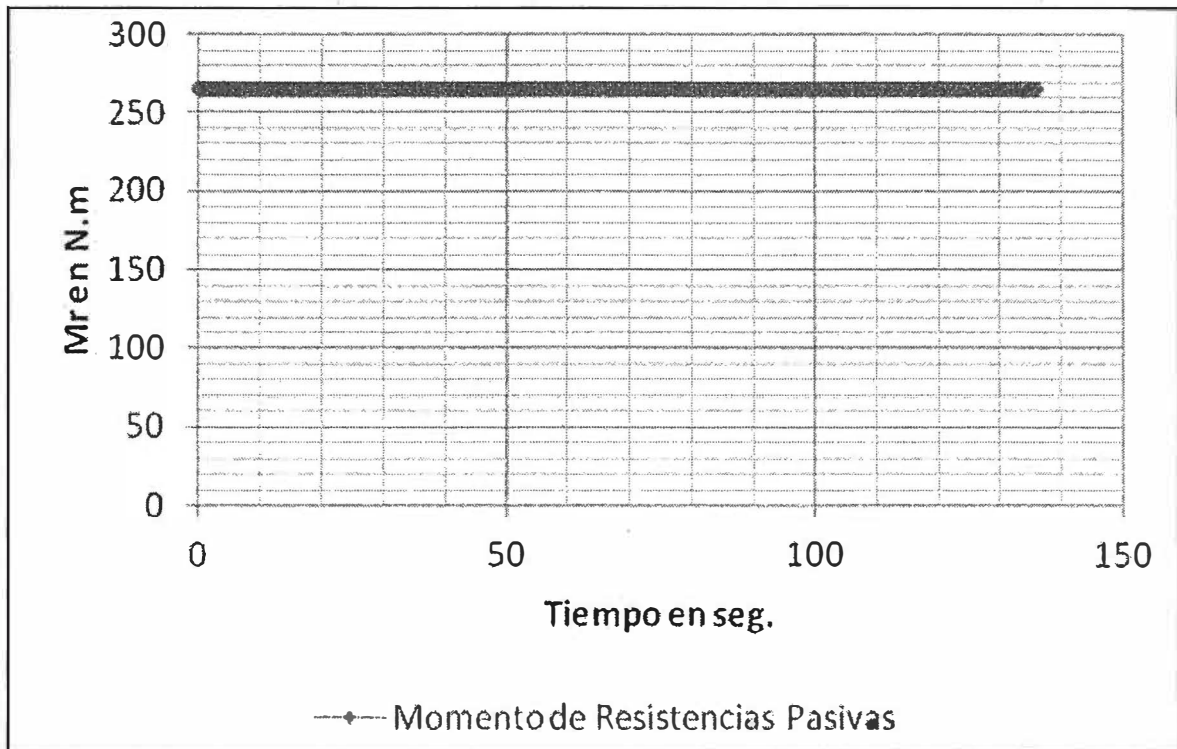


Figura 5.7 Diagrama del momento de resistencias pasivas en función del tiempo para desplazamiento desde el Nv. 0 al Nv. 500

- Variación del momento dinámico " M_d ", desde el nivel 0 hasta el nivel 500(500 metros de recorrido).

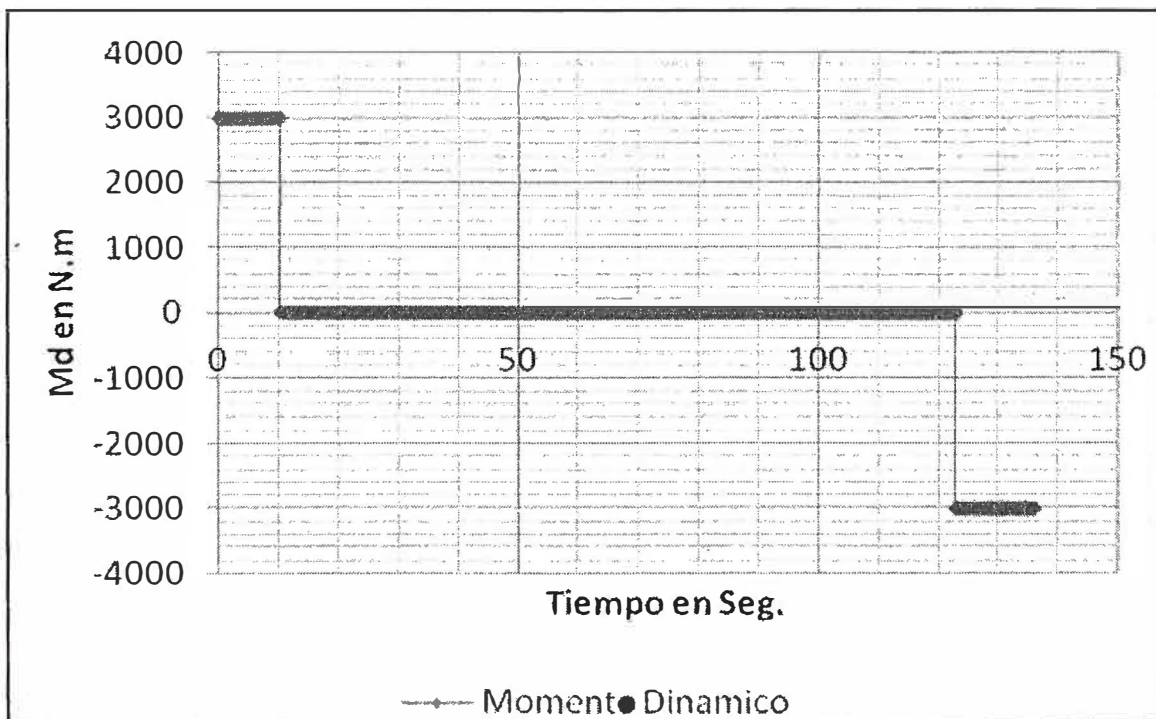


Figura 5.8 Diagrama del momento dinámico en función del tiempo para desplazamiento desde el Nv. 0 al Nv. 500

- Variación del momento aplicado al motor "M_m", desde el nivel 0 hasta el nivel 500(500 metros de recorrido).

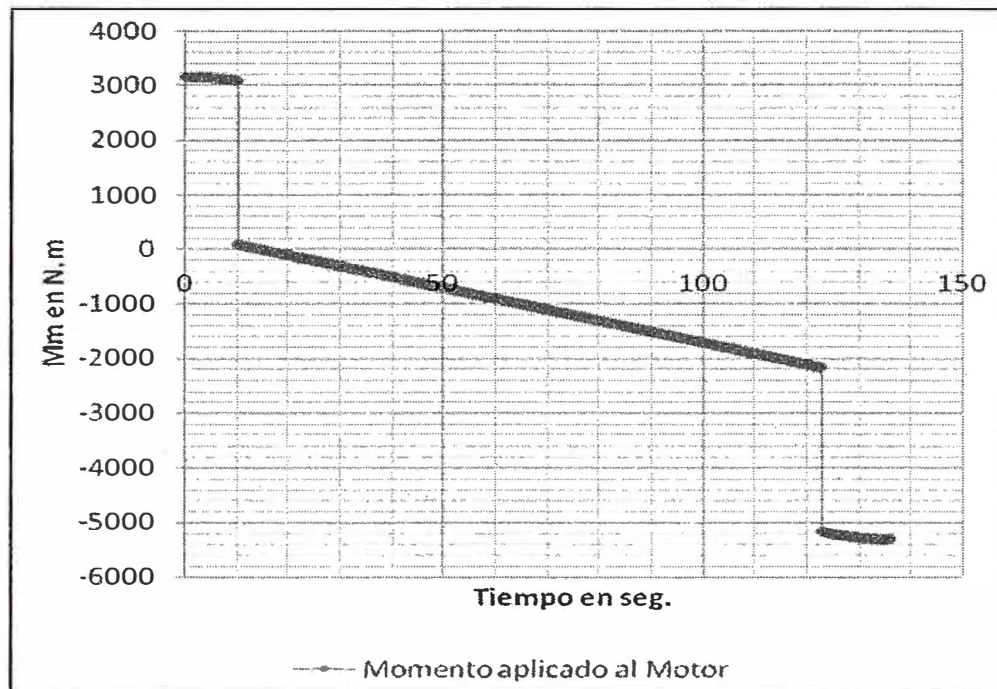


Fig. 5.9 Diagrama del momento neto o el que se aplica al motor en función del tiempo para desplazamiento desde el Nv. 0 al Nv. 500

Este momento "M_m", es el resultante general que la carga ofrece al motor. Se aprecia tres zonas bien definidas, pero la que interesa para el estudio es la última, el motor tendrá que ser trabajado con este momento resultante de la última zona (zona de desaceleración), la aplicación del frenado dinámico tomara esta última zona de trabajo.

- Variación de la potencia en el tiempo.

Utilizando Excel se obtiene la Figura 5.10.

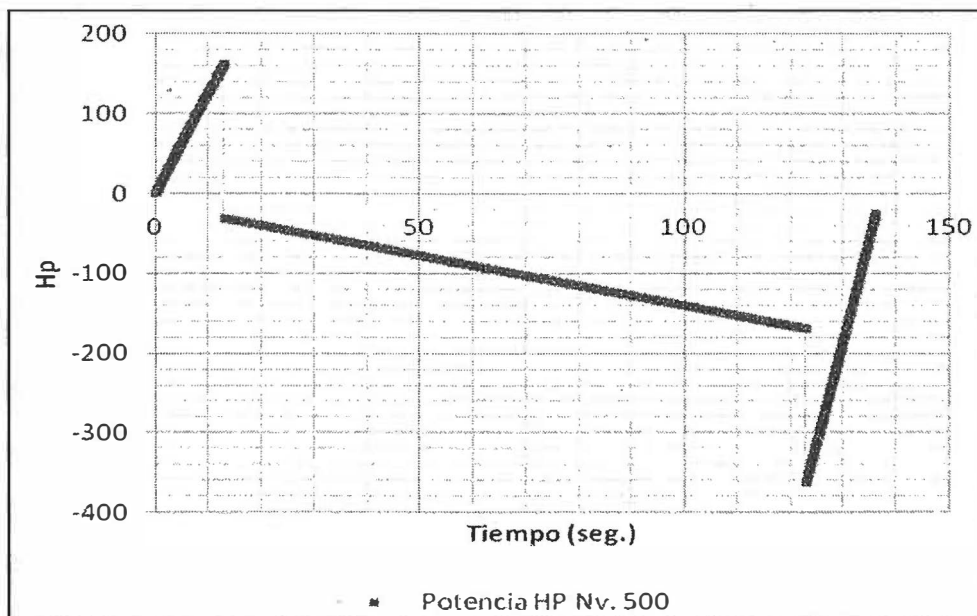


Fig. 5.10 Forma de la potencia en Hp desde el Nv. 0 al Nv. 500

Se puede ver la variación de la potencia en el tiempo, se observa que el motor inicialmente utiliza una potencia máxima de 160 Hp aproximadamente en el periodo de aceleración, en el segundo periodo se puede observar que la potencia va disminuyendo hasta finalmente aplicar una potencia contraria para tratar de frenar la carga y no ser vencida por esta, algo que se observa en el último periodo, aplicando se un máximo de 360 Hp aproximadamente.

CAPÍTULO VI CÁLCULOS ELÉCTRICOS

En este capítulo se efectúan los cálculos eléctricos, para luego utilizar los cálculos mecánicos ya realizados en el capítulo anterior. Los cálculos comprenderán el cálculo del circuito equivalente del motor de rotor bobinado, el cálculo de la tensión y corriente de inyección en corriente continua a los devanados del estator, la resistencia del estator, la resistencia del rotor y el tiempo de frenado (que se asume como el tiempo de desaceleración del ciclo de izaje).

6.1 Cálculo del circuito equivalente del motor de rotor bobinado

En esta sección se tocan los siguientes aspectos:

- Medición de resistencias del estator
- Prueba de relación
- Prueba de vacío
- Motor a rotor parado y con anillos abiertos

6.1.1 Medición de resistencias del estator

Se realizó la medición utilizando un microhmímetro digital, y se obtuvo las resistencias que se mencionan en la Tabla 6. 1 (resistencia del estator) y en la Tabla 6. 2 (resistencias del rotor). La Figura 6. 1 muestra el tipo de conexión de estas resistencias.

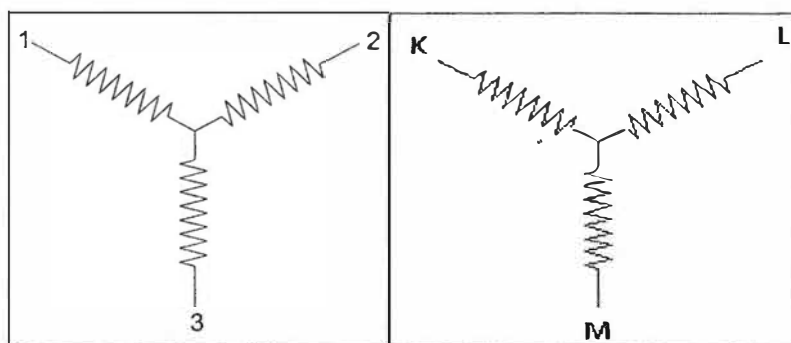


Figura 6.1 Tipo de conexión de resistencias del estator y rotor

Tabla 6.1 Resistencias del estator [8]

| Terminales | Resistencia a 29 °C | Resistencia por fase a 29 °C | Resistencia por fase a temperatura de 75 °C |
|------------|---------------------|------------------------------|---|
| 1 - 2 | 387 mΩ | 193.5 mΩ | 227.50 mΩ |
| 1 - 3 | 387 mΩ | 193.5 mΩ | 227.50 mΩ |
| 3 - 2 | 387 mΩ | 193.5 mΩ | 227.50 mΩ |

Tabla 6.2 Resistencias del rotor [8]

| Terminales | Resistencia a 29 °C | Resistencia por fase a 29 °C | Resistencia por fase a temperatura de 75 °C |
|------------|---------------------|------------------------------|---|
| K - L | 21 mΩ | 10.5 mΩ | 12.35 mΩ |
| L - M | 21 mΩ | 10.5 mΩ | 12.35 mΩ |
| M - K | 21 mΩ | 10.5 mΩ | 12.35 mΩ |

Se utilizó la fórmula $R(T)=R_0(1+\alpha(T-T_0))$, para calcular la resistencia a temperatura de operación. Utilizando $\alpha_{cu} = 0.00382^\circ \text{C}^{-1}$

6.1.2 Prueba de relación

La Tabla 6.3 muestra los resultados de la prueba realizada en los laboratorios de ABB.

Tabla 6.3 Relación de transformación [8]

| | | | |
|--------------------|--------------|--------------|--------------|
| Tensión Primaria | 1150 voltios | 1152 voltios | 1146 voltios |
| Tensión Secundaria | 236 voltios | 235 voltios | 235 voltios |

6.1.3 Prueba de vacío

Se utilizan las siguientes relaciones ya definidas anteriormente para poder hallar los valores de R_{Fe} y X_μ . La Tabla 6.4 muestra los resultados obtenidos durante la prueba.

$$P_0 = P_{Fe} + P_m + P_{cu1} \quad (6.1)$$

$$P_{Fe} + P_m = P_0 - P_{cu1} = P_0 - m_1 R_1 I_0^2 \quad (6.2)$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_{Fe}}{m_1 V_{1n} I_0}; I_{Fe} = I_0 \cos \varphi_0; I_\mu = I_0 \sin \varphi_0 \quad (6.3)$$

$$R_{Fe} = \frac{V_{1n}}{I_{Fe}}; X_\mu = \frac{V_{1n}}{I_\mu} \quad (6.4)$$

Tabla 6.4 Prueba de vacío efectuada por la empresa ABB [8].

| Parámetros obtenidos de las pruebas realizadas por la empresa ABB al motor de inducción de 400HP en laboratorio de Lima – Perú. | | | |
|---|-----------|-----------|----------|
| Parámetros | A-B | B-C | C-A |
| P_0 (watts) | 3133.33 | 3133.33 | 3133.33 |
| V_0 (voltios) | 2321 | 2321 | 2304 |
| I_0 (amperios) | 37.7 | 37.8 | 38 |
| P_{cu1} (watts) | 216.0361* | 217.1837* | 219.488* |
| R_1 (ohmios/fase) | 0.1905 | 0.1905 | 0.1905 |
| R_2 (ohmios/fase) | 0.0105 | 0.0105 | 0.0105 |
| $P_{Fe}+P_m$ (watts) | 2917.29 | 2916.14* | 2913.84* |

Datos tomados por la empresa ABB S.A.

* Valores calculados con las fórmulas anteriores.

6.1.4 Motor a rotor parado y con anillos abiertos

En esta prueba se describe la siguiente información: Requerimientos, procedimiento, corriente y tensión magnetizante del estator, desenergizar y bloquear el motor del winche, la resistencia del devanado del estator, rotor de la resistencia del devanado, datos de placa del motor, resultados de la Prueba Efectuada, resolución del circuito equivalente del caso de estudio. La Figura 6.2 ilustra las pruebas a rotor parado y con anillos abiertos.

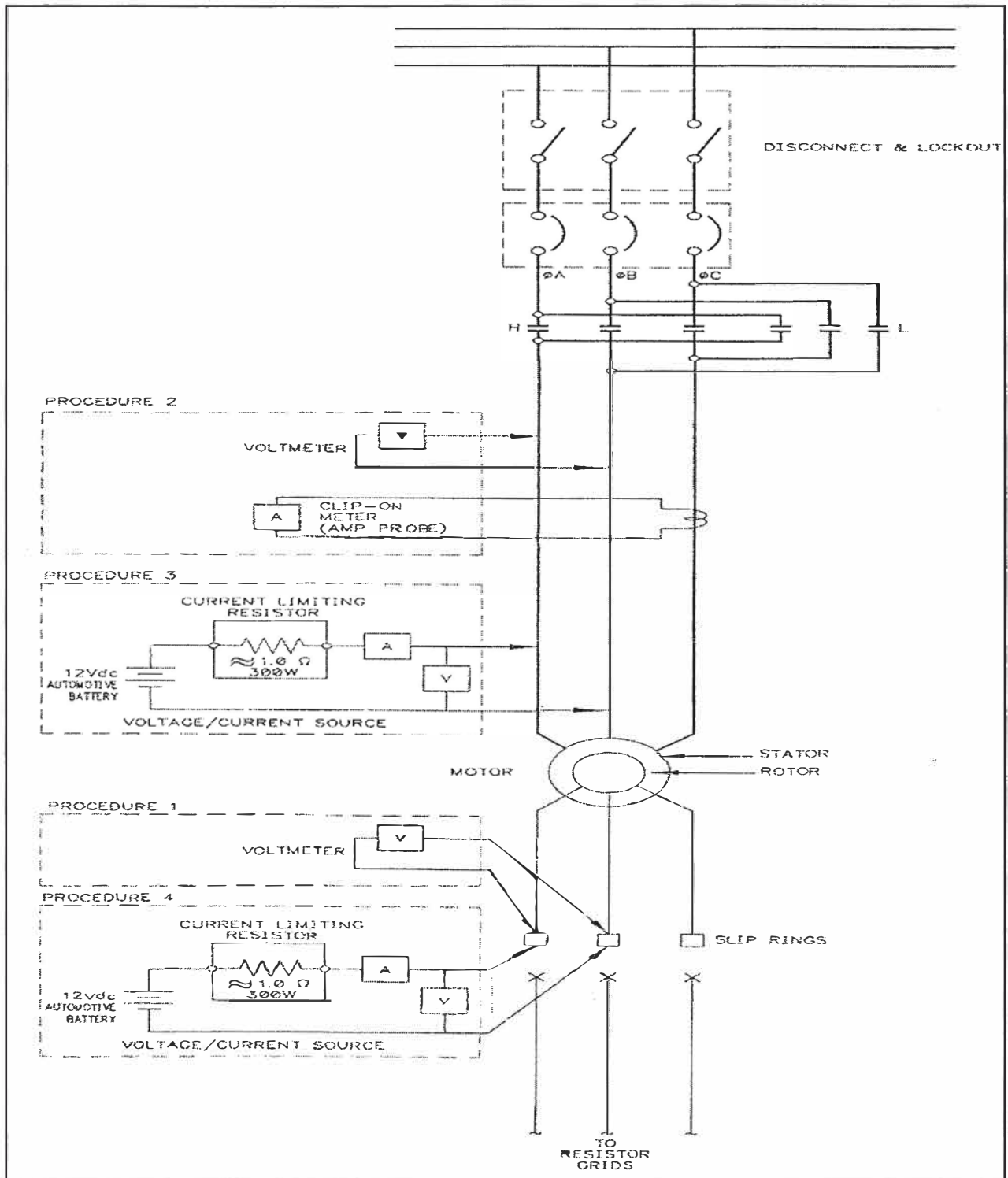


Figura 6.2 Diagrama de pruebas a rotor parado y con anillos abiertos

a. Requerimientos

- Tensión del rotor.
- Corriente y voltaje de magnetización del estator.
- Resistencia del devanado del estator (fase a fase).
- Resistencia del devanado del rotor (fase a fase).
- Datos de placa del motor.

b. Procedimiento

- Tensión del rotor
- Levantar las escobillas de anillos (que pueden permanecer en las cajas pero sin tocarlos anillos deslizantes), deja las escobillas levantadas para todas las pruebas restantes.
- Aplicar un pulso de potencia y medir y registrar el voltaje del rotor directamente en los anillos del colector de medición fases de anillo a anillo AB, BC y CA.

c. Corriente y tensión magnetizante del estator

- Con 1 pulso de potencia medir y anotar la corriente en cada fase con un amperímetro.
- Medir y anotar en cada fase a fase las tensiones del estator AB, BC y CA directamente en la principal inversión de panel. Alternativamente, si hay un transformador de potencial (PT) conectado al primario del motor, es posible medir las tensiones de en el secundario del PT en la que debe decir aproximadamente 120V CA fase a fase. Tenga en cuenta las calificaciones de PT tensión primaria y secundaria.

d. Desenergizar y bloquear el motor del winche

Antes de seguir con la siguiente serie de pruebas, desconecte con uso del interruptor de entrada o abra el interruptor de desconexión de entrada para asegurarse de que no hay potencial en el lado de la carga de estos dispositivos.

Comprobar fase a fase y cada fase para los conductores de tierra del estator del motor y el rotor se desactiva mediante el uso de un palo potencial (pértiga) y voltímetro.

e. La resistencia del devanado del estator

Conectar una batería de 12 V CC del automóvil o la fuente de corriente constante a las fases del estator AB, BC y CA, en el motor del winche de izaje de un par a la vez, como se indica en el diagrama de circuito de la prueba adjunta. Mida y anote los valores de corriente y tensión para cada par de fases. Estos valores serán utilizados para determinar la fase a fase resistencias del estator.

f. Rotor de la resistencia del devanado

En los anillos colectores habiendo retirado las escobillas, conectar la fuente de voltaje o corriente utilizada en el procedimiento de 3, aplicar en las de fases AB, BC y CA, en el motor del winche de izaje de un par a la vez. Mida y anotar los valores de corriente y

tensión para cada par de fases. Estos valores serán utilizados para obtener la resistencia fase a fase del rotor.

Nota

Si se utiliza una batería de automóvil, va a requerir de una resistencia limitadora como una caja de resistencia de la red (aprox. 1,0 ohmios, 300 vatios) como se muestra en el dibujo adjunto.

Medir el voltaje y la corriente a través de la resistencia limitadora de modo que su valor óhmico se puede calcular, una medición es suficiente.

g. Datos de placa del Motor

- Potencia:
- Corriente del Rotor y Estator:
- Tensión del rotor y Estator:
- Velocidad:
- Número de Serie:

h. Resultados de la prueba efectuada

Para la prueba se toman las siguientes consideraciones.

$$R_2 = m_v m_i R_2 \quad (6.5)$$

$$X_2 = m_v m_i X_2 \quad (6.6)$$

$$R_c = m_v m_i R_c \quad (6.7)$$

$$V_2 = m_v V_2 \quad (6.8)$$

Además que $m_v = m_i = \text{relación de transformación} = 4.87$

La Tabla 6.5 resume los resultados de las pruebas. La tabla se divide según se muestra a continuación:

- Prueba 1 - Voltaje del rotor
- Prueba 2 - Voltaje del estator
- Prueba 2 - Corriente del estator
- Prueba 3 - Resistencia del estator
- Prueba 4 – Resistencia del rotor
- Prueba 5 – Datos de placa del motor

Como dato adicional, es necesario especificar que la prueba fue realizada el 25 de junio del año 2007, entre las 21:00 y las 23:30 hrs)

Tabla 6.5 Resultados de la prueba a rotor abierto [8]

PRUEBA 1 - VOLTAJE DEL ROTOR

| Fase | A-B | B-C | C-A |
|-----------------------------|-----|-----|-----|
| Voltaje del rotor (voltios) | 463 | 460 | 461 |

PRUEBA 2 - VOLTAJE DEL ESTATOR

| Fase | A-B | B-C | C-A |
|-------------------------------|------|------|------|
| Voltaje del estator (voltios) | 2296 | 2283 | 2296 |

PRUEBA 2 - CORRIENTE DEL ESTATOR

| Fase | A-B | B-C | C-A |
|----------------------------------|-----|-----|-----|
| Corriente del estator (amperios) | 54 | 50 | 49 |

PRUEBA 3 - RESISTENCIA DEL ESTATOR

| Fase | A-B | B-C | C-A |
|--|--------|--------|--------|
| Medida de tensión (voltios) | 4.439 | 4.445 | 4.420 |
| Medida de corriente (amperios) | 14.592 | 14.603 | 14.564 |
| Resistencia de línea (ohmios) | 0.304 | 0.304 | 0.303 |
| Se puede observar que es un valor aproximado al obtenido con el uso del microhmímetro digital. | | | |

PRUEBA 4 – RESISTENCIA DEL ROTOR

| Fase | A-B | B-C | C-A |
|--|--------|--------|--------|
| Medida de tensión (voltios) | 0.379 | 0.375 | 0.378 |
| Medida de corriente (amperios) | 23.823 | 23.936 | 23.928 |
| Resistencia de línea (ohmios) | 0.0159 | 0.0157 | 0.0158 |
| Se puede observar que es un valor aproximado al obtenido con el uso del microhmímetro digital. | | | |

RESISTENCIA DE LIMITACIÓN DE LA CORRIENTE

| | |
|----------------------|-------|
| Tensión (voltios) | 12 |
| Corriente (amperios) | 30.76 |
| Resistencia (ohmios) | 0.39 |

PRUEBA 5 – DATOS DE PLACA DEL MOTOR

| | |
|---------------------------------|--------|
| Potencia(HP) | 400 |
| tensión del estator(voltios) | 2300 |
| corriente del estator(amperios) | 98 |
| tensión del rotor(voltios) | 460 |
| corriente del rotor(amperios) | 395 |
| velocidad(rpm) | 585 |
| número de serie | 680440 |

i. Resolución del circuito equivalente del caso de estudio

Se utilizan las recomendaciones anteriores para solucionar este problema y encontrar el circuito equivalente. De la prueba de vacío; como solo se tiene una prueba que facilitaría el cálculo de los valores de R_{Fe} y X_{μ} , se procede a tomar una aproximación de la siguiente forma.

Tabla 6.6 Prueba de Vacío tomada por la empresa ABB y que es una de las bases para calcular el circuito equivalente [8]

| V_{1n} (voltios) | | | P_0 (watts) | I_0 (amperios) | | |
|--------------------|------|------|---------------|------------------|------|----|
| 2321 | 2321 | 2304 | 9400 | 37.7 | 37.8 | 38 |

Dónde:

V_{1n} = Tensión por fase aplicada al motor trifásico de rotor bobinado

P_0 = Potencia de vacío

I_0 = Corriente de vacío medida en el estator.

$$P_0 = P_{Fe} + P_m + P_{cu1} = 9400$$

$$P_{Fe} + P_m = P_0 - P_{cu1} = -m_1 R_1 I_0^2 = 9400 - 3 \times 0.1905 \times 37.7^2 = 8587.73$$

Tomando una aproximación de:

$$P_m = 0.4 \times 8587.73 = 3435.092 \text{ watts}$$

$$P_{Fe} = 0.6 \times 8587.73 = 5152.638 \text{ watts}$$

Reemplazando estos valores se obtiene:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_{Fe}}{m_1 V_{1n} I_0} = 0.0339;$$

$$I_{Fe} = I_0 \cos \varphi_0 = 1.28; I_{\mu} = I_0 \sin \varphi_0 = 37.67$$

$$R_{Fe} = \frac{V_{1n}}{I_{Fe}} = 1045.49 \Omega$$

$$X_{\mu} = \frac{V_{1n}}{I_{\mu}} = 35.56 \Omega$$

Ahora se procede a utilizar la prueba a rotor parado y con anillos rozantes abiertos:

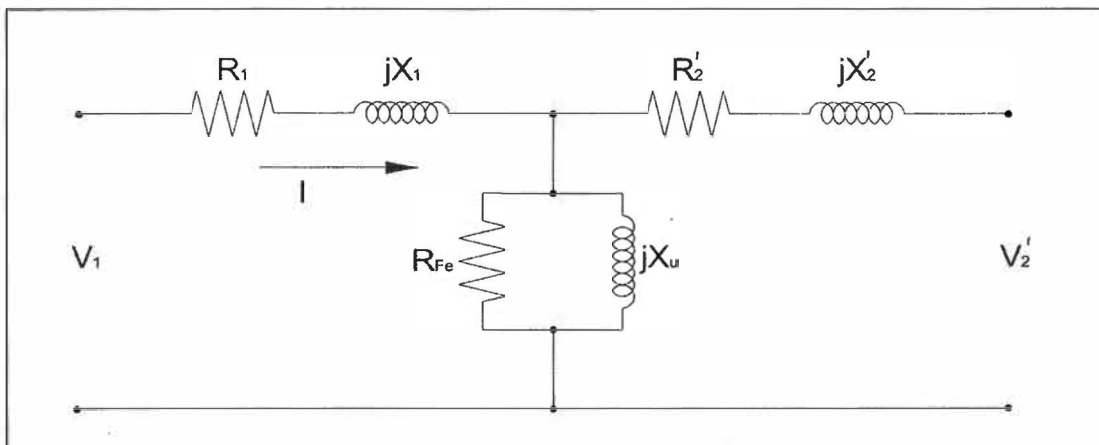


Figura 6.3 Diagrama del circuito al realizar la prueba con rotor detenido y anillos abiertos

Primer paso, encontrar la relación entre \vec{I} y \vec{V}_2 :

$$\vec{I} = \frac{\vec{V}_2}{jX_u} + \frac{\vec{V}_2}{R_{fe}} = \vec{V}_2 \left(\frac{X_u - jR_{fe}}{R_{fe}X_u} \right) \quad (6.9)$$

Segundo paso, encontrar la relación entre \vec{V}_1 y \vec{V}_2 :

$$\vec{V}_1 = (R_1 + jX_1)\vec{I} + \vec{V}_2 \quad (6.10)$$

$$\vec{V}_1 = \left(\begin{array}{c} \frac{R_1X_u + X_1R_{fe} + R_{fe}X_u}{R_{fe}X_u} + \\ j \frac{X_1X_u - R_1R_{fe}}{R_{fe}X_u} \end{array} \right) (V_2 \cos\theta + jV_2 \sin\theta) \quad (6.11)$$

Se considera que $\vec{V}_1 = V_1$, de acuerdo a la referencia. Por lo que se tiene:

$$V_1 = \left(\frac{R_1X_u + X_1R_{fe} + R_{fe}X_u}{R_{fe}X_u} \right) (V_2 \cos\theta) - \left(\frac{X_1X_u - R_1R_{fe}}{R_{fe}X_u} \right) (V_2 \sin\theta) \quad (6.12)$$

$$0 = \left(\frac{R_1X_u + X_1R_{fe} + R_{fe}X_u}{R_{fe}X_u} \right) (V_2 \sin\theta) + \left(\frac{X_1X_u - R_1R_{fe}}{R_{fe}X_u} \right) (V_2 \cos\theta) \quad (6.13)$$

Resolviendo estas 2 últimas ecuaciones, se tiene:

$$0 = (R_1X_u + X_1R_{fe})^2 + R_1R_{fe}^2 + \left(\frac{V_1}{V_2} \frac{R_{fe}X_u}{X_u} \right)^2 + \quad (6.14)$$

$$(2R_{fe}(R_1X_u + R_{fe}X_u) - 2X_uR_{fe}R_1)X_1 +$$

$$(R_{fe}^2 + X_u^2)X_1^2$$

Reemplazando y resolviendo la ecuación cuadrática se tiene:

$$X_1 = -72.06 \Omega/\text{fase}$$

$$X_1 = 1.016 \Omega/\text{fase}$$

Se toma el valor real positivo.

Finalmente se tienen los valores de los parámetros del circuito equivalente por fase que son mostrados en la Tabla 6.7:

Tabla 6.7 Parámetros del circuito equivalente del motor de rotor bobinado de 400Hp y 2300V.

| | |
|----------|----------------|
| R_{Fe} | 1145.49 ohmios |
| X_μ | 35.56 ohmios |
| X_1 | 1.016 ohmios |
| X_2 | 0.043 ohmios |
| R_1 | 0.1905 ohmios |
| R_2 | 0.2493 ohmios |

Finalmente se obtiene el diagrama equivalente por fase mostrado en la Figura 6.4.

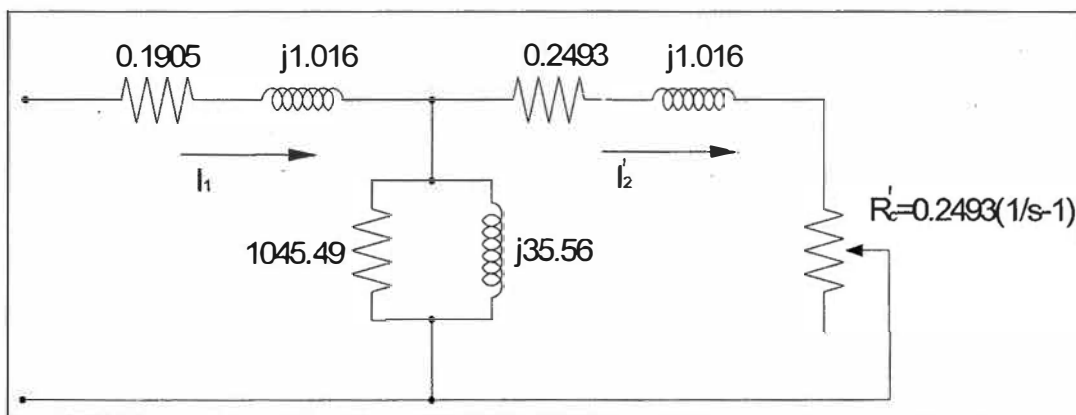


Figura 6.4 Diagrama del circuito equivalente del motor de 400Hp y 2300 V

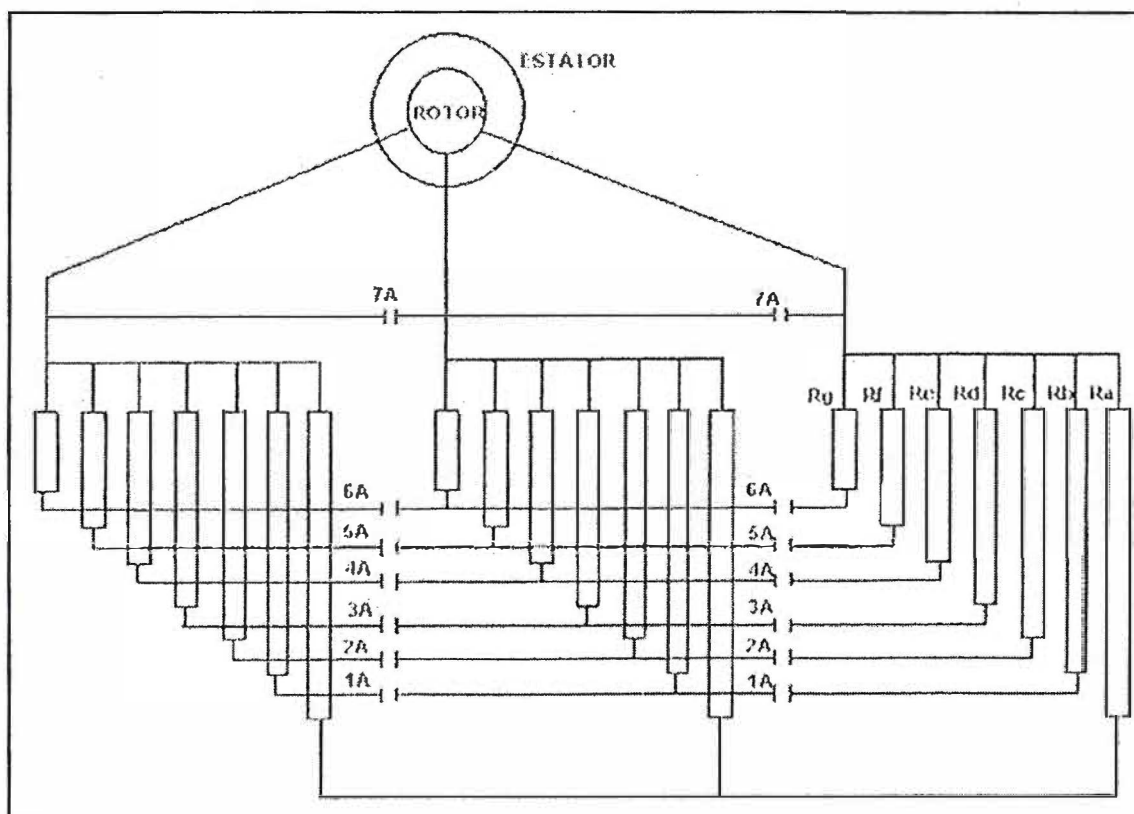


Fig. 6.5 Resistencias adicionales en el rotor

Como fue mencionado, estas siete escalas de resistencias fueron calculadas anteriormente y que no es el tema del cálculo, pero si serán considerados los valores para calcular el frenado dinámico finalmente.

Tabla 6.8 Resistencias adicionales que dan las velocidades o pasos en el funcionamiento del sistema.

| | |
|----|----------------|
| Ra | 2.5295 ohmios |
| Rb | 1.986 ohmios |
| Rc | 1.65025 ohmios |
| Rd | 1.4065 ohmios |
| Re | 1.284 ohmios |
| Rf | 0.642 ohmios |
| Rg | 0.214 ohmios |

Tabla 6.9 Tabla general de resultados [8].

| PARAMETROS MOTOR | ELECTRICOS | DEL | Ref. al estator | Velocidad 1 | Velocidad 2 | Velocidad 3 | Velocidad 4 | Velocidad 5 | Velocidad 6 | Velocidad 7 | Velocidad 8 |
|--|------------------|------|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Potencia | HP | S | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 |
| velocidad sincrona | rpm | n1 | 585 | 585 | 585 | 585 | 585 | 585 | 585 | 585 | 585 |
| Relación de transformación de tensiones | | mv | 4.8729 | 4.8729 | 4.8729 | 4.8729 | 4.8729 | 4.8729 | 4.8729 | 4.8729 | 4.8729 |
| Relación de transformación de corrientes | | mi | 4.8729 | 4.8729 | 4.8729 | 4.8729 | 4.8729 | 4.8729 | 4.8729 | 4.8729 | 4.8729 |
| Perdidas mecánicas | watts | Pm | 3,435 | 3,435 | 3,435 | 3,435 | 3,435 | 3,435 | 3,435 | 3,435 | 3,435 |
| Número de fases | | m1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Tensión del estator | Voltios por fase | V1 | 1,340 | 1,340 | 1,340 | 1,340 | 1,340 | 1,340 | 1,340 | 1,340 | 1,340 |
| Reactancia de dispersión del estator | Ohmios por fase | X1 | 1.0156 | 1.0156 | 1.0156 | 1.0156 | 1.0156 | 1.0156 | 1.0156 | 1.0156 | 1.0156 |
| Reactancia de dispersión del rotor | Ohmios por fase | X2' | 1.0156 | 1.0156 | 1.0156 | 1.0156 | 1.0156 | 1.0156 | 1.0156 | 1.0156 | 1.0156 |
| Resistencia del estator | Ohmios por fase | R1 | 0.1905 | 0.1905 | 0.1905 | 0.1905 | 0.1905 | 0.1905 | 0.1905 | 0.1905 | 0.1905 |
| Resistencia del rotor | Ohmios por fase | R2 | 0.0105 | 0.0105 | 0.0105 | 0.0105 | 0.0105 | 0.0105 | 0.0105 | 0.0105 | 0.0105 |
| Resistencia del rotor | Ohmios por fase | R2' | 0.2493 | 0.2493 | 0.2493 | 0.2493 | 0.2493 | 0.2493 | 0.2493 | 0.2493 | 0.2493 |
| Resistencia de magnetización | Ohmios por fase | Rfe | 1045.49 | 1045.49 | 1045.49 | 1045.49 | 1045.49 | 1045.49 | 1045.49 | 1045.49 | 1045.49 |
| Reactancia de magnetización | Ohmios por fase | Xu | 35.57 | 35.57 | 35.57 | 35.57 | 35.57 | 35.57 | 35.57 | 35.57 | 35.57 |
| Resistencia adicional | Ohmios por fase | Rad | | 2.5292 | 1.9857 | 1.6499 | 1.4065 | 1.2840 | 0.6420 | 0.2140 | 0.0000 |
| Resistencia adicional | Ohmios por fase | Rad' | | 60.05 | 47.15 | 39.18 | 33.40 | 30.49 | 15.24 | 5.08 | 0.00 |
| Deslizamiento máximo | | smax | | 29.56 | 23.23 | 19.33 | 16.49 | 15.07 | 7.59 | 2.61 | 0.12 |
| Torque máximo | N.m | Tmax | | 19711.9 | 19711.9 | 19711.9 | 19711.9 | 19711.9 | 19711.9 | 19711.9 | 19711.9 |
| Torque Nominal | N.m | Tn | | 4871.32 | 4871.32 | 4871.32 | 4871.32 | 4871.32 | 4871.32 | 4871.32 | 4871.32 |
| Deslizamiento nominal | | s | | 0.025 | 0.025 | 0.025 | 0.025 | 0.025 | 0.025 | 0.025 | 0.025 |

6.2 Frenado dinámico

Este tipo de freno se caracteriza por desconectar en primer lugar el estator de la red de corriente alterna y posteriormente alimentar dos de las fases del motor con corriente continua, mientras que el rotor se conecta con una resistencia o esta cortocircuitado y gira bajo la acción del momento exterior.

De este modo el motor movido por las cargas se transforma en alternador, y la corriente producida se disipa en calor en las resistencias del rotor y de la máquina. La interacción de la corriente alternada en el bobinado del rotor con el campo magnético del estator crea un momento de frenado.

Regulando la corriente continua de excitación del estator y el valor de la resistencia del rotor, se puede variar la magnitud del frenado dinámico del motor asíncrono.

El frenado dinámico se puede utilizar para la bajada de las cargas con las velocidades reducidas y el frenado de la máquina en el periodo de retardación (desaceleración).

Se debe considerar que el consumo de la energía para el frenado dinámico es pequeño y la aplicación del frenado es casi instantánea.

También se debe tener en cuenta que con el frenado dinámico no es imposible conducir a la máquina hasta la parada, ya que con el rotor inmóvil, en su bobinado no se induce más la fuerza electromotriz, no hay corriente y en consecuencia desaparece el momento de frenado. La parada de la máquina y su inmovilización deben realizarse por el freno mecánico.

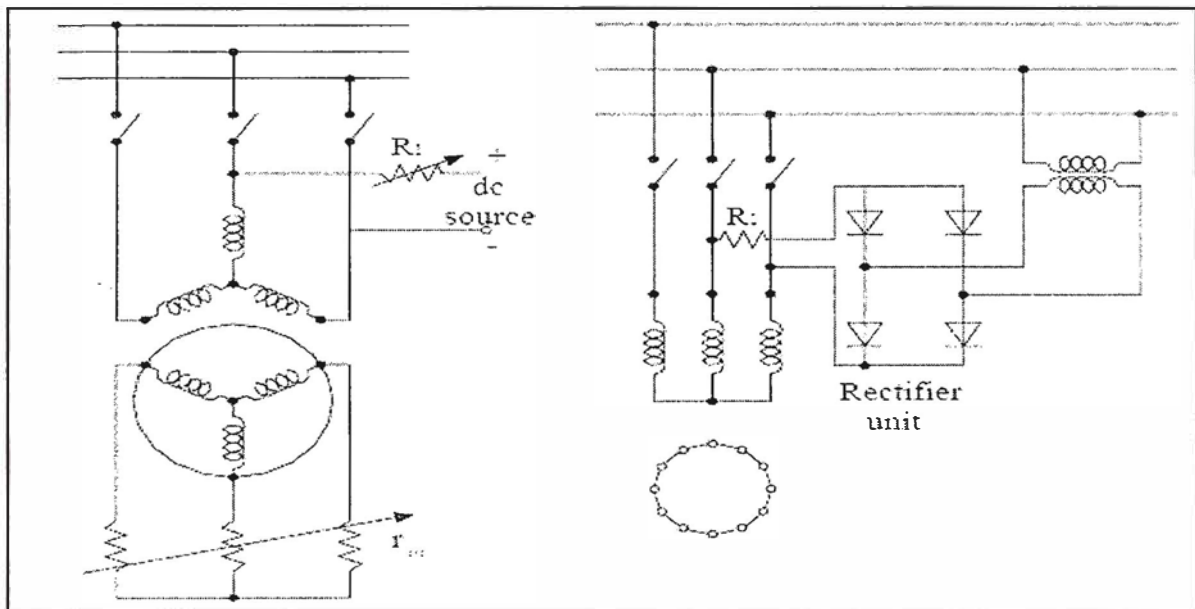


Figura 6.6 Conexión del frenado dinámico en motor de inducción, donde R_1 resistencia regulable externa y R_{ad} resistencia rotórica externa.

El circuito equivalente y el diagrama fasorial del motor durante el frenado dinámico se muestran en la Figura 6.6.

Es evidente que un motor asíncrono, en caso de frenado dinámico, trabaja en régimen de generador síncrono.

A continuación se desarrollan los siguientes ítems:

- Flujo magnético del estator
- Fuerza electromotriz y corriente del motor
- Características mecánicas del motor
- Esquemas y cálculos del circuito de excitación
- Cálculo de las características mecánicas
- Cálculo de los circuitos de frenado dinámico
- Cálculo para el caso de estudio

6.2.1 Flujo magnético del estator

Las características del frenado dinámico de un motor asíncrono dependen en sumo grado de la forma de la curva de imantación. Si esta curva se construye en magnitudes fraccionarias, dicha curva puede tomarse con exactitud satisfactoria como universal para la mayoría de los tipos de motores normales, a saber, para los motores de aplicación general de régimen permanente, para los motores de las grúas, los de mesas de rodillos e incluso para laminadores de grandes dimensiones. Todos estos motores se ejecutan saturados por razones de tener peso mínimo y con curvas de imantación próximas por la forma.

En la Figura 6.7, se da una curva universal de imantación construida como media para los motores tipos MT y MTK de las grúas. Por el eje horizontal se han trazado las corrientes de imantación I_0 en fracciones de corriente de la marcha en vacío y por la vertical, el flujo magnético Φ en fracciones del nominal obtenido a corriente de imantación $I_m = I_0$, o a la f.e.m. de la fase del estator E_1 en fracciones de la obtenida en caso del flujo nominal. Si a régimen motor, como se sabe, el flujo magnético del motor asíncrono queda casi constante a cualquier carga y velocidad de rotación, en caso de frenado dinámico el flujo del motor varía intensamente. Las curvas de la figura 6.7, muestran como varía el flujo Φ del motor asíncrono según sea la velocidad de rotación del motor en caso de que el suministro al estator (dos fases en serie) de corriente continua sea el triple de la corriente trifásica del funcionamiento en vacío para tres magnitudes de la impedancia del rotor ($R_2^{fr} = 0.2, 0.4$ y 1).

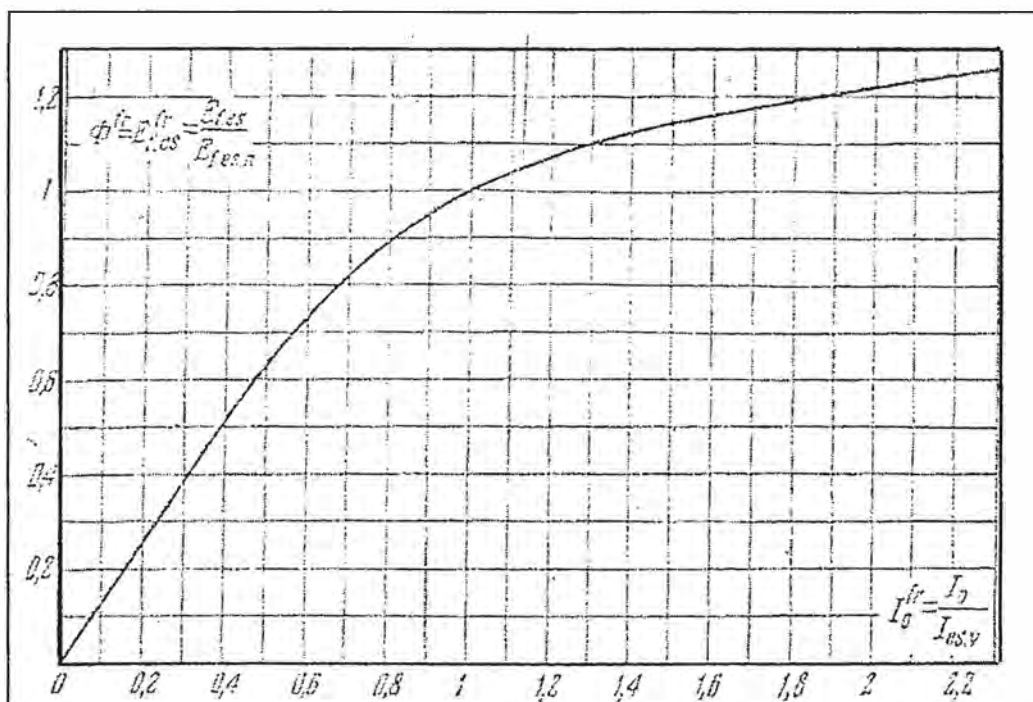


Figura 6.7 Curva universal de magnetización para motores asíncronos con rotor bobinado tipo MT y en cortocircuito tipo MTK.

Los flujos pequeños a grandes velocidades de rotación se obtienen a causa de la acción desmagnetizante de la f.m.m del rotor. Durante la desaceleración del rotor a medida que decrece la corriente en este la acción desmagnetizante disminuye y por lo tanto el flujo del motor crece.

En los motores asíncronos, en caso de frenado dinámico, la acción desmagnetizante del rotor (reacción del rotor) repercute con particular fuerza, ya que estos son de polos enteros y tienen el entrehierro pequeño.

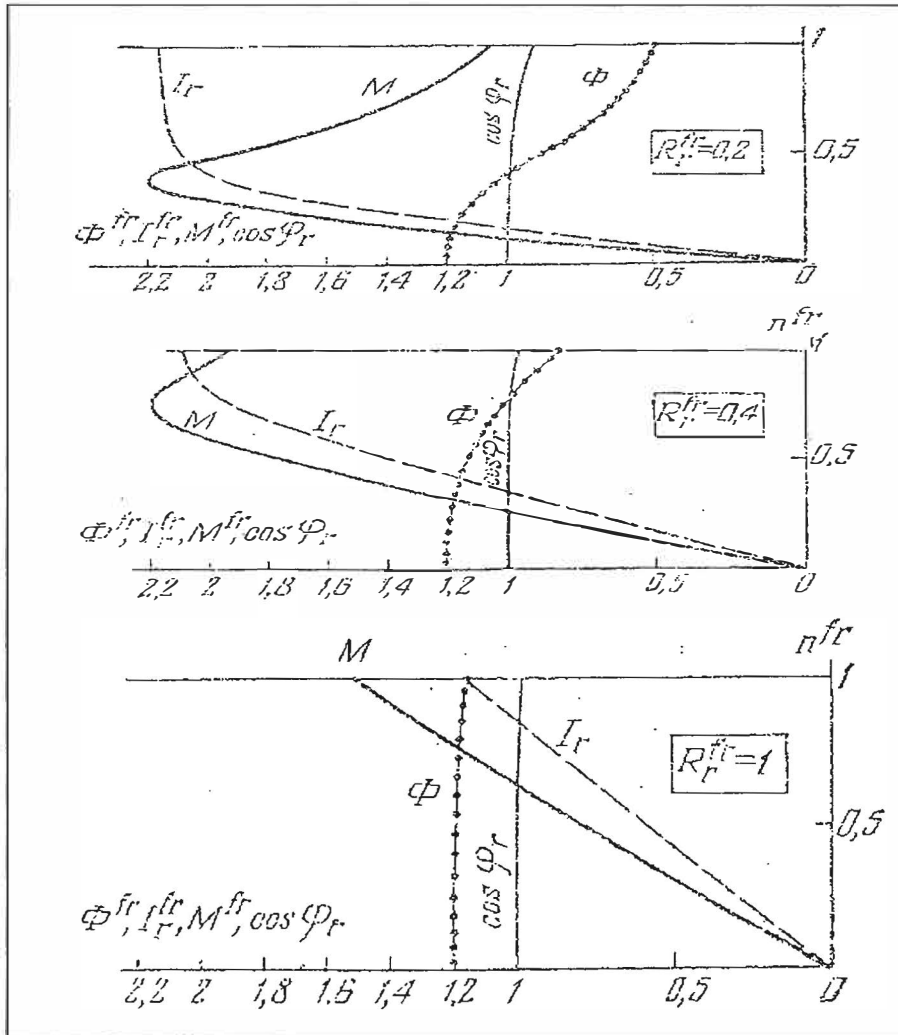


Fig.6.8 Características del flujo Φ de la corriente del rotor I_2 , del momento M y del $\cos \varphi$ para un motor asíncrono en régimen de frenado dinámico a impedancias del rotor $(R_2+R_{ad})^{fr} = 0.2, 0.4$ y 1 y en caso de excitación por la corriente continua $I_{ex}=3I_0$

6.2.2 Fuerza electromotriz y corriente del motor

La f.e.m del rotor es proporcional al flujo del motor y a la velocidad de rotación de rotor. Por eso, a una impedancia del rotor grande, cuando el flujo es casi constante, la f.e.m, y por consiguiente, también la corriente del rotor disminuirán proporcionalmente a la velocidad de rotación, es decir, por la ley rectilínea. Esta característica tiene la misma forma que la característica de la corriente del inducido de un motor en derivación de corriente continua. Para resistencias pequeñas en el rotor, disminuyendo la velocidad de

rotación del motor el flujo incrementa, a causa de esto la f.e.m y la corriente del rotor son constantes al principio y, después, cuando el flujo cesa de crecer, la f.e.m y la corriente del rotor comienza a disminuir bruscamente.

6.2.3 Características mecánicas del motor

De la familia de características mecánicas de la Figura 6.9, es fácil establecer la ley de gran valor enunciada a continuación: a una corriente dada la excitación para cualquier momento dado, la velocidad de rotación del motor es proporcional a la impedancia pura del rotor. Así, por ejemplo, teniendo $M^{fr} = 1.5$ y la corriente triple de excitación, con una resistencia de $0.2R_{2,n}$ la velocidad de rotación es igual a $0.2n_{sinc}$; con una resistencia $0.4R_{2,n}$ dicha velocidad será igual a $0.2n_{sinc}$, y, con una resistencia $1R_{2,n}$ será igual a $1n_{sinc}$. Por eso, basta con tener una característica mecánica solo para una magnitud de resistencia y para otras cualesquiera resistencias las características mecánicas pueden ser construidas con ayuda de una simple proporción. Para el caso de estudio, se podría usar estas curvas ya hechas pero se construirán las propias para las características del motor que es sujeto a estudio.

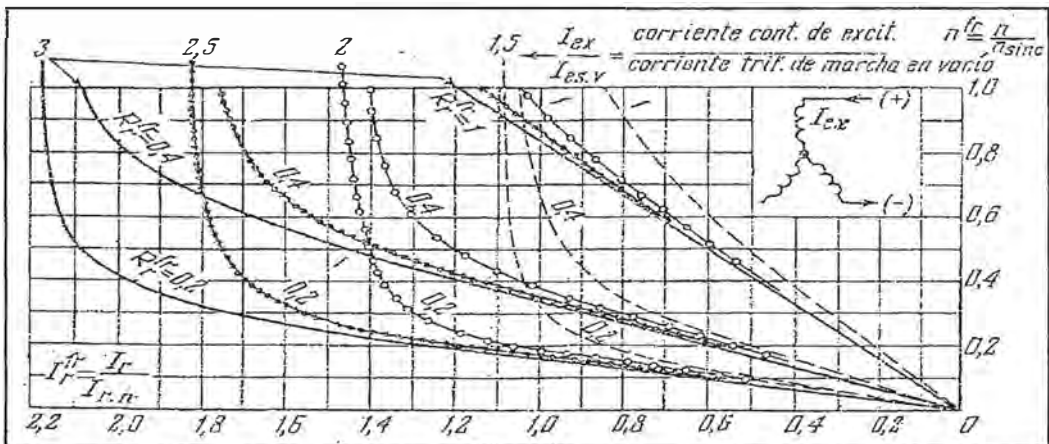


Figura 6.9 Características universales de la corriente del rotor a frenado dinámico para motores asíncronos con rotor bobinado tipo MT.

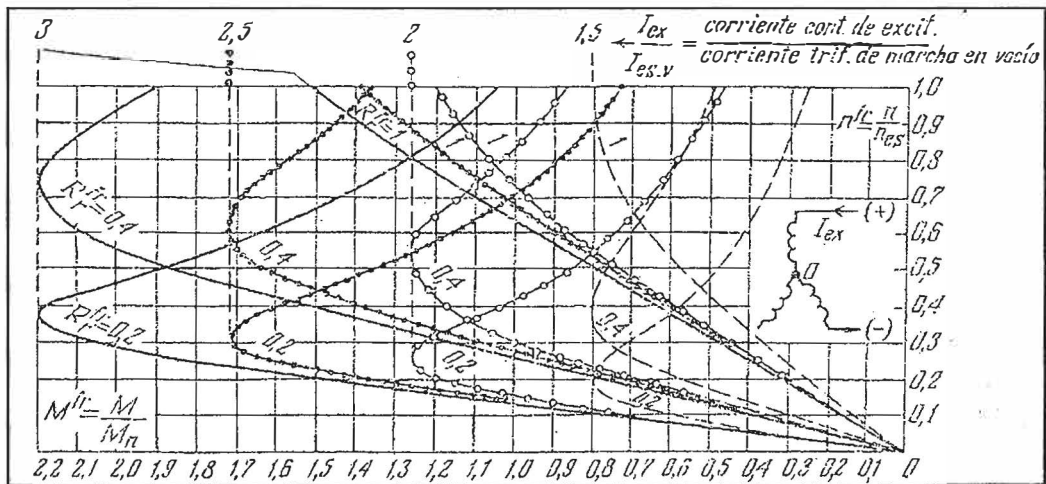


Figura 6.10 Características mecánicas universales de frenado dinámico para motores asíncronos con rotor bobinado tipo MT

Nota:(las cifras 0.2, 0.4, 1 en las curvas significan las impedancias de la línea del rotor en fracciones de la nominal, significan las impedancias de la línea del rotor en fracciones de la nominal, es decir, $N_{2,n}$)

6.2.4 Esquemas y cálculos del circuito de excitación

En la deducción de las características mecánicas del frenado dinámico de un motor asíncrono se considera este régimen como una máquina asíncrona. Para esto es necesario que la corriente continua de excitación I_{ex} suministrada al estator durante el frenado dinámico, sea reducida a la corriente trifásica equivalente por la f.m.m del estator I_1 .

Considerando los esquemas posibles de suministro de corriente a las fases del estator de un motor asíncrono (tabla siguiente). Usando el diagrama de la f.m.m para el esquema 1, se escribe la magnitud de la f.m.m resultante de la corriente continua de excitación:

$$F_{con} = 2I_{ex}\omega_1\cos30^\circ = \sqrt{3}I_{ex}\omega_1 \tag{6.15}$$

Se sabe que a una corriente trifásica la f.m.m resultante de las tres fases es de magnitud constante en cada momento dado del tiempo (lo mismo que en caso de excitación por la corriente continua) y es igual a 1.5 del valor de la amplitud de f.m.m de una fase, es decir:

$$F_{trif} = 1.5\sqrt{2} I_1\omega_1 \tag{6.16}$$

Comparando la f.m.m de las corrientes continua y trifásica, se tiene:

$$1.5\sqrt{2}I_1\omega_1 = \sqrt{3}I_{ex}\omega_1 \tag{6.17}$$

$$I_1=0.816 I_{ex} \tag{6.18}$$

De modo similar se comprueban para los demás casos (Figura 6.11).

| Comparación de los esquemas de conexión de las fases del estator | | | | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | Esquema 1 | Esquema 2 | Esquema 3 | Esquema 4 | Esquema 5 | Esquema 6 |
| Esquemas de conexión de las fases del estator | | | | | | |
| Composición de las form de las fases del estator | | | | | | |
| $\frac{I_1}{I_{ex}} = \frac{corr.trif.lin}{corr.con.exc.}$ | 0,816 | 0,707 | 0,943 | 0,816 | 0,707 | 1,632 |

Figura 6.11 Comparación de los esquemas de conexión de las fases del estator.

6.2.5 Cálculo de las características mecánicas

Como ya se ha señalado, la deducción de las fórmulas de las características mecánicas del frenado dinámico de un motor asíncrono, es realizada de acuerdo con las leyes y fórmulas de una máquina asíncrona, sustituyendo la corriente continua suministrada al estator por la corriente trifásica de f.m.m equivalente.

En efecto, en el momento de arranque del motor el campo magnético del estator que gira a una velocidad síncrona interseca a los conductores del rotor fijo, mientras que durante el frenado dinámico, el campo de igual forma es inmóvil, pero gira el rotor y a su velocidad síncrona se produce la misma intersección del campo por los conductores del rotor.

Semejantes regímenes tendrán lugar también a otras velocidades de rotación del rotor, considerando numéricamente iguales el deslizamiento en régimen motor y la velocidad fraccionaria de rotación en régimen de frenado dinámico.

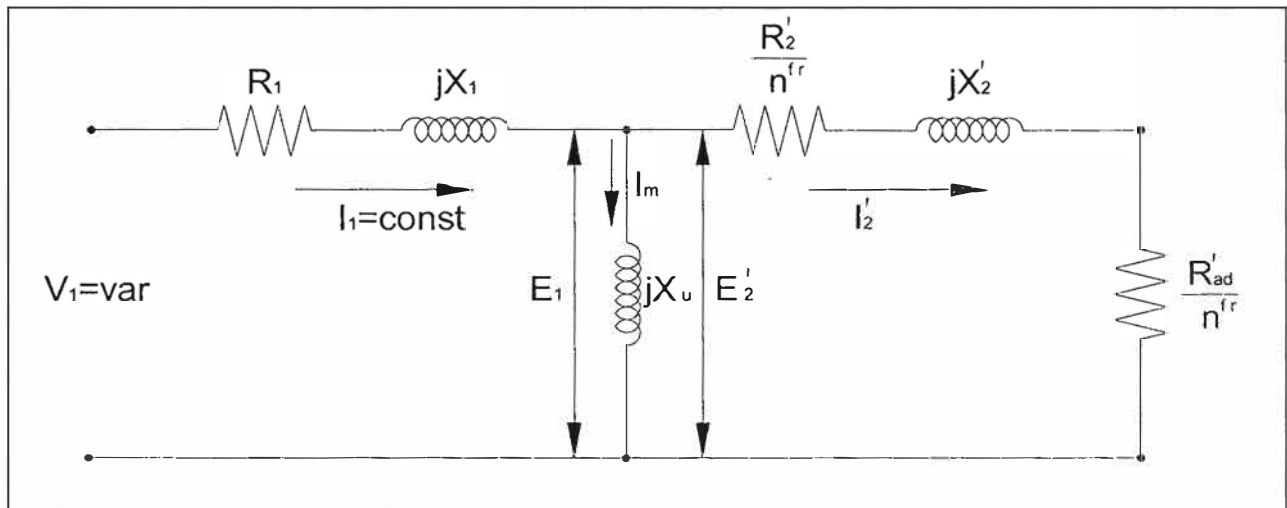


Fig.6.12 Circuito equivalente de un motor asíncrono que se encuentra en régimen de frenado dinámico.

No, obstante, existe una diferencia que consiste en que en régimen de máquina asíncrona, la tensión aplicada al estator es de magnitud constante y varía la corriente del estator, en tanto que en régimen de frenado dinámico se obtiene cualquier corriente del estator deseable de magnitud constante, para lo cual la tensión de la corriente alterna aplicada al estator debe considerarse como variable.

Como base del cálculo de las características mecánicas del frenado dinámico de un motor asíncrono se consideran las tres dependencias insertadas a continuación, las cuales permiten considerar la variación del flujo magnético por la curva de imantación, la variación del flujo magnético por la curva de imantación, la variación de la reacción del rotor y la variación de la reactancia del rotor en función de la velocidad de rotación:

1. La corriente del rotor reducida a la del estator se halla del esquema equivalente de la Figura 6.11:

$$I_2' = \frac{E_2'}{\sqrt{\left(\frac{R_{ad}' + R_2'}{n^{fr}}\right)^2 + (X_2')^2}} = \frac{E_2' n^{fr}}{\sqrt{(R_{ad}' + R_2')^2 + (X_2' n^{fr})^2}} \quad (6.19)$$

$$I_2' = \frac{I_m X_{\mu} n^{fr}}{\sqrt{(R_{ad}' + R_2')^2 + (X_2' n^{fr})^2}} \quad (6.20)$$

2. El vínculo entre las corrientes del estator, del rotor y la corriente resultante de imantación se muestra en la Figura 6.12, el cual puede ser demostrada vectorialmente con la Figura 6.13

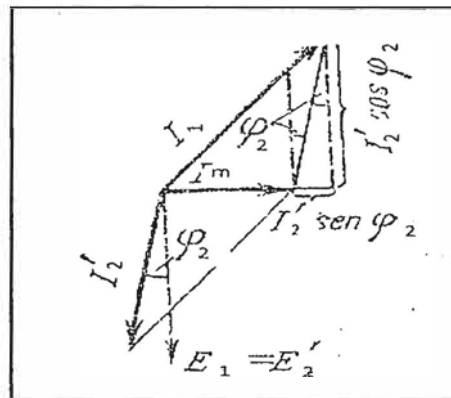


Figura 6.13 Diagrama de corrientes del estator, rotor y la corriente de magnetización para un motor asíncrono.

$$I_1^2 = (I_m + I_2' \cos \varphi_2)^2 + (I_2' \sin \varphi_2)^2 \quad (6.21)$$

De donde:

$$I_1^2 = I_m^2 + (I_2')^2 + (2I_m I_2' \cos \varphi_2)^2 \quad (6.22)$$

El par del motor, como es conocido, es proporcional a las pérdidas eléctricas en el rotor:

$$M = 28.6 \frac{(I_2')^2 (R_{ad}' + R_2')}{n_{sin} S} \quad (6.23)$$

I_1 , es la corriente trifásica de línea del estator equivalente por su f.m.m a la corriente constante de excitación I_{ex} suministrada a la línea del estator, en caso de frenado dinámico.

I_m , es la corriente trifásica de línea de imantación del estator igual aproximadamente a la componente reactiva de la corriente de la marcha en vacío, en amperios.

I_2 , es la corriente trifásica de línea del rotor, en amperios.

E_2 , es la f.e.m de la fase del rotor, en voltios.

X_{μ} , es la reactancia por fase de imantación para conectar las fases en estrella, en ohmios.

R_2 , X_2 , son la resistencia pura y la reactancia por fase del rotor para conectar las fases en

estrella, en ohmios.

M , es el par del motor, en N.m.

n_{sinc} , es la velocidad síncrona de rotación, en rpm.

s , es el deslizamiento del rotor.

Es necesario señalar que la reactancia de imantación que se define por la corriente resultante del motor, varía en caso de frenado dinámico, ya que cambia la corriente de imantación I_m .

$$x_\mu = \frac{E_1}{I_m} \quad (6.24)$$

Sustituyendo en el valor

$$\text{sen}\varphi_2 = \frac{x_2 n^{\text{fr}}}{\sqrt{(R_{\text{ad}} + R_2)^2 + (x_2 n^{\text{fr}})^2}} \quad (6.25)$$

Y el valor I_2 de, se tiene:

$$I_1^2 = I_m^2 + \frac{I_m^2 x_\mu^2 (n^{\text{fr}})^2}{(R_{\text{ad}} + R_2)^2 + (x_2 n^{\text{fr}})^2} + \frac{2I_m^2 x_\mu x_2 (n^{\text{fr}})^2}{(R_{\text{ad}} + R_2)^2 + (x_2 n^{\text{fr}})^2} \quad (6.26)$$

De donde la velocidad fraccionaria de rotación es:

$$n^{\text{fr}} = (R_{\text{ad}} + R_2) \sqrt{\frac{\left(\frac{I_1}{I_m}\right)^2 - 1}{(x_2 + x_\mu)^2 - \left(\frac{I_1}{I_m}\right)^2 (x_2)^2}} \quad (6.27)$$

De 6.26 se determina I_m y se sustituye en 6.19, entonces se tiene la corriente reducida del rotor.

$$I_2 = \frac{I_1 x_\mu}{\sqrt{\left(\frac{R_{\text{ad}} + R_2}{n^{\text{fr}}}\right)^2 + (x_2 + x_\mu)^2}} \quad (6.28)$$

Finalmente, introduciendo en la igualdad 6.23 la velocidad fraccionaria $n^{\text{fr}} = n/n_{\text{sinc}}$ en lugar del deslizamiento s (a frenado dinámico $n^{\text{fr}} = s$), se tiene el momento

$$M = \frac{28.6 (R_{\text{ad}} + R_2)}{n_{\text{sinc}} n^{\text{fr}}} (I_2)^2 \quad (6.29)$$

Estas tres fórmulas, 6.27, 6.28 y 6.29, permiten calcular la característica mecánica de un motor asíncrono, conociendo los datos del motor, la curva de imantación, la corriente continua de excitación y la magnitud de la resistencia exterior en el rotor.

El cálculo es conveniente hacerlo con ayuda de la Tabla auxiliar 6.10. Esta tabla en particular se realiza con la corriente de inyección del triple de la corriente de vacío y la resistencia adicional en el rotor de entre 0.2 - 0.4 (recomendada y confirmada en la

práctica) 0.642 ohmios.

Tabla 6.10 Tabla de ayuda para encontrar las características mecánicas según la excitación en el estator.

| CORRIENTE DE EXCITACIÓN 3 VECES LA CORRIENTE DE VACÍO | | | | | | | | | | | |
|---|----------------|---------------------|---------------|-----------|----------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|--------|--------------------------|----------|----------|
| Curva de Imantación | | Cálculos Auxiliares | | | | | | | Características buscadas | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| I_0^{fr} | $E_{f,1}^{fr}$ | x_0 | $(x_0+x_1)^2$ | $I_1 x_0$ | $\left(\frac{I_1}{I_0}\right)^2$ | $\left(\frac{R_2'}{n^{fr}}\right)^2$ | $\frac{R_2'}{n^{fr}}$ | I_2' | I_2^{fr} | M^{fr} | n^{fr} |
| 0.10 | 0.13 | 46.21 | 2230.06 | 4264.51 | 599.27 | 2.69 | 1.64 | 90.25 | 1.11 | 0.13 | 0.15 |
| 0.20 | 0.26 | 46.21 | 2230.06 | 4264.51 | 149.82 | 13.95 | 3.73 | 90.02 | 1.11 | 0.30 | 0.07 |
| 0.30 | 0.39 | 46.21 | 2230.06 | 4264.51 | 66.59 | 32.96 | 5.74 | 89.64 | 1.11 | 0.45 | 0.04 |
| 0.40 | 0.52 | 46.21 | 2230.06 | 4264.51 | 37.45 | 60.11 | 7.75 | 89.11 | 1.10 | 0.60 | 0.03 |
| 0.50 | 0.63 | 44.64 | 2084.79 | 4120.17 | 23.97 | 89.68 | 9.47 | 88.36 | 1.09 | 0.72 | 0.03 |
| 0.60 | 0.74 | 43.60 | 1990.67 | 4023.95 | 16.65 | 126.13 | 11.23 | 87.46 | 1.08 | 0.84 | 0.02 |
| 0.70 | 0.82 | 41.41 | 1799.88 | 3821.66 | 12.23 | 159.15 | 12.62 | 86.34 | 1.07 | 0.92 | 0.02 |
| 0.80 | 0.90 | 39.77 | 1663.09 | 3669.94 | 9.36 | 197.69 | 14.06 | 85.08 | 1.05 | 1.00 | 0.02 |
| 0.90 | 0.95 | 37.42 | 1477.33 | 3453.53 | 7.40 | 229.70 | 15.16 | 83.59 | 1.03 | 1.04 | 0.02 |
| 1.00 | 1.00 | 35.54 | 1336.64 | 3280.39 | 5.99 | 266.48 | 16.32 | 81.93 | 1.01 | 1.07 | 0.02 |
| 1.10 | 1.04 | 33.44 | 1187.47 | 3086.55 | 4.95 | 299.13 | 17.30 | 80.05 | 0.99 | 1.08 | 0.01 |
| 1.20 | 1.07 | 31.69 | 1069.91 | 2925.02 | 4.16 | 337.05 | 18.36 | 77.98 | 0.96 | 1.09 | 0.01 |
| 1.30 | 1.10 | 29.97 | 959.91 | 2765.62 | 3.55 | 375.59 | 19.38 | 75.68 | 0.93 | 1.09 | 0.01 |
| 1.40 | 1.12 | 28.49 | 870.37 | 2629.00 | 3.06 | 421.49 | 20.53 | 73.14 | 0.90 | 1.07 | 0.01 |
| 1.50 | 1.14 | 27.07 | 788.97 | 2498.57 | 2.66 | 472.66 | 21.74 | 70.34 | 0.87 | 1.05 | 0.01 |
| 1.60 | 1.16 | 25.84 | 721.03 | 2384.44 | 2.34 | 535.92 | 23.15 | 67.26 | 0.83 | 1.02 | 0.01 |
| 1.70 | 1.18 | 24.66 | 659.32 | 2276.01 | 2.07 | 612.13 | 24.74 | 63.83 | 0.79 | 0.99 | 0.01 |
| 1.80 | 1.20 | 23.62 | 606.78 | 2179.64 | 1.85 | 711.95 | 26.68 | 60.02 | 0.74 | 0.94 | 0.01 |
| 1.90 | 1.21 | 22.63 | 558.97 | 2088.23 | 1.66 | 844.29 | 29.06 | 55.75 | 0.69 | 0.88 | 0.01 |
| 2.00 | 1.22 | 21.74 | 517.61 | 2005.96 | 1.50 | 1035.91 | 32.19 | 50.89 | 0.63 | 0.82 | 0.01 |
| 2.10 | 1.24 | 20.93 | 481.56 | 1931.53 | 1.36 | 1337.91 | 36.58 | 45.28 | 0.56 | 0.73 | 0.01 |
| 2.20 | 1.25 | 20.20 | 449.92 | 1863.86 | 1.24 | 1883.77 | 43.40 | 38.58 | 0.48 | 0.63 | 0.01 |
| 2.30 | 1.26 | 19.53 | 421.97 | 1802.08 | 1.13 | 3167.81 | 56.28 | 30.08 | 0.37 | 0.50 | 0.00 |
| 2.40 | 1.28 | 18.91 | 397.13 | 1745.44 | 1.04 | 9803.49 | 99.01 | 17.28 | 0.21 | 0.29 | 0.00 |

Para el caso de estudio se construyó la tabla con una excitación de 3 veces la corriente de vacío.

Transformando algo las expresiones fundamentales. De 6.27 se halla la relación que interviene en las anteriores igualdades:

$$\left(\frac{R_{ad}' + R_2'}{n^{fr}}\right)^2 = \frac{(x_\mu + x_2')^2 - \left(\frac{I_1}{I_m}\right)^2 (x_2')^2}{\left(\frac{I_1}{I_m}\right)^2 - 1} \quad (6.30)$$

Para la corriente del rotor se deja la igualdad anterior:

$$I_2' = \frac{I_1 X_\mu}{\sqrt{\left(\frac{R_{ad} + R_2}{n^{fr}}\right)^2 + (X_2' + X_m)^2}} \quad (6.31)$$

Determinando de 6.30 y 6.31 las magnitudes $\left(\frac{R_2'}{n^{fr}}\right)$ e I_2' , se hallan definitivamente los

datos buscados:

La corriente del rotor

$$I_2 = I_2' \frac{1}{m_i} \quad (6.32)$$

o en fracciones

$$I_2^{fr} = \frac{I_2' \cdot 1}{I_{2.f} m_i}$$

El momento:

$$M = \frac{28.6}{n_{sin}} (I_2')^2 \left(\frac{R_{ad} + R_2'}{n^{fr}}\right) \quad (6.33)$$

O en fracciones:

$$M^{fr} = \frac{28.6}{M_n n_{sin}} (I_2')^2 \left(\frac{R_{ad} + R_2'}{n^{fr}}\right) \quad (6.34)$$

La velocidad

$$n^{fr} = \frac{R_{ad} + R_2'}{\left(\frac{R_{ad} + R_2'}{n^{fr}}\right)} \quad (6.35)$$

Hay que tener presente que es conveniente en el frenado dinámico que la resistencia del rotor sea constante durante la retardación, y que se varíe la corriente continua de excitación para conseguir el par de frenado necesario.

6.2.6 Cálculo de los circuitos de frenado dinámico

El cálculo de los circuitos del frenado dinámico es mejor hacerlo mediante la elección de la característica mecánica racional de la familia de características universales y la determinación por ésta de la corriente requerida de excitación y de la tensión de excitación.

Se examinarán cuales características mecánicas son las más deseables. Como se ve en la figura 6.10, los pares de frenado satisfactorios para que el accionamiento haga alto rápidamente pueden obtenerse al suministrar corriente continua de excitación I_{ex} igual al doble o triple de la corriente trifásica de la marcha en vacío, es decir, I_0 . Estas características aseguran pares de frenado máximos desde 1.25 hasta 2.2 del momento nominal. De las características, para cada corriente de excitación, en los límites del doble al triple, no son satisfactorias las características correspondientes a la impedancia pura $(R_2 + R_{ad})^{fr} = 1$, ya que dan pares de frenado mínimos.

Las características con resistencias $(R_2 + R_{ad})^{fr}=0.2$ y $(R_2 + R_{ad})^{fr}=0.4$ son satisfactorias, con la particularidad de que la característica $(R_2 + R_{ad})^{fr}=0.4$, proporciona un camino menor del accionamiento en caso de frenado que la característica $(R_2 + R_{ad})^{fr}=0.2$, porque a grandes velocidades con las que se obtiene un gran exceso de carrera, en el primer caso el par de frenado es considerablemente mayor que en el segundo.

6.2.7 Cálculo para el caso de estudio

Usando las fórmulas ya descritas anteriormente, se procede a hacer los cálculos, y para facilidad se organiza un cuadro que ayudará y facilitará realizar los cálculos para ver los aspectos mecánicos del motor y poder realizar la parada en el tiempo establecido.

Se procede a calcular las características mecánicas universales de frenado dinámico para el motor de 400Hp (caso de estudio), según las variaciones de corrientes de excitación, resistencias adicionales conectadas al rotor, y velocidad, todos en valores por unidad.

Para que el sistema realice el frenado en el tiempo de desaceleración (para el caso de estudio), y cuyo tiempo es de 13.2 segundos, se necesita un par de frenado de 5300 N.m, aproximadamente según lo calculado y que se presenta en la Figura 6.14.

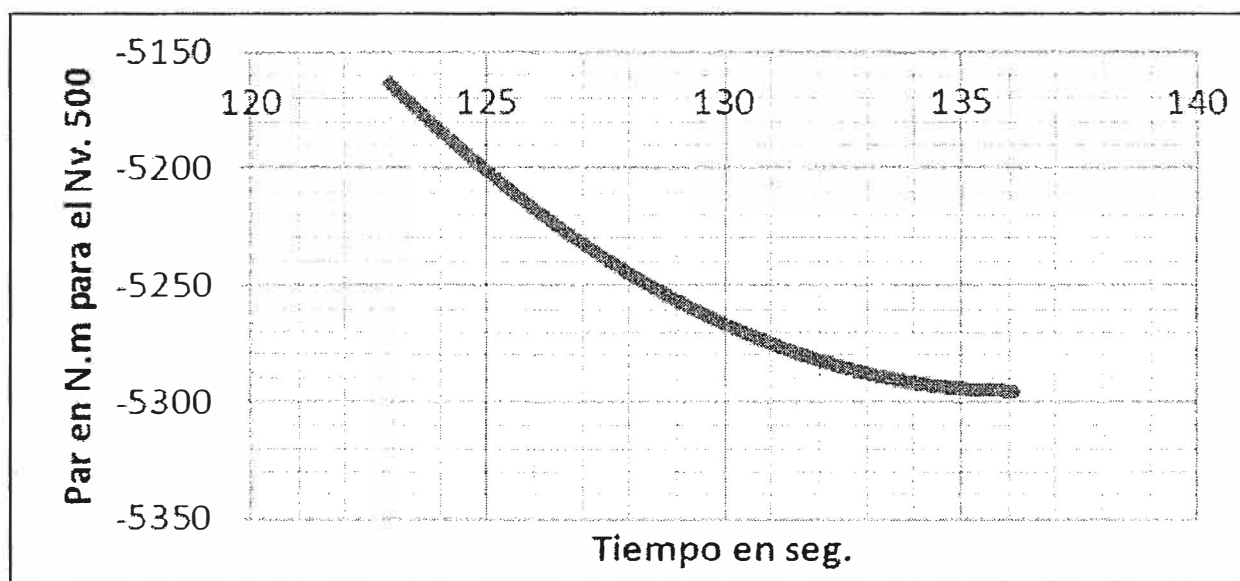


Fig. 6.14 Variación del momento aplicado al motor en el último tramo (desaceleración).

La corriente continua de excitación necesaria para conseguir este momento necesario, es determinado observando la curva de comportamiento mecánico del motor al aplicarse corriente de excitación.

Realizando un análisis, utilizando el concepto "f", se puede llegar a utilizar la resistencia de: 0.642 ohmios, que en la práctica también se utiliza en las operaciones en mina al momento de bajar personal en la jaula-skip y aplicar el frenado dinámico, se obtiene la gráfica de la Figura 6.15.

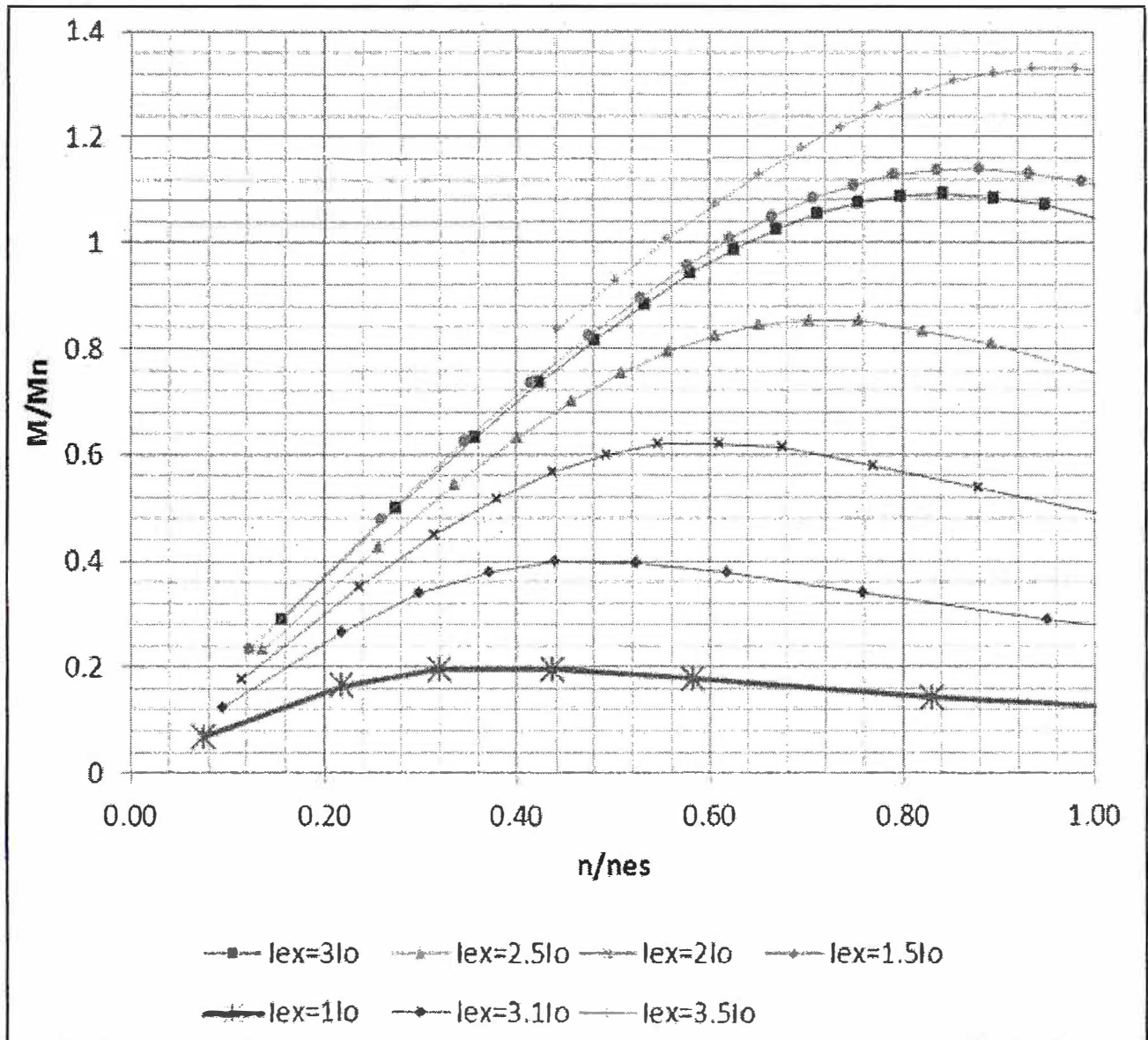


Fig.6.15 Gráfica del comportamiento del motor según la corriente de excitación en el estator, en este caso también se tendrá en cuenta la resistencia en el rotor, la gráfica esta dibujada sin ingreso de resistencia al rotor.

Ahora viendo en la relación $M/M_n=1.09$, se procede a usar el valor de 3 veces la corriente de vacío, lo que permitirá obtener los siguientes cálculos.

Luego la corriente de excitación necesaria será, según la gráfica anterior (Figura 6.13):

$$I_{ex} = 3I_0 = 3(37.7) = 113.1 \text{ amperios}$$

La recomendación técnica para la elección de la U_{ex} , es que se debe elegir un valor pequeño, también este aspecto ya se tocó anteriormente.

El valor elegido de la tensión continua de excitación fue de $U_{ex} = 35 \text{ Vdc}$ y $I_{ex} = 125 \text{ A}$ como valor final de funcionamiento.

La Tabla 6.11 muestra detalles de las tablas integradas, las cuales son la base del cálculo del frenado dinámico

CAPÍTULO VII COSTOS Y PRESUPUESTOS

En este capítulo se presenta el análisis de costos y justificación de la inversión.

7.1 Introducción

Para mejorar la seguridad en el winche manuelita se instala un freno dinámico al motor de 400 HP, para controlar la velocidad de izaje de personal.

7.2 Antecedentes

Preliminarmente se controla la velocidad del winche con el controlador de freno neumático, con un mando mecánico que realiza el operador del winche, la velocidad máxima de izaje de personal es de 4.9343m/seg (Esta velocidad es variable según se aplica el freno neumático). Según el ministerio de energía y minas la velocidad admisible es 4 .16 m/seg. Este winche fue diseñado para el izaje de mineral, pero con las modificaciones que se realizaron con un controlador de freno neumático se tiene márgenes de seguridad y límites aceptables para el izaje de personal. Esta operación es controlada por el operador del winche, pero no es aceptable que manualmente controle la velocidad y frenado del equipo. Por lo tanto se instala un sistema confiable, para poder controlar la velocidad del motor y respectivamente todo el sistema de frenado.

7.3 Solución propuesta

Luego del análisis efectuado, la solución a este problema considera lo siguiente:

1. Adquisición de freno dinámico para que controle la velocidad de izaje de personal.
2. Adquisición de accesorios y dispositivos eléctricos para la instalación de cables, contactores, resistencias que disiparan la energía del motor.

7.4 Alternativas consideradas

Fueron las siguientes:

1. Adquirir un variador de frecuencia para el motor de 400HP, lo que significaba cambio y montaje de motor nuevo, instalación de PLC, modificación de panel de resistencias eléctricas, estas modificaciones se realizaron en 10 días, lo que afectó la producción, el costo se estima en un monto de \$ 447,109.00.
2. Adquirir un freno dinámico para el motor de 400 HP , esto significaría realizar modificaciones en los tableros eléctricos, resistencias, contactores, y la instalación del freno será en 5 días , Este tiempo no afectaría la producción de Manuelita, el costo se estima en un monto **de \$154,675.00**

7.5 Justificación económica

El proyecto se justifica por las siguientes razones:

- 1.- Lograr que la velocidad de transporte de personal este dentro de los límites permisibles del Ministerio de Energía y Minas, se obtendrá una mayor seguridad para los trabajadores
- 2.- Mejorar la operación que realiza el winchero, acortando tiempos muertos de operación del winche, para la extracción de mineral.
- 3.- Cumplir con la velocidad de izaje de personal en interior mina y el estándar de funcionamiento de winches de izaje, que se establece en el Reglamento de Seguridad e Higiene Minera D.S. 046-2001-EM.

7.6 Aspectos económicos

Son mostrados en las Tabla 7.1

Tabla 7.1 Costos y presupuestos de la instalación de frenado dinámico.

| PROYECTO: INSTALACIÓN DE FRENO DINÁMICO WINCHE MANUELITA | | | | | | |
|---|---|----------------|--------------|-----------------|--------------|-------------------|
| PRESUPUESTO DEL PROYECTO | | | | | | |
| Ítem | Actividad | Metrado | Unid. | P. Unit. | Total | Partidas |
| 1 | INGENIERIA Y ADMINISTRACIÓN | | | | | 15,000.00 |
| 1.1. | Diseño e Supervisión | 1.00 | GBL | 3,000.00 | 3,000.00 | |
| 1.2. | Diseño de freno dinámico, incluye planos, esquemas y especificaciones | 1.00 | GBL | 12,000.00 | 12,000.00 | |
| 2 | OBRAS ELÉCTRICAS | | | | | 94,500.00 |
| 2.1 | SUMINISTRO ELÉCTRICO | | | | | |
| 2.1.1 | Suministro de resistencia eléctricas adicionales al sistema actual | 1.00 | GBL | 25,000.00 | 25,000.00 | |
| 2.1.2 | Instalación de contactores adicionales | 1.00 | GBL | 19,500.00 | 19,500.00 | |
| 2.1.3 | Modificaciones eléctricas en el panel del winche | 1.00 | GBL | 10,000.00 | 10,000.00 | |
| 2.1.4 | Instalaciones eléctricas freno dinámico | 1.00 | GBL | 40,000.00 | 40,000.00 | |
| 3 | ADQUISICIÓN DE EQUIPOS | | | | | 25,000.00 |
| 3.1 | Adquisición de DC power supply y relays adicionales | 1.00 | GBL | 25,000.00 | 25,000.00 | |
| | | | | | Sub Total | 134,500.00 |
| 4 | OTROS | | | | | 20,175.00 |
| 4.1 | Contingencias. 15 % | | | | 20,175.00 | |
| TOTAL US\$ \$ | | | | | \$ | 154,675.00 |

CONCLUSIONES

1. En la Tabla 5.7, muestra valores de tiempos de aceleración y desaceleración que son la base de nuestro cálculo y conforme a la velocidad obtenida en la tabla 5.9 (conforme a lo solicitado por el **Reglamento General de Higiene y Seguridad Minera**), y que se ratifican la aproximación en la práctica.

2. La finalidad de este informe es garantizar la seguridad del viaje al descender a las personas desde un nivel superior a uno inferior (en el caso general del caso de estudio, desde el nivel 0 al nivel 500), si nos fijamos en los que especifica el Reglamento General de Higiene y Seguridad Minera, que indica lo siguiente:

“Artículo 350.c) La velocidad de las jaulas para el transporte de personal no podrá exceder de ciento cincuenta (150) metros por minuto para piques de menos de doscientos (200) metros de profundidad. Para piques de mayor profundidad, esta velocidad no debe exceder de doscientos cincuenta (250) metros por minuto, de acuerdo con las especificaciones del fabricante.”

- $150 \text{ m}/\text{min} = 2.5 \text{ m}/\text{s}$, esta velocidad es para piques menores a 200m de profundidad.

- $250 \text{ m}/\text{min} = 4.17 \text{ m}/\text{s}$, esta velocidad aplicable para piques mayores de 200m de profundidad, el cual es el caso de estudio (500 metros).

Se mostrará la Tabla, que garantiza que lo expuesto se cumple con ligero incremento en el tramo de viaje entre el Nv. 0 y el Nv. 240., pero que en la gran totalidad cumple lo establecido por el reglamento.

| Nivel | Unidad | Nv. 240 | Nv. 315 | Nv. 385 | Nv. 450 | Nv. 500 |
|--|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Velocidad máxima de la jaula -skip (metros/seg.) | m/s | 4.36 | 4.17 | 4.12 | 4.08 | 4.07 |

Se puede observar como lo fundamental que es la velocidad cumple con lo buscado y que fue la base del cálculo del resto de parámetros que garantizan la seguridad.

3. Finalmente se puede concluir que el frenado dinámico calculado para los parámetros hallados a partir de la velocidad base y que cumple con el Reglamento de Seguridad e Higiene Minera, son los encontrados en el capítulo 6 y que se aproximan a los que se obtuvieron para ponerlo del papel a la práctica, y cuyos diagramas o planos se adjuntan finalmente.

3. No se realizó la demostración con equipo informático, pero si se adjunta las pruebas que se realizadas de velocidad y corriente en el rotor y estator, estas pruebas demuestran el uso y funcionamiento en la práctica del frenado dinámico (expuesto en el anexo).

ANEXOS

ANEXO A GLOSARIO DE TÉRMINOS MINEROS

Cachimbo.- Sobrenombre con que se designa a los ingenieros que por primera vez realizan práctica en las labores de la mina.

Desmonte.- Acopios de mineral de baja ley o roca, en superficie.

Exploración.- Conjuntos de trabajos administrativos, de gabinete y de campo, tanto superficial como subterráneo, que sean necesarios para localizar, estudiar y evaluar un yacimiento.

Izar.- Transportar mineral y personal por medio del pique maestro el cual se produce cuando el mineral es transportado por medio de baldes y el izaje del personal por medio de jaulas movidas por el tablero del sistema eléctrico.

Jaula.- Armazón rectangular de fierro, de dos por tres metros de área, con dos pisos, cada uno de los cuales dos metros de altura, con ventanas pequeñas enmalladas por donde el timbrero ve en qué nivel se encuentra; tiene una puerta corrediza y capacidad para quince personas por cada piso. Sirve de ascensor, transporta al personal obrero y también, materiales para los trabajos que se realizan en el interior de la mina.

Ley.- Medida que se utiliza para calcular el valor rentable del mineral.

Locomotora.- Máquina que, montada sobre ruedas y movida por energía eléctrica, arrastra carruajes sobre los rieles.

Motorista.- Obrero que se encarga del acarreo o conducción del mineral por medio de locomotora. También transporta al personal.

Operaciones mineras.- Todas y cada una de las actividades que tenga por objeto el desarrollo de la minería.

Perforación.- Acción o proceso de elaborar un orificio circular con un taladro (perforadora) manual o mecánico (eléctrico o hidráulico). 2. apertura de galerías o cámaras de explotación con el uso de cualquier clase de equipo (neumático o mecánico).

Perforista.- Trabajador encargado de ejecutar los taladros para hacer las voladuras.

Pique.- Máquina circular de metal, con un radio de dos metros cincuenta y cuatrocientos cincuenta metros de altura, formando cuatro compartimientos: dos para la jaula con su contrapeso y dos para los baldes. Puede tener instalaciones externas o internas y sirve para transportar mineral, personal y comunicar por todos los niveles. Sin. master shaft.

Rampa.- Un túnel o una galería inclinados que sirve de acceso a las labores mineras, desde la superficie, o como conexión entre niveles de una mina subterránea.

Sistema de Pique.- Modo de transporte de mineral y personal que consiste en llevarlos de un nivel de la mina a otro por medio de la jaula, aparato parecido al elevador.

Subnivel.- Labor que permite acceder a otros lugares mineralizados y que puede quedar

sobre o debajo de la labor principal.

Timbrero.- Trabajador que despacha el mineral o desmante juntamente con el winchero por medio de baldes disponibles de la mina. El transporte de mineral se realiza a través de un aparato electrónico de timbres.

Túnel.- Excavación en roca con dos entradas desde superficie y una geometría y pendiente tal que permite el libre tránsito de personal y/o maquinarias.

Yacimiento.- Concentración natural de minerales que puede ser de interés económico.

Vetas.- Se caracterizan por tener una gran corrida (extensión) y profundidad en comparación con la potencia (espesor), además el ángulo de manteo (inclinación) es superior a 45° y posee cajas (roca lateral que la limita) bien definidas.

Winche.- Del inglés winch. Máquina compuesta de un motor, dos tamboras enrolladas con cable grueso de una pulgada, constituye parte del pique y sirve para el izaje de personal, mineral o desmante.

Winche de arrastre.- Máquina que con una cuchara, desdentada, sirve para sacar mineral o desmante a cortas distancias.

Winchero.- Operario que trabaja conjuntamente con el timbrero de jaula, manipulando el tablero electrónico para subir o bajar el winche.

ANEXO B INFORME TÉCNICO PRUEBAS ELÉCTRICAS DE MOTOR 400 HP

Este anexo presenta el Informe Técnico ATAP – 07 -009 realizado por ABB el 1 de abril del 2007 para la Unidad Minera Argentum.

Este informe técnico se centra en las pruebas eléctricas del motor de 400 HP. El informe consta de las siguientes partes:

- Objetivo y Fecha De Inspección Eléctrica.
- Producto
- Presentes (personal)
- Resumen
- Indicaciones del cliente
- Datos del servicio
- Comprobaciones en el lugar
- Trabajos realizados
- Trabajos pendientes
- Acuerdos con el cliente
- Comentarios
- Anexos

Para este caso el anexo es el protocolo de pruebas MR 2193.

PRUEBA DE APLICACIÓN DEL USO DEL FRENADO DINÁMICO AL MOTOR DE 400HP EN LA MINA ARGENTUM S.A.

| MEDICION DE PARAMETROS DEL MOTOR DEL WINCHE MANUELITA EN LA <u>BAJADA</u> | | | | | | |
|--|---------------|------------------------|------------------------|--------------------------|---------------------------------------|---|
| USANDO EL FRENADO DINAMICO | | | | | | |
| Ítem | Prueba | Paso de Niveles | Velocidad (RPM) | Velocidad (m/s) * | Corriente del Rotor (Amperios) | Corriente del Estator (Amperios) |
| 1 | 0 al 450 | 0-125 | 220 | 10.53 | 100 | 33 |
| 2 | | 125-240 | 240 | 11.49 | 200 | 43 |
| 3 | | 240-315 | 240 | 11.49 | 280 | 41 |
| 4 | | 315-385 | 240 | 11.49 | 300 | 45 |
| 5 | | 385-450 | 260 | 12.45 | 320 | 42 |
| 11 | 0 al 385 | 0-125 | 320 | 5.74 | 120 | 47 |
| 12 | | 125-240 | 260 | 10.53 | 220 | 45 |
| 13 | | 240-315 | 280 | 13.41 | 280 | 44 |
| 14 | | 315-385 | 260 | 16.28 | 340 | 40 |

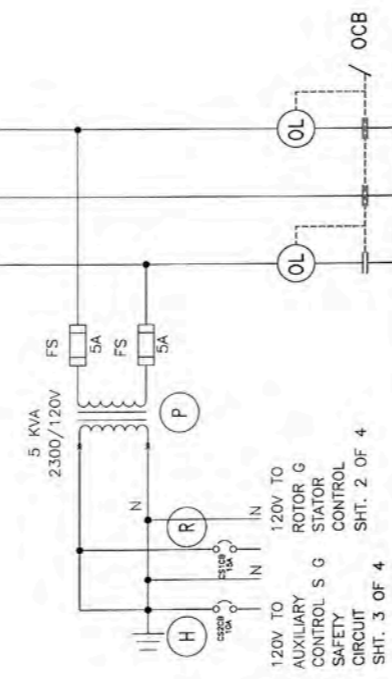
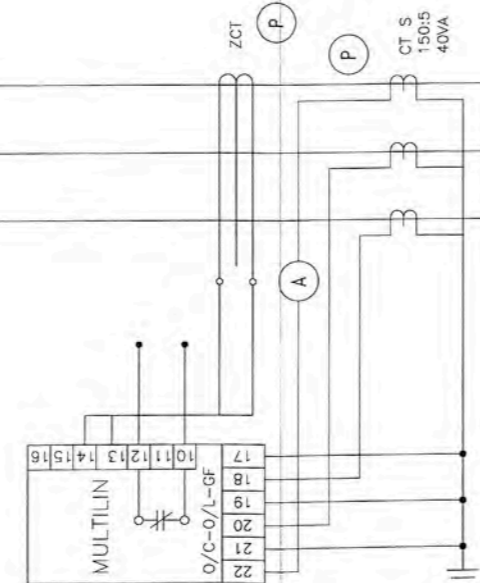
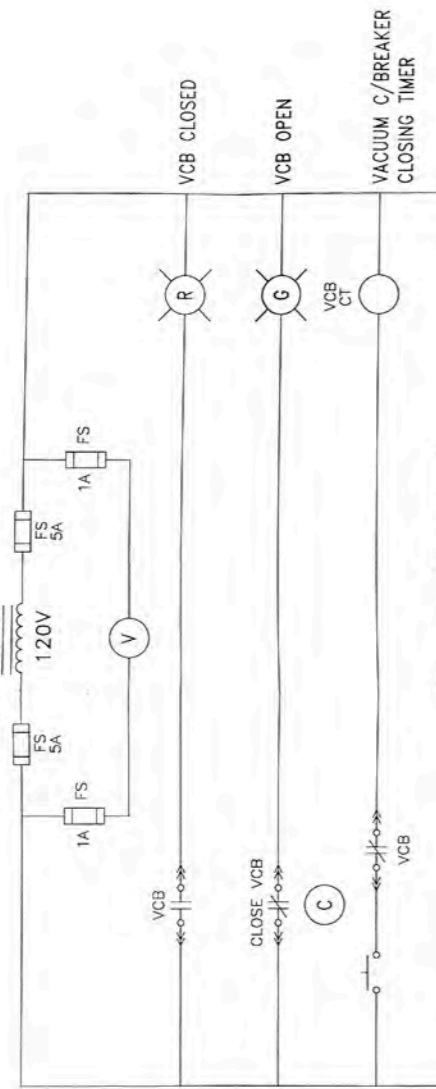
* Se verifica que se cumple el requerimiento de la velocidad.

ANEXO C PLANOS RELACIONADOS

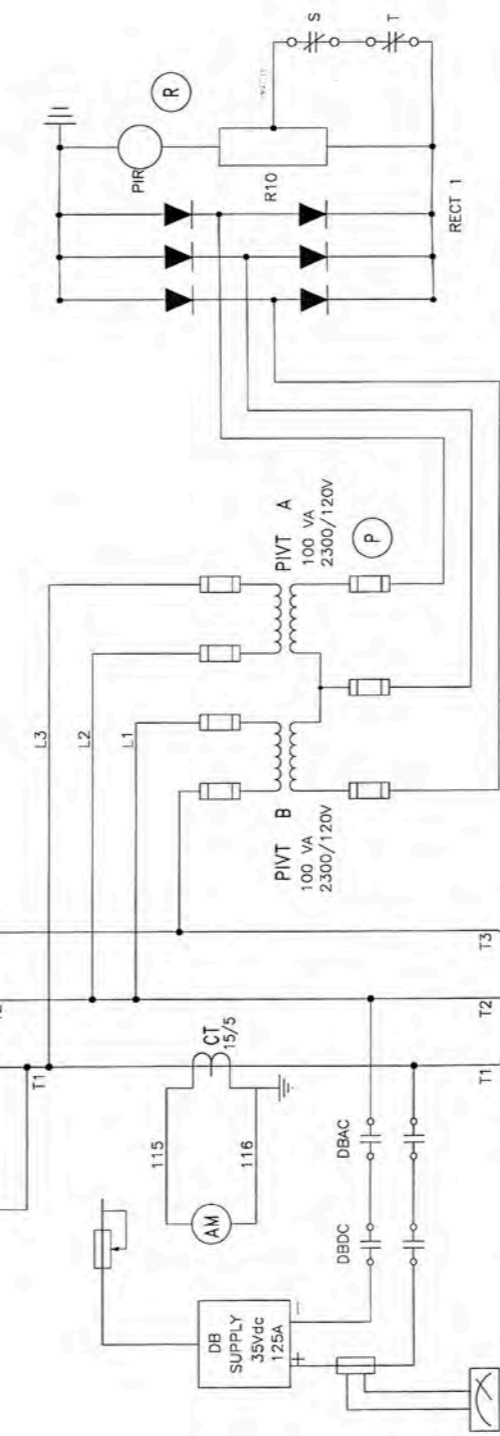
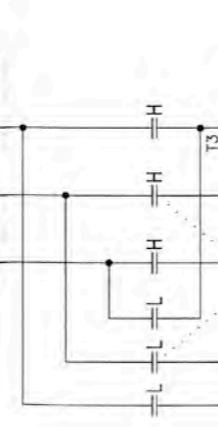
Este anexo consta de tres planos:

1. Diagrama elemental eléctrico de frenado dinámico del winche-Ingersollrand-72"x60"
2. Diagrama de Control de frenado dinámico del winche-Ingersollrand-72"x60"
3. Diagrama de Control de winche de izaje del winche-Ingersollrand-72"x60"

ALIMENTACION
2300V, 3φ, 60Hz
(SUPPLY BY CLIENT)



120V TO
MOTOR
CONTROL
SAFETY
CIRCUIT
SHT. 3 OF 4

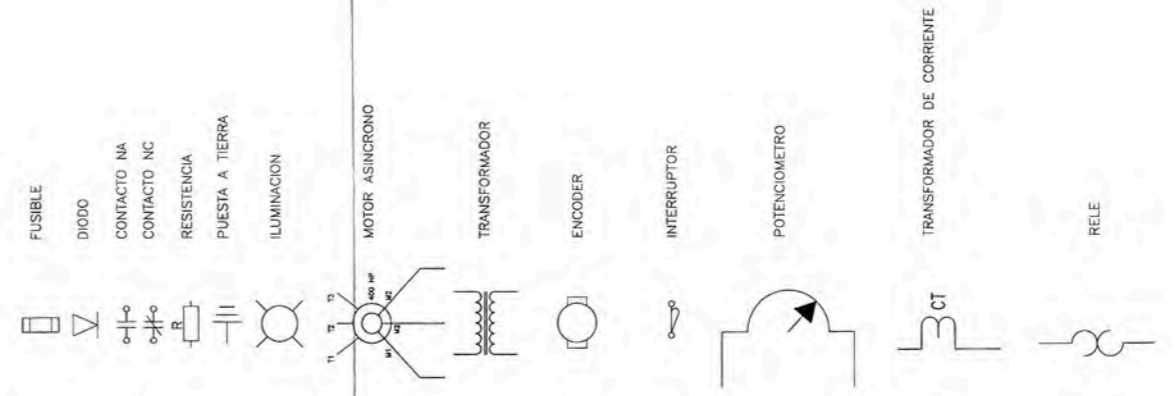


NOTE:
HOIST AND LOWER DIRECTIONS
ARE REFERENCED TO RIGHT HAND DRUM

HOIST MOTOR
298W(400 HP)
GE MODEL 86688A
TYPE MT FRAME 17B
STATOR 2300V 96A 3HP
ROTOR 480V 395A 585 RPM
SERIAL 680440

TACHO GENERATOR
SCALED 7.5-0-5.5 m/s
(1500-0-1500 rpm)
WHERE 7.5m/s-1477 rpm
-42544dc

LEYENDA



| N° | FECHA | DESCRIPCION |
|----|----------|---------------------|
| 1 | 16/11/09 | PLANO DE REFERENCIA |

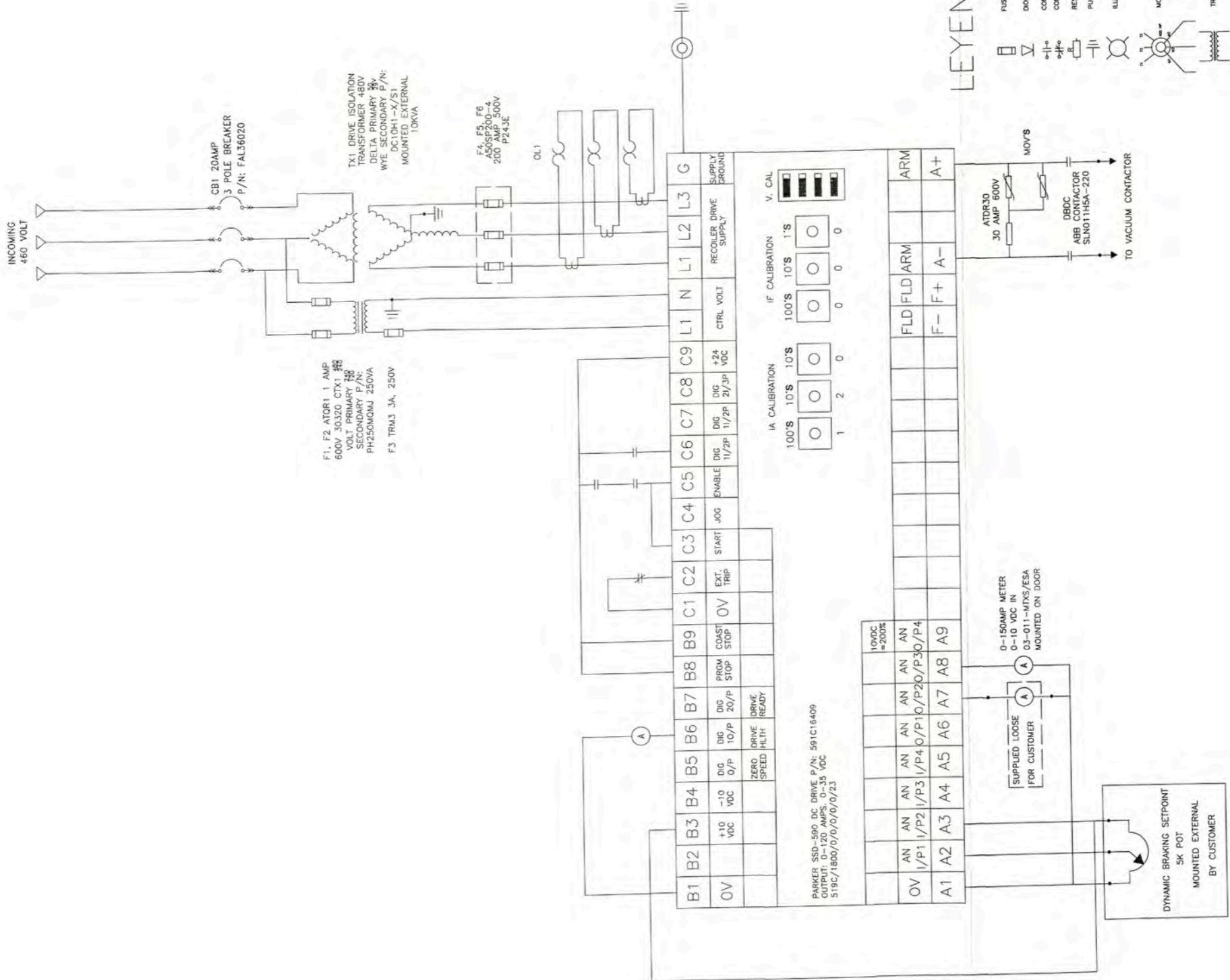
| REVISION | FECHA | DESCRIPCION |
|----------|-------|-------------|
| 1 | | |
| 2 | | |
| 3 | | |
| 4 | | |
| 5 | | |
| 6 | | |
| 7 | | |
| 8 | | |
| 9 | | |
| 10 | | |
| 11 | | |
| 12 | | |
| 13 | | |
| 14 | | |
| 15 | | |
| 16 | | |
| 17 | | |
| 18 | | |
| 19 | | |
| 20 | | |
| 21 | | |
| 22 | | |
| 23 | | |
| 24 | | |
| 25 | | |
| 26 | | |
| 27 | | |
| 28 | | |
| 29 | | |
| 30 | | |
| 31 | | |
| 32 | | |
| 33 | | |
| 34 | | |
| 35 | | |
| 36 | | |
| 37 | | |
| 38 | | |
| 39 | | |
| 40 | | |
| 41 | | |
| 42 | | |
| 43 | | |
| 44 | | |
| 45 | | |
| 46 | | |
| 47 | | |
| 48 | | |
| 49 | | |
| 50 | | |
| 51 | | |
| 52 | | |
| 53 | | |
| 54 | | |
| 55 | | |
| 56 | | |
| 57 | | |
| 58 | | |
| 59 | | |
| 60 | | |
| 61 | | |
| 62 | | |
| 63 | | |
| 64 | | |
| 65 | | |
| 66 | | |
| 67 | | |
| 68 | | |
| 69 | | |
| 70 | | |
| 71 | | |
| 72 | | |
| 73 | | |
| 74 | | |
| 75 | | |
| 76 | | |
| 77 | | |
| 78 | | |
| 79 | | |
| 80 | | |
| 81 | | |
| 82 | | |
| 83 | | |
| 84 | | |
| 85 | | |
| 86 | | |
| 87 | | |
| 88 | | |
| 89 | | |
| 90 | | |
| 91 | | |
| 92 | | |
| 93 | | |
| 94 | | |
| 95 | | |
| 96 | | |
| 97 | | |
| 98 | | |
| 99 | | |
| 100 | | |

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA

PROYECTO : EMPRESA-MINERA-ARGENTUM

TITULO : DIAGRAMA-ELEMENTAL-ELECTRICO FRENADO-DINAMICO-DEL WINCHE-INGERSOLLRAND-72"X60"

ESCALA S/E FECHA 16-11-06 PLANO N° E-01 REVISION A



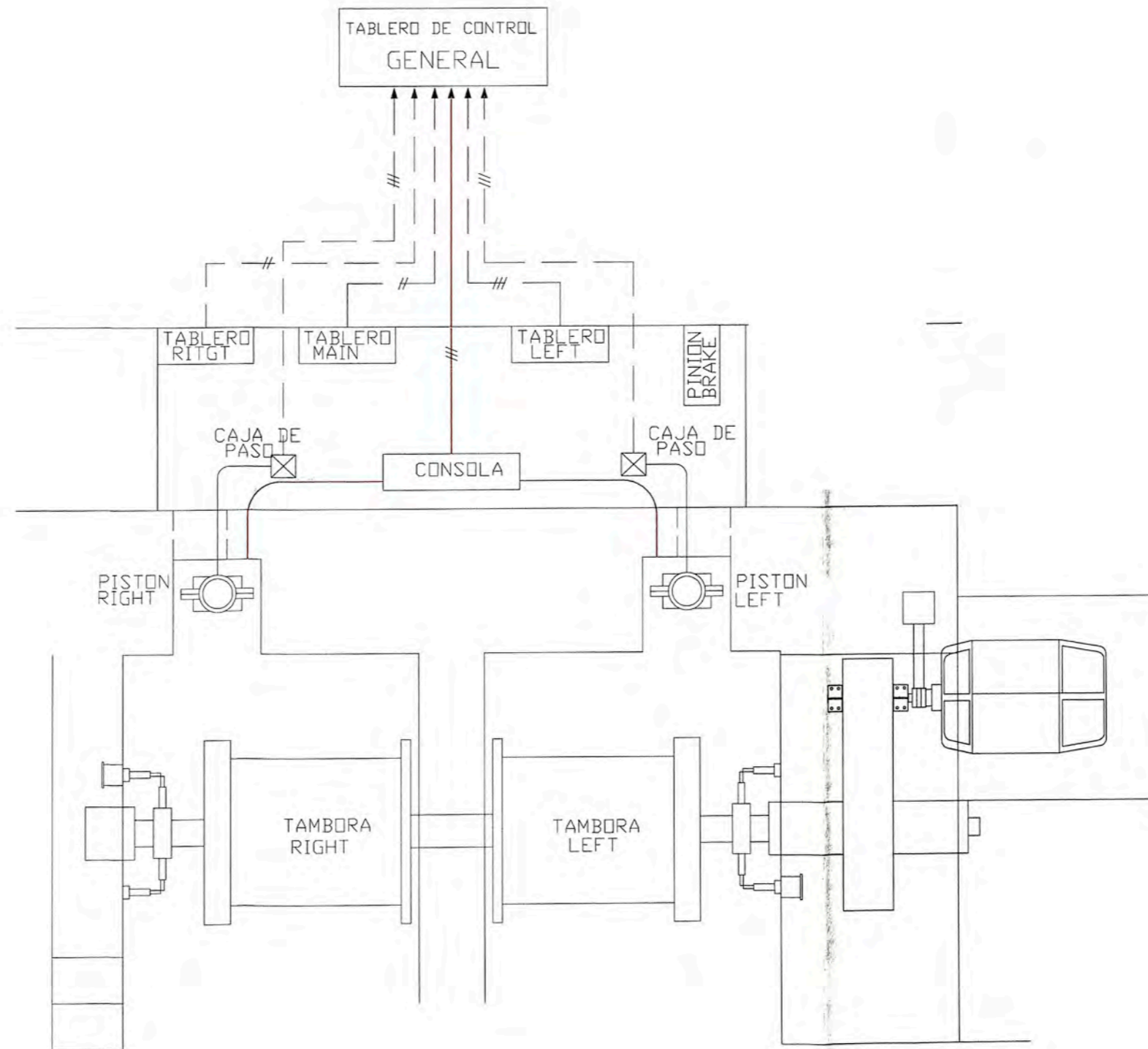
| | | | | | | | | | | | |
|------------|---------------------|----|-------|-------------|------|--------|---------------------|--------|-------|-------|------------------------------------|
| PLANO N° 1 | PLANO DE REFERENCIA | N° | FECHA | DESCRIPCION | REV. | APROB. | REVISION INGENIERIA | NOMBRE | FIRMA | FECHA | UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA |
| --- | --- | △ | -/-/- | --- | | | | | | | |
| --- | --- | △ | -/-/- | --- | | | | | | | |
| --- | --- | △ | -/-/- | --- | | | | | | | |
| --- | --- | △ | -/-/- | --- | | | | | | | |
| --- | --- | △ | -/-/- | --- | | | | | | | |
| --- | --- | △ | -/-/- | --- | | | | | | | |
| --- | --- | △ | -/-/- | --- | | | | | | | |
| --- | --- | △ | -/-/- | --- | | | | | | | |
| --- | --- | △ | -/-/- | --- | | | | | | | |
| --- | --- | △ | -/-/- | --- | | | | | | | |
| --- | --- | △ | -/-/- | --- | | | | | | | |

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA
PROYECTO : EMPRESA-MINERA-ARGENTUM
TITULO : DIAGRAMA-DE-CONTROL-FRENADO-DINAMICO UNIDAD-MANUELITA WINCHE-INGERSOLLRAND-72"X60"
ESCALA S/E FECHA 16-11-06 PLANO N° E-02 REVISION A

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

APROBADO: R.B.U. -/-/-
REVISADO: R.B.U. -/-/-
DISEÑADO: - -/-/-
DIBUJADO: W.R.Y. 16-11-06

REVISION INGENIERIA



| PLANO N° | PLANO DE REFERENCIA | N° | FECHA | DESCRIPCION | POR | REV. | APROB. | REVISION INGENIERIA |
|----------|---------------------|----|----------|-------------|-----|------|--------|---------------------|
| --- | --- | △ | -/-/- | | | | | |
| --- | --- | △ | -/-/- | | | | | |
| --- | --- | △ | -/-/- | | | | | |
| --- | --- | △ | -/-/- | | | | | |
| --- | --- | △ | -/-/- | | | | | |
| --- | --- | △ | -/-/- | | | | | |
| --- | --- | △ | -/-/- | | | | | |
| --- | --- | △ | 16/11/09 | | | | | |


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA

PROYECTO : EMPRESA-MINERA-ARGENTUM

TITULO : DIAGRAMA-DE-CONTROL-DE-WINCHE-DE-IZAJE
 UNIDAD-MANUELITA
 WINCHE-INGERSOLLRAND-72"X60"

ESCALA : S/E FECHA : 16-11-06 PLANO N° : E-03 REVISION : A

| | | | | | |
|------------|--------|----------|--------|-------|-------|
| APROBADO : | R.B.U. | -/-/- | | | |
| REVISADO : | R.B.U. | -/-/- | | | |
| DESEÑADO : | - | -/-/- | | | |
| DEBUCADO : | W.R.Y. | 16-11-06 | | | |
| C.M. | C.M. | A.M. | NOMBRE | FIRMA | FECHA |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |



BIBLIOGRAFÍA

1. Alejandro Novitzky, "Transporte y extracción en minas y a cielo abierto", Buenos Aires, 1966.
2. Stephen J. Chapman, "Maquinas Eléctricas", editorial Mac Graw Hill, Cuarta edición.
3. M.P. Kostenko, "Maquinas Eléctricas", Tomo II, Editorial Mir, Moscú, 1976.
4. Jesús Fraile Mora, "Maquinas Eléctricas", editorial Mac Graw Hill, Sexta edición.
5. Vedam Subrahmanyam, "Electric drives: concepts and applications", editorial Mac Graw Hill, 1994.
6. William Wesley Staley, "Mine Plant Desing", editorial Mac Graw Hill, Segunda edición, 1949.
7. S. Veshenevski, "Características de los Motores en el Accionamiento Eléctrico", editorial MIR, 1972.
8. Información tomada y recopilada en la Unidad Minera Manuelita - Argentum – Morococha – Junín.