



Ministerio de Educación Superior  
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa  
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”  
Facultad Metalurgia – Electromecánica

# **Trabajo de Diploma**

**En opción al título de**

**INGENIERO ELÉCTRICO**

**Título: “Impacto energético y técnico-económico del empleo de variadores de velocidad en la planta de secaderos de la empresa Cmdte. René Ramos Latour”.**

**Autor:** David San Miguel Hidalgo.

**Tutores:** M.Sc Wilber Acuña Rodríguez.

Ing. Alberto Reyes Sablón.

Moa, Holguín

“Año 53 de la Revolución”



## Declaración de autoridad

**Yo:** David San Miguel Hidalgo.

Autor de este trabajo de Diploma tutorado por el M.Sc Wilber Acuña Rodríguez y el Ing. Alberto Reyes Sablón, certifico la propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, el cual podrá hacer uso del mismo para fines docentes y educativos.

-----  
David San Miguel Hidalgo  
(Autor)

-----  
M. Sc Wilber Acuña Rodríguez  
(Tutor)

-----  
Ing. Alberto Reyes Sablón  
(Tutor)



## Pensamiento

Investigar es ver lo que todo el mundo ha visto, y pensar lo que nadie más ha pensado.

Albert Szent Gyorgi. (1893-1986) médico húngaro.



## Dedicatoria

Dedico este trabajo:

A mi Papá, a mi Mamá, a mis Hermanas Patricia y Daulema, a mis sobrinos Daimelis y Mircel.

A mis Familiares en general por haberme apoyado en cada momento de mi carrera y depositar toda la confianza, el amor y el cariño en Mí.

A mis Tutores, por haberme ayudado dando el paso al frente para realizar este trabajo con su impresionante experiencia.

A mis amigos, que siempre confiaron en mí, y de los cuales recibí un apoyo infinito en los buenos y malos momentos.



## Agradecimientos

- A Dios y a la vida por brindarme la oportunidad de ver hecho realidad este sueño.
- A mis padres Tomás San Miguel Quiala y Susana Hidalgo Hidalgo y a mis hermanas Patricia y Daulema por su apoyo incondicional.
- A mis tutores M.Sc Wilber Acuña Rodríguez y el Ing. Alberto Reyes Sablón
- Al colectivo de profesores en general, especialmente a Yordan Guerrero Rojas.
- A mi primo hermano Carlos Leyva Hidalgo, a mi cuñado Mircel Hidalgo Martínez, a mis otras madres Sonia Lóriga y Emma Mejías Breffe y a mis otros padres Guberto Lecusay y José Ramón Rodríguez Herrera.
- A mis compañeros de aula y amigos, en especial a Pablo A. Lecusay Lóriga, Marisleidis Soler Manso, Yanela Cuza Herrera, Yoendris Rodríguez Hechavarría, Jorge A. Carralero Rodríguez, Fernando Vázquez Aballe, Dainier Ávila Sánchez y William Quesada Pupo.

*A todos:*

MUCHAS GRACIAS.



## Resumen

En el presente trabajo se realiza un estudio sobre el impacto energético y económico del empleo de variadores de velocidad en la planta de secaderos de la Empresa Cmdte. René Ramos Latour, distribuido en tres capítulos, en los que se realiza una descripción de la planta y su proceso tecnológico, se evalúa el empleo de dichos equipos, mostrándose distintos aspectos como la composición de un variador de frecuencia, sus principales aplicaciones y funciones, y se describen los accionamientos a evaluar. Se propone una metodología para la evaluación de variadores que están operando, así como para realizar una correcta selección de los mismos y se muestra cuanta energía y divisa se ahorra con la propuesta que se hace y los impactos sociales y ambientales del proyecto.



## Summary

Presently work is carried out a study on the energy and economic impact of the employment of variadores of speed in the plant of dry of the Company Cmdte. René Ramos Latour, distributed in three chapters, in those that is carried out a description of the plant and their technological process, the employment of this teams is evaluated, being shown different aspects like the composition of a variador of frequency, its main applications and functions, and the workings are described to evaluate. It intends a methodology for the variadores evaluation that they are operating, as well as to carry out a correct selection of the same ones and all energy is shown and it sights it is saved with the proposal that one makes and the social and environmental impacts of the project.



## Índice

Declaración de autoridad .....	I
Pensamiento .....	II
Dedicatoria.....	III
Agradecimientos .....	IV
Resumen .....	V
Summary .....	VI
Índice .....	VII
Introducción General .....	1
Situación Problémica .....	2
Problema .....	2
Objeto de Estudio .....	2
Campo de Acción .....	2
Objetivo .....	2
Objetivos Específicos .....	2
Hipótesis.....	3
Resultados esperados .....	3
Capítulo 1. Generalidades.....	4
1.1 Reseña Histórica .....	4
1.2 Breve descripción del proceso de producción.....	5
1.3 Caracterización energética de la planta de secaderos.....	9
1.4 Evaluación del uso de variadores de velocidad.....	10
1.4.1 Composición de un Variador de frecuencia.....	16
1.4.2 Aplicaciones de los variadores de frecuencia.....	20
1.4.3 Principales funciones de los variadores de velocidad electrónicos .....	21
1.4.4 Comparación de las características de funcionamiento que demuestran la gran importancia de los variadores de velocidad del tipo convertidores de frecuencia. ....	24
1.5 Descripción del accionamiento a evaluar.....	25
Capítulo 2. Variador de velocidad.....	28
2.1 Selección del variador de velocidad.....	28
2.1.1 Calculo del convertidor para el proceso del arranque.....	30
2.1.2 Problema del frenado .....	30
2.2 Evaluación de la selección de los variadores de velocidad que están operando, cálculo de la corriente del variador de velocidad, de la corriente de arranque y de la potencia de los variadores .....	30
2.2.1 Selección de los variadores de velocidad por Altivar 71 (ATV 71). ....	40
2.2.2 Selección de los variadores de velocidad Yaskawa .....	44
Capítulo 3. Análisis de los resultados .....	48





3.1 Valoración técnica de la explotación de los variadores de velocidad .....	48
3.2 Cálculo del aporte económico .....	50
3.2.1 Cálculo del tiempo de amortización de la inversión. ....	54
3.3 Valoración Medioambiental .....	54
3.4 Valoración Social .....	55
Conclusiones .....	56
Recomendaciones .....	57
Bibliografía.....	58
Anexos.....	61



## Introducción General

La industria cubana del níquel, inmersa en un creciente y constante ascenso en sus producciones, demanda cada vez más un apreciable consumo de energía, cuyos portadores deciden la rentabilidad de sus empresas, que están entre los once más grandes consumidores de energía eléctrica del país. Para cumplir estos lineamientos a mediano y largo plazo, se requiere que paralelamente al crecimiento progresivo se perfeccionen los parámetros y regímenes de trabajo de las instalaciones tecnológicas, para explotar de una forma más racional y eficiente las grandes reservas de recursos minerales existentes en los yacimientos niquelíferos en la zona de Mayarí, a raíz de esta necesidad de ahorro, se desarrolla este estudio, que se encarga de obtener una información detallada sobre el impacto y funcionalidad del empleo de los de variadores de velocidad así como una adecuada selección de los mismos en función de sus cargas, para el trabajo que realizan en la planta de secaderos de la empresa Cmdte. René Ramos Latour.

Esta empresa tecnológicamente es una de las vanguardias a nivel nacional, en la asimilación y aplicación de nuevas tecnologías como son los variadores de velocidad por frecuencia, equipos con los cuales aún resta mucho por hacer en cuanto aplicaciones y eficiencia se requiere, el uso adecuado de estos hace a cualquier proceso productivo mucho más eficiente y sencillo, mas si el uso y aplicación es solo por intuición o por simple inspección puede que los resultados obtenidos no sean los mejores pues en vez de ahorrar pudiera también contribuir con el gasto de energía que no se recupera yendo al medio a crear oscilaciones ruidos y contribuir con el calentamiento global. No hay que olvidar que cualquier equipo con electrónica de potencia son generadores de armónicos causantes de muchos problemas en las redes por eso, el uso debe ser bien medido y calculado adecuadamente.

Este trabajo realiza un estudio de la aplicación adecuada o no de los variadores existentes y estable una metodología para el cálculo y selección de los variadores de velocidad por frecuencia en función de la carga que mueven, en este caso de la potencia de sus respectivos motores.

En función del problema de la mala selección de los variadores, casi siempre sobredimensionados es que se han sentado las bases para esta investigación.



## **Situación Problémica**

En un apreciable por ciento de los accionamientos eléctricos en la industria cubana del níquel están presentes los variadores de velocidad, desconociéndose como incide el empleo de estos en los resultados de la planta de secaderos de la empresa Cmdte. René Ramos Latour. La rotura consecutiva por causas desconocidas en estos equipos, hace necesario un estudio detallado para determinar las causas y consecuencias que se verifica en esta empresa de producción continua.

## **Problema**

Desconocimiento sobre la funcionalidad y rentabilidad del empleo de variadores de velocidad en los accionamientos eléctricos de la planta de secaderos de la empresa Cmdte. René Ramos Latour.

## **Objeto de Estudio**

Variadores de velocidad.

## **Campo de Acción**

Variación de velocidad por frecuencia.

## **Objetivo**

Valorar energética y económicamente el impacto de la utilización de variadores de velocidad en la planta de secaderos de la empresa Cmdte. René Ramos Latour.

## **Objetivos Específicos**

- Determinar cómo incide energética y técnicamente en la empresa Cmdte. René Ramos Latour el empleo de variadores de velocidad en la planta de secaderos.



- Sugerir una correcta selección y programación de los variadores de velocidad instalados en la planta de secaderos ante los distintos regímenes y condiciones externas de trabajo a que están sometidos.
- Estimar económicamente el costo del kW instalado por variadores de acuerdo a la máquina que mueve.

### **Hipótesis**

Si se realiza un estudio sobre las ventajas y la situación de la explotación actual de variadores de velocidad en la planta de secaderos de la empresa Cmdte. René Ramos Latour y su funcionalidad ante los regímenes y condiciones externas a que están sometidos, se podrá determinar si resulta económico o no para la empresa el empleo de dichos equipos.

### **Resultados esperados**

- Obtener una información detallada y actualizada sobre el impacto y funcionalidad del empleo de los de variadores de velocidad en la planta de secaderos de la empresa Cmdte. René Ramos Latour.
- Obtener adecuada selección de los variadores en función de sus cargas y correcta configuración para el trabajo que realiza.
- Socializar el resultado del trabajo con los trabajadores y técnicos de la planta y el resto de la empresa



## Capítulo 1. Generalidades.

### 1.1 Reseña Histórica.

En Marzo de 1942 comenzó la construcción en Nicaro de la primera planta de obtención de Níquel a partir de las lateritas. El motivo de la construcción de la fábrica fue el aumento de la demanda del Níquel como metal estratégico para la Segunda Guerra Mundial. La puesta en marcha y la primera producción de óxido de Níquel se produjo en diciembre de 1943.

Al terminar la S.G.M., al bajar el precio del Níquel, la planta fue cerrada en marzo de 1947.

Al producirse la guerra en Corea en 1951, se rehabilitó la planta y reinició su operación en 1952.

En los años 1955 a 1956, la planta fue ampliada un 75 % la capacidad inicial de diseño, para hacer la operación económicamente atractiva.

En Septiembre de 1960 la planta es nacionalizada, pasando a manos del estado cubano a partir de 1976 se inició un proceso de rehabilitación tecnológico general de la planta, con el objetivo de efectuar la reparación y modernización total de los equipos fundamentales.

En el año 1977 se efectúan una serie de estudios en laboratorios de un centro de investigaciones en La Habana, para definir una tecnología para la separación del Cobalto. Los resultados se aplicaron en pruebas a escala piloto en Nicaro para construir luego una planta demostrativa y construir una planta de separación a escala industrial.

En 1981 se adquiere una nueva unidad de molienda (la Nro. 7).

En 1982 la planta alcanza la mayor producción de su historia.

A partir de 1983 se comienza la separación del Cobalto con una instalación provisional diseñada y construida en Nicaro.

En 1996 se comienza a aplicar petróleo aditivo al mineral en la Planta de Preparación de Mineral, posterior al secado y antes de la molienda, con lo cual se hace posible eliminar la Planta de Gas para el gas reductor de los hornos de reducción.

También en 1996 se moderniza completamente la Planta de Hornos quedando sólo 11 hornos de los 22 que existían, a los cuales se les aplica la tecnología de avanzada PRIOR. Paralelamente se le moderniza el sistema de transporte neumático desde Silos a las tolvas de los hornos.

En Junio de 1988 entra en operación una Nueva Planta de Molienda que sustituye totalmente a la antigua planta, quedando de ella en operación sólo la Unidad Nro. 7, junto a las 2 nuevas unidades de tecnología de doble cámara de molienda.



A lo largo de la historia de la fábrica, se ha efectuado un trabajo de ampliación, rehabilitación y modernización, introduciéndose en ella los logros de la ciencia y la técnica.

### **1.2 Breve descripción del proceso de producción.**

Actualmente el proceso consta de varias plantas de producción.

- Planta de Preparación de Mineral.
- Planta de Hornos de Reducción.
- Planta de Lixiviación y Lavado.
- Planta de Recuperación de Amoniaco y Sinter.

El mineral llega a la fábrica procedente de la mina Pinares de Mayarí. El mineral es extraído con palas de arrastre y excavadoras y es transportado en camiones hasta plataformas desde donde pasa al transportador de banda, que lo descarga en los depósitos, de este se alimenta a los carros volquetes que lo transportan por ferrocarril hasta el depósito exterior del mineral de la Planta de Preparación de Mineral.

#### **- Planta de Preparación de Mineral.**

El mineral procedente de la mina Pinares de Mayarí es transportado en vagones por ferrocarril y descargado en la zona del viradero del depósito de mineral exterior, este posee una capacidad aproximada de 210 000 ton, Con la utilización de grúas indias de puente el mineral se homogeniza formando pilas múltiples, estas alimentan desde las pilas a los alimentadores móviles que lo descargan a 2 sistemas de bandas transportadoras de mineral húmedo (Sist-A y Sist-B), los alimentadores tienen una capacidad de descarga de 270 t/h y la banda transportadora de 360 t/h, dejando pasar a través de la parrilla superior los fragmentos menores de 400 mm, los mayores son separados del proceso, cae a los trituradores de rodillos dentados que reducen el tamaño del mineral de 400mm a menos de 100mm. El mineral triturado es transportado en bandas hacia la sección de secado, donde el mineral es descargado mediante deflectores (Machetes) desde las bandas transportadoras hacia las tolvas de alimentadores de esteras (AS-1 al 7), el sobrante es transportado en bandas para ser descargado al depósito



interior de reserva. En este depósito existen dos grúas viajeras (GH #1 y #2) que suministran el mineral a los secaderos en caso de fallo en la alimentación desde el exterior.

El mineral húmedo es descargado desde las bandas hacia las tolvas de los alimentadores de los secaderos por medio de deflectores de flujo (machetes) ubicados en cada transportador. Los alimentadores dosifican la carga a los secaderos (sec #1 al #7), regulándola según el mineral. En el interior de estos se produce el proceso de secado del mineral por medio de gases calientes generados en la cámara de combustión de cada secadero, en los cuales se alcanza una temperatura de 1340 °C en los secaderos 1 al 3 y de 900 °C en los secaderos 4 al 7. El mineral penetra al secadero con una humedad de 30-32%. Los gases generados en el proceso de combustión y secado abandonan el secadero con una temperatura promedio de 85-90 °C y arrastran aproximadamente el 25% de la carga total del secadero en forma de polvo, una parte del cual el 75% se precipita en los ciclones y el resto es transportado junto a los gases y captado en las operaciones de limpieza que ocurren en el filtro de mangas de la sección de secaderos. El polvo captado en ambos sistemas es transportado por bombas neumáticas y transportadoras de tornillo sin fin hasta la tolva de producto final de los molinos.

El mineral secado es descargado por los secaderos y transportado por los sistemas de correas calientes (C y D) hasta los elevadores (C y D) los que descargan directamente a la tolva de recepción de mineral de molienda (TM-1), de aquí es extraído por bandas transportadoras y alimentado a cada una de las unidades de molienda (UM-A, UM-B, UM-7) donde se produce la operación final de los molinos de bolas, cada unidad de molienda está constituida por un sistema de clasificación por separadores (clasificadores) neumáticos de alta eficiencia que separa el producto fino acabado y retorna al proceso de molienda las fracciones gruesas intermedias, el producto acabado es transportado hacia la tolva de producto final. Para recolectar el polvo fino arrastrado por la succión del ventilador de tiro se pasa por los filtros de manga con que cuenta cada unidad garantizando la limpieza de los gases de las operaciones de molienda que se emiten al medio ambiente.

El mineral almacenado en la tolva de producto final es enviado a silos de la planta de hornos de reducción mediante 3 líneas de bombeo neumático formado por compresores de tornillo (CT-A, B y C) y las bandas de tornillo sin fin (BM-A, B y C) para el caso de la unidad de molienda #7



cuenta con un sistema de bombeo de mineral independiente que transporta directo a los silos de la planta de hornos. (Ver ANEXO 2).

#### **- Planta de Hornos de Reducción.**

Desde los silos es extraído el mineral y transportado por bombas neumáticas hasta las tolvas de recepción de cada horno.

En cada horno el mineral es alimentado por la parte superior, hogar 0, viajando de hogar en hogar con descarga alternativa central y periférica desde el 1 al 16. Los hogares del 1 al 5 son de ignición y del 6 al 16 ocurre la reducción a una temperatura de 700 °C, con CO y H producto de la descomposición del petróleo. El mineral reducido se transporta desde la descarga del hogar 16 hasta los enfriadores por medio de un transportador rotatorio.

El enfriador de cada horno está parcialmente sumergido en una piscina con agua, en él la temperatura del mineral desciende hasta 190 - 200 °C.

Este mineral es descargado a canales donde se añade licor amoniacal para formar una pulpa que va a los tanques de contacto.

#### **- Planta de Lixiviación y Lavado.**

La pulpa que llega a los tanques de contacto alcanza una relación líquido sólido de 5 a 1. Esta pulpa se agita para homogeneizarla y luego bombearla hacia el distribuidor rotatorio que alimenta las series de lixiviación en varias etapas en los turboaeradores. En los turboaeradores se inyecta aire para garantizar la lixiviación selectiva del Níquel y el Cobalto y la oxidación del Hierro. La pulpa aireada pasa a las etapas de lixiviación y lavado a contracorriente. En el lavado, el licor amoniacal viene desde la quinta etapa enriqueciéndose en Níquel hasta la primera etapa donde se separa por reboso y forma el licor producto, el cual es bombeado a la Planta de Separación de Cobalto.

Los sólidos que sedimentan pasan desde la primera hasta la quinta etapa, entregando el Níquel al licor y son extraídos por bombeo desde el fondo de cada tanque. Las colas finales son enviadas a la Planta de Recuperación de Amoníaco.





### **- Planta de Separación de Cobalto.**

El licor producto procedente de lixiviación pasa por los reactores tubulares donde se les suministra Hidrosulfuro de Amonio el cual provoca la precipitación del Cobalto con una proporción de Níquel. Una porción de este sólido formado se recircula al reactor (como semilla) para mejorar la efectividad de la precipitación con menor consumo de reactivo. La pulpa formada pasa a un sedimentador y desde este es bombeada al área donde el sólido es separado del licor por filtración. El licor clarificado es bombeado a la Planta de Recuperación de Amoníaco.

### **- Planta de Recuperación de Amoníaco.**

El licor producto es suministrado a las torres de destilación de licor por la parte superior. Por la parte inferior de la torre se suministra vapor de agua de baja presión. Con el aumento de temperatura del licor, el amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) y parte del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) se evaporan y son arrastrados por el vapor de agua. Las colas son tratadas de igual forma en las torres destilación de colas. Estos gases son extraídos por la parte superior de las torres y pasan por los precalentadores de licor y de colas y a la salida de estos pasan por un condensador enfriado con agua. El amoníaco obtenido pasa al sistema de torres de absorción y carbonatación, donde se absorbe  $\text{CO}_2$  procedente de los gases de la Planta Eléctrica y el amoníaco y parte del  $\text{CO}_2$  de la destilación del licor y las colas.

La pulpa de Carbonato básico de Níquel obtenida de la destilación del licor, por la parte inferior de las torres, es enviada a los sedimentadores. Las colas finales producto de la destilación son bombeadas al dique de almacenaje de colas.

### **- Planta de Sinterización.**

El carbonato básico de Níquel espesado con un 15 a 18 % de sólidos es filtrado y el sólido se alimenta a los hornos de calcinación. En los hornos se calcina el carbonato en atmósfera oxidante a 1200 °C de temperatura, dando como producto final Óxido de Níquel mas Óxido de Cobalto ( $\text{NiO} + \text{CoO}$ ).

El  $\text{NiO} + \text{CoO}$ , el carbón antracita, el polvo de  $\text{NiO} + \text{CoO}$ , y el polvo fino de retorno fuera de especificación de tamaño, son almacenados en tolvas. Desde estas tolvas se adicionan a una correa en proporciones específicas para ser mezclados y homogeneizados. Esta mezcla



homogénea se humedece y se dosifica a una estera sobre una capa de relleno con partículas de más de 38 mm de tamaño para formar una cama de material de 216 mm de espesor. Esta estera se mueve a una velocidad de 20 a 28 cm. / min. y pasa por debajo de un quemador de encendido para aumentar la temperatura superficial a 1200 - 1450 °C y después penetra en la cámara de combustión. En la cámara se produce una succión por debajo lo cual provoca que todo el material de la cama se encienda y se queme para obtener una torta de sinter de Ni + Co y una parte de NiO + CoO.

Esta torta se tritura en dos etapas para obtener un producto final exportable de <38 mm y >6,35 mm.

Los productos de >38 mm o <6,35 mm son realimentados al proceso de Sinterización como relleno o finos de retorno respectivamente. [12]

Nota: Todo este proceso anteriormente explicado se muestra en el ANEXO 1.

### **1.3 Caracterización energética de la planta de secaderos.**

La planta de Secaderos y Molinos tiene la siguiente estructura electro energética:

Desde la Subestación de Las Pasas le llegan las líneas B1 Y B2 de 13.8 kV, con la posibilidad de conmutar el servicio entre ambas líneas en cada subestación de la planta.

- Subestación 20. Compuesta por 4 transformadores de 13.8 / 0.44 kV, 1 transformador 13.8 / 2.4 kV, y 5 interruptores RM6 que alimentan los 5 transformadores. Los transformadores 1 y 2 de 13.8 / 0.44 kV alimentan la PGD sub.20, que tiene las cargas de los secaderos 1-4, sistemas de correas, sistema de polvo, alimentadores de mineral 1-4, bombeo de petróleo, drenaje sur, transformador de alumbrado y banco de condensadores. Los transformadores 3 y 4 de 13.8 / 0.44 kV alimentan la PGD de las 4 grúas Indias del deposito exterior. El transformador de 13.8 / 2.4 kV alimenta la pizarra de los ventiladores de tiro de 2.4 kV de los secaderos 1-4.
- Subestación 12: Compuesta por 2 transformadores de 13.8 / 0.44 kV, 2 de 13.8 / 2.4 kV, y 4 interruptores RM6 que alimentan los 4 transformadores. Los 2 transformadores de 13.8 / 0.44 kV alimentan la PGD de las 2 grúas GH del deposito interior, las pizarras de los secaderos 5-7, la pizarra de los alimentadores de secaderos 5-7 y la pizarra de 440 V de los filtros de mangas. Los 2 transformadores de 13.8 / 2.4 kV alimentan la pizarra de los



ventiladores de tiro de los secaderos 5-7 y la pizarra de los ventiladores 1 y 2 de los filtro de mangas.

- Subestación 7C: Compuesta por 2 Transformadores de 13.8 / 6.3 kV y 2 Transformadores de 6.3 / 0.44 kV, y 2 interruptores RM6 que alimentan los 2 transformadores de 13.8 / 6.3 kV. Los transformadores de 13.8 / 6.3 kV alimentan la pizarra de 6.3 kV que tiene como carga los dos motores de los molinos, 2 ventiladores, 3 compresores y los 2 transformadores de 6.3 / 0.44 kV. Los 2 transformadores de 6.3 / 0.44 kV alimentan la pizarra de 440 V que tiene como carga todos los motores de 440 V de los accionamientos de las dos unidades de molienda.
- Subestación 16: Compuesta por 1 transformador de 13.8 / 2.4 kV, 1 transformador de 13.8 / 0.44 kV, y un disyuntor para la alimentación de estos con la posibilidad de conmutar entre las líneas de alimentación B1 y B2. El transformador de 13.8 / 2.4 kV alimenta la pizarra de 2.4 kV del molino 7, que tiene como carga los motores del molino de bola, molino de martillo y ventilador. El transformador de 13.8 / 0.44 kV alimenta la pizarra de 440 V de los accionamientos del molino 7.

#### **1.4 Evaluación del uso de variadores de velocidad.**

Una gran parte de los equipos utilizados en la industria moderna funcionan a velocidades variables, como por ejemplo los trenes laminadores, los mecanismos de elevación, las máquinas-herramientas, grúas, etc. En los mismos se requiere un control preciso de la velocidad para lograr una adecuada productividad, una buena terminación del producto elaborado, o garantizar la seguridad de personas y bienes.

La máquina de inducción alimentada con corriente C.A., especialmente la que utiliza un rotor en jaula de ardilla, es el motor eléctrico más común en todo tipo de aplicaciones industriales y el que abarca un margen de potencias mayor. Pero no basta conectar un motor a la red para utilizarlo correctamente, sino que existen diversos elementos que contribuyen a garantizar un funcionamiento seguro.

El motor de corriente alterna, a pesar de ser un motor robusto, de poco mantenimiento, liviano e ideal para la mayoría de las aplicaciones industriales, tiene el inconveniente de ser un motor rígido en cuanto a su velocidad. La velocidad del motor asíncrono depende de la forma



constructiva del motor y de la frecuencia de alimentación. Como la frecuencia de alimentación que entrega la Empresa Eléctrica es constante, la velocidad de los motores asíncronos es constante, salvo que se varíe el número de polos, el resbalamiento o la frecuencia.

La regulación de velocidad puede realizarse por métodos mecánicos, como poleas o engranajes, o por medios eléctricos.

Por medios eléctricos, la expresión que nos da el valor de la velocidad de un motor asíncrono en RPM es:

$$N = (1 - s) N_s = (1 - s) 60 f / p \quad (1.1)$$

Donde  $s$  representa el deslizamiento,  $N_s$  la velocidad sincrónica,  $f$  la frecuencia y  $p$  el número de pares de polos.

En consecuencia, para regular la velocidad se puede operar sobre los distintos componentes de la ecuación dada.

A - Cambio de frecuencia.

La preferencia actual por la regulación a frecuencia variable se debe a la posibilidad de utilizar el sencillo y robusto motor de jaula de ardilla; cuyo mantenimiento es mucho más fácil que el de un motor de contactos deslizantes, lo que resulta muy importante en máquinas que operan bajo condiciones ambientales difíciles. Además este tipo de motor eléctrico resulta más económico y compacto que los restantes.

Asimismo, este método permite transformar fácilmente un accionamiento de velocidad fija en uno de velocidad variable, sin realizar grandes modificaciones.

Con este tipo de regulación se puede obtener un amplio control de velocidades, con el máximo par disponible en todas las frecuencias con un elevado rendimiento. Si se prolonga la característica al cuadrante generador se puede obtener un frenado muy eficiente por reducción de frecuencia, con una recuperación de energía hacia la red de alimentación.

En la actualidad la modificación de la frecuencia se realiza fundamentalmente por medio de variadores estáticos electrónicos que ofrecen una regulación suave, permitiendo un aumento en la vida útil de todas las partes involucradas y originando un ahorro en el mantenimiento por ausencia de partes en movimiento que sufran desgastes.



Los mismos se construyen generalmente con tiristores gobernados por un microprocesador que utiliza un algoritmo de control vectorial del flujo, y consisten básicamente en un convertidor estático alterna-alterna (cicloconvertidor) ó alterna-continua-alterna (convertidor de enlace), que permiten la modificación progresiva de la frecuencia aplicada, con la consiguiente modificación de la corriente y el par motor. En algunos casos se agregan filtros de armónicas.

En el ciclo convertidor se sintetiza una onda de menor frecuencia a partir de una alimentación polifásica de mayor frecuencia, conectando sucesivamente los terminales del motor a las distintas fases de la alimentación.

Por otro lado, el ciclo convertidor ofrece una transformación simple de energía de buen rendimiento, permite la inversión del flujo de potencia para la regeneración y la transmisión de la corriente reactiva; proporcionando una gama de frecuencias de trabajo que va desde valores cercanos a cero hasta casi la mitad de la frecuencia de alimentación, con fácil inversión de fase para invertir el sentido de rotación.

En ciertos casos este tipo de convertidor se emplea en motores asíncronos de rotor bobinado con alimentación doble, estando el estator conectado a la red y el rotor al convertidor.

En el convertidor de enlace la alimentación de la red de corriente alterna se rectifica en forma controlada y luego alternativamente se conmutan las fases del motor al positivo y al negativo de la onda rectificada, de manera de crear una onda de alterna de otra frecuencia.

La tensión y frecuencia de salida se controlan por la duración relativa de las conexiones con las distintas polaridades (modulación del ancho de pulso) de manera de conservar constante el cociente tensión / frecuencia para mantener el valor del flujo magnético en el motor.

Aunque la onda de tensión obtenida no es sinusoidal, la onda de corriente tiende a serlo por efecto de las inductancias presentes. Además, de este modo se obtiene una amplia gama de frecuencias por encima y por debajo de la correspondiente al suministro, pero exige dispositivos adicionales c.c. /c.a. para asegurar el flujo de potencia recuperada.

Hay que considerar que las corrientes poliarmónicas generan un calentamiento adicional que disminuye el rendimiento y puede llegar a reducir el par (por ejemplo, el 5º armónico produce un campo giratorio inverso).

También cabe acotar que la vibración de los motores aumenta cuando se los alimentan con conversores electrónicos de frecuencia y que la componente de alta frecuencia de la tensión de



modo común de los convertidores de frecuencia puede causar un acoplamiento con la tierra a través de la capacidad que se forma en los rodamientos, donde las pistas actúan como armaduras y la capa de grasa como dieléctrico.

Asimismo se puede decir que los variadores de velocidad generalmente también sirven para arrancar o detener progresivamente el motor, evitando por ejemplo, los dañinos golpes de ariete que pueden aparecer en las cañerías durante la parada de las bombas.

Estos convertidores poseen protecciones contra asimetría, falla de tiristores, sobretensión y sobrecarga; además de vigilancia del tiempo de arranque con limitación de la corriente, control de servicio con inversión de marcha, optimización del factor de potencia a carga parcial, maximización del ahorro de energía durante el proceso.

B - Cambio del número de polos.

Si el motor estuviera provisto de dos arrollamientos de estator con diferente número de polos, y si el rotor fuera preferentemente del tipo jaula de ardilla (para no tener que realizar ningún tipo de conexiones en el secundario), fácilmente se podrían obtener dos velocidades de sincronismo.

También, con un solo arrollamiento provisto de conexiones especiales pueden obtenerse dos diferentes números de polos, o incluso tres, mediante una simple reconexión.

En todos los casos no se logra una regulación progresiva, sino escalonada, y además sólo pueden obtenerse velocidades menores que la de sincronismo, con una gama de regulación que difícilmente supere la relación 8:1, pues con mayores relaciones resultarían motores muy voluminosos. Las conmutaciones habitualmente se implementan mediante circuitos de contactores que pueden incluir también la inversión del sentido de giro.

En los motores con conmutación del número de polos, el arrollamiento de cada fase está constituido generalmente por dos partes idénticas conectadas en serie, en una de las cuales se hace variar el sentido de la corriente por conmutación de estas partes en paralelo. Esta conmutación modifica la distribución de las fuerzas magnetomotrices, disminuyendo el número de polos a la mitad y por consiguiente duplicando la velocidad de sincronismo del motor (conexión Dahlander) a potencia constante o a par constante.



La conexión de los arrollamientos se efectúa por conmutación del arrollamiento estático de estrella simple a doble estrella (dos estrellas en paralelo), o por conmutación de dicho arrollamiento de triángulo a doble estrella.

Se puede demostrar que la conmutación del arrollamiento estático de estrella a doble estrella conduce a una regulación de velocidad a par constante, mientras que la conmutación del arrollamiento estático de triángulo a doble estrella conduce a una regulación de velocidad a potencia constante.

También se emplean motores de tres velocidades, con un arrollamiento independiente complementario no conmutado, así como motores de cuatro velocidades, en cuyo estator se instalan dos devanados independientes con diferentes números de polos; cada uno subdividido como en el caso de dos velocidades.

Los motores provistos de arrollamientos con diferente número de polos tienen su principal utilidad en aquellos casos en los que la velocidad no tiene que regularse de forma progresiva, como es el caso de máquinas-herramientas como tornos, fresas, taladradoras, y en general todas las que trabajan por arranque de virutas.

#### C - Cambio del deslizamiento

El deslizamiento  $s$  varía con la carga, pero la variación de la carga no proporciona un método práctico de control de la velocidad. Sin embargo, es posible cambiar la característica par/velocidad de varias maneras, de modo que para cada par de carga se necesita un valor de  $s$  distinto.

Estos métodos proporcionan una mala utilización de la potencia y capacidad del motor, pero el control suele ser sencillo y justificable en algunas aplicaciones.

En el caso de variación de la tensión se pueden utilizar tiristores conectados en serie con el estator para interrumpir el paso de la corriente durante una fracción del período (control de fase) o en algunos períodos completos (encendido alternado), reduciéndose así la tensión media aplicada

El control de fase produce armónicos de orden elevado, mientras que el encendido intermitente puede generar subarmónicos que podrían entrar en resonancia con el sistema mecánico.



En el caso de variación de la resistencia rotórica se aprovecha la propiedad de los motores asincrónicos de modificar la velocidad a la que se produce el máximo momento variando la resistencia del circuito rotórico. En este método, por medios manuales o automáticos, en forma continua o escalonada, se va modificando la resistencia rotórica mediante un reóstato conectado a los anillos rozantes del motor de rotor bobinado.

La regulación permite disminuir la velocidad nominal y la utilización óptima del motor se produce en caso de regulación a par constante. La gama de regulación no es constante y resulta muy sensible a las variaciones de la carga. Asimismo, el inconveniente de este sistema de variación está en las grandes pérdidas de energía.

La modificación de la resistencia rotórica puede verse como un caso especial de inyección de una tensión al rotor, pues se crea una caída de tensión en la resistencia agregada externamente.

De esta manera, inyectando una tensión secundaria de frecuencia de deslizamiento y con un ángulo de fase determinado se puede variar el deslizamiento resultante e introducir una componente reactiva adecuada.

Un método para lograr esto consiste en acoplar mecánicamente un segundo motor asincrónico y alimentarlo de los anillos rozantes del primero (control en cascada), otro es utilizar un convertidor de frecuencia de colector y un tercero es emplear un motor polifásico de inducción a colector con rotor alimentado (motor Schräge). Dado que estos métodos en la actualidad sólo tienen un interés meramente académico no serán desarrollados.

#### D - Regulación por impulsos.

La regulación por impulsos de la velocidad generalmente se aplica en motores de pequeña potencia, y básicamente consiste en provocar variaciones periódicas y de corta duración de los parámetros del motor, de tal manera y a una frecuencia tal, que la velocidad requerida se obtiene como una velocidad promedio de las aceleraciones y desaceleraciones producidas durante el ciclo completo de variación de los parámetros. Estas variaciones pueden realizarse mediante contactores o tiristores que conectan y desconectan la alimentación de los distintos arrollamientos, cortocircuitan alternativamente ciertas impedancias o invierten periódicamente la polaridad del suministro.



El método más eficiente de controlar la velocidad de un motor eléctrico es por medio de un variador electrónico de frecuencia. No se requieren motores especiales, son mucho más eficientes y tienen precios cada vez más competitivos.

El variador de frecuencia regula la frecuencia del voltaje aplicado al motor, logrando modificar su velocidad. [14]

#### 1.4.1 Composición de un Variador de frecuencia.

El diagrama en bloques de un proceso nos muestra de una forma más explícita los componentes del mismo, en el caso de un variador de frecuencia (fig.1) está compuesto por un rectificador encargado de convertir la corriente alterna en directa, un filtro para disminuir los armónicos, y un ondulator, que retorna la corriente directa a alterna, pero permitiendo la variación de la frecuencia.

El circuito desarrollado (fig.2) nos muestra la composición de cada parte de variador, en este caso está compuesto por un rectificador trifásico no controlado, cuyos componentes son seis diodos, un filtro y un ondulator trifásico cuyos componentes son seis IGBT.

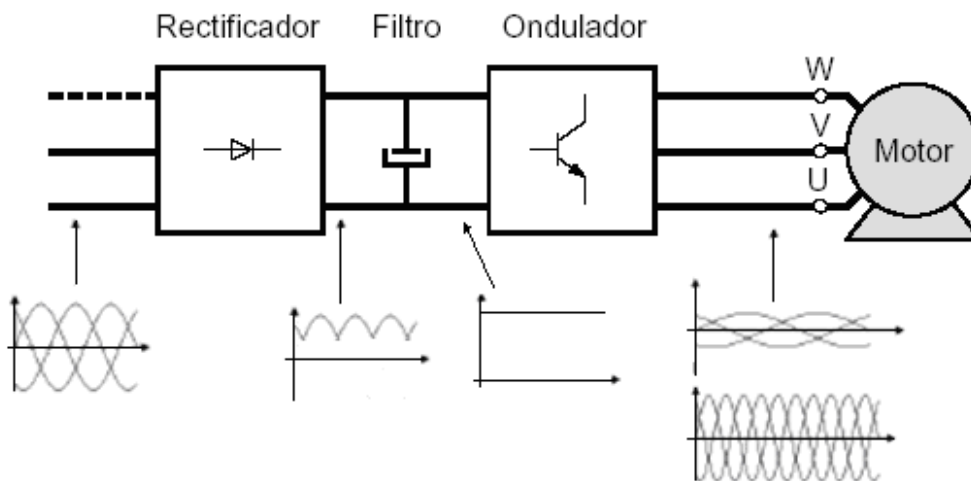


Fig.1 Diagrama en bloques de un variador de frecuencia [23]

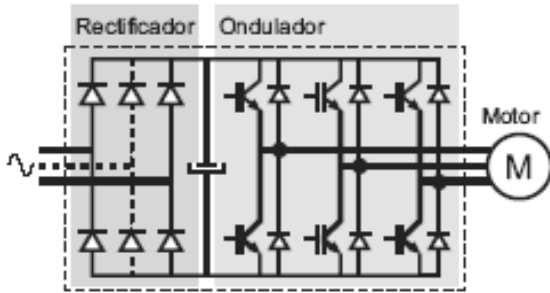


Fig.2 Esquema de un convertidor de frecuencia [23]

Los variadores de frecuencia están compuestos por:

**Rectificador:**

La función del rectificador es convertir la señal de voltaje de alimentación de CA a CD y controlar el voltaje al inversor para mantener constante la relación Volts/Hz, mostrándose en la fig.3 los métodos básicos más usados:

Diodos	DC Chopper	Tiristores
Control: No Voltaje CD: Constante Rizo CD: Bajo V/Hz: Se ajusta en Inversor Inversor: PWM FPd: Alto para todas las velocidades Armónicas: Alto Regeneración: No	Control: SCR, GTO, Transistor Voltaje CD: Variable Rizo CD: Varía V/Hz: Rectificador-Inversor Inversor: 6 pasos FPd: Se reduce con la velocidad Armónicas: Alto Regeneración: No	Control: SCR Voltaje DC: Variable Rizo CD: Varía V/Hz: Rectificador-Inversor Inversor: 6 pasos, PWM FPd: Se reduce con la velocidad Armónicas: Alto Regeneración: Sí

Fig.3 Esquemas de rectificadores [7].

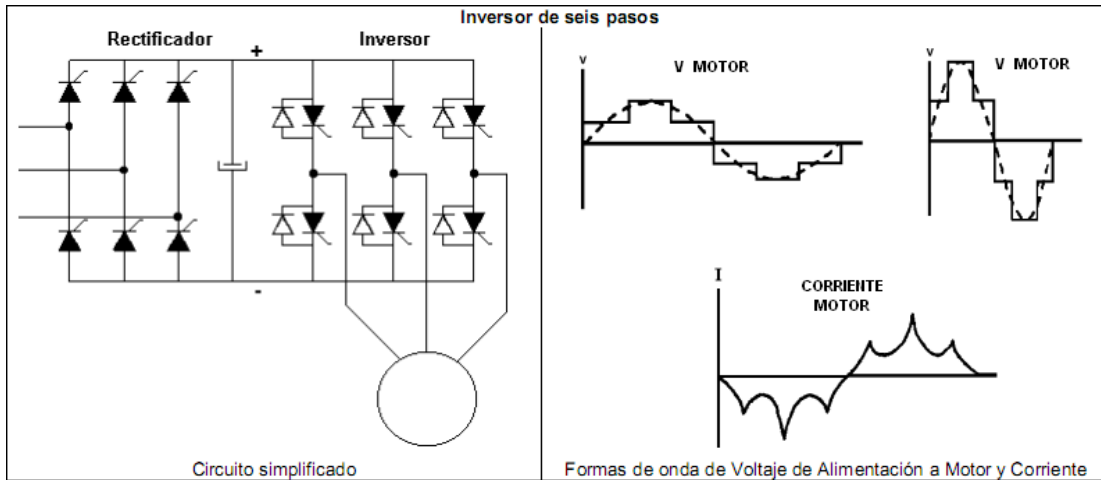
**Filtro:**

Suaviza la tensión rectificada y reduce la emisión de armónicos.

**Inversor:**

El inversor utiliza dispositivos de potencia de estado sólido que son controlados por microprocesador para conmutar el voltaje del bus de CD y producir una señal de CA de frecuencia ajustable que alimenta al motor, por ejemplo, el inversor de seis pulsos (fig.4), el inversor por modulación de ancho de pulso (fig.5). [7]

➤ **Inversor de seis pulsos.**

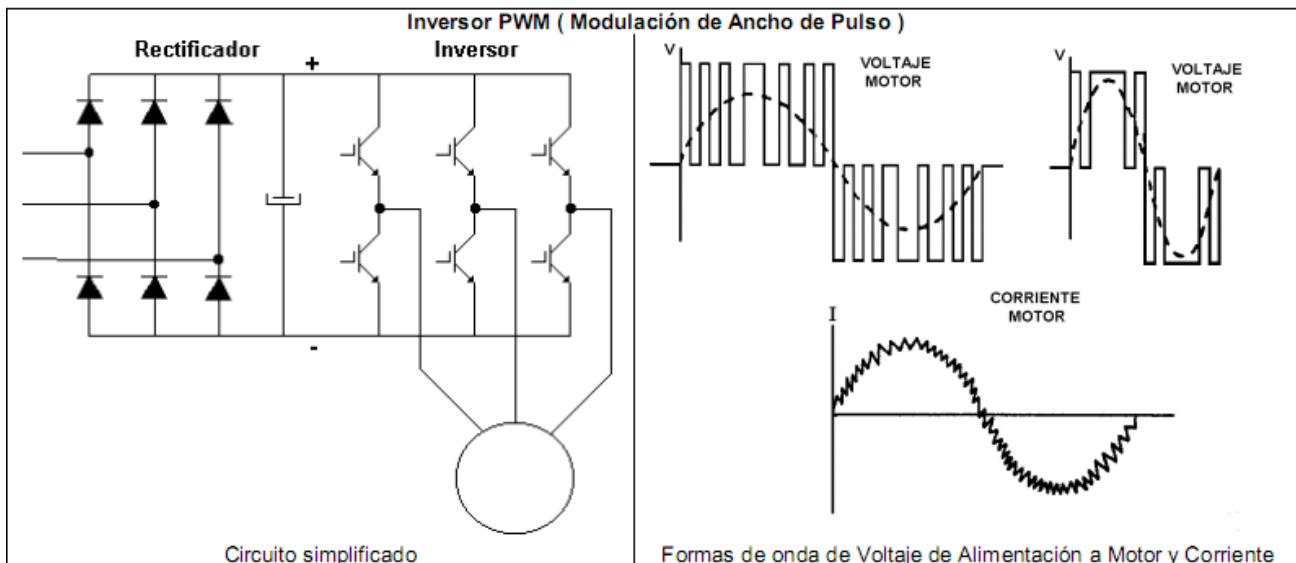


**Fig.4** Esquema de un inversor de seis pulsos y sus formas de onda

Para variar la frecuencia del motor, se ajusta el tiempo de conducción de los SCR's para cada uno de los seis pulsos, modificando el tiempo del ciclo. El voltaje de CD se ajusta para mantener la relación Volts-Hz constante.

Cuando se utilizan SCR's en el inversor, se utilizan circuitos complejos de conmutación que no se muestran en la figura y que incluye la lógica de disparo y componentes adicionales de potencia para apagarlos que constan de capacitores, inductores y SRC's adicionales. Esta complejidad se reduce cuando se utilizan GTO's o IGBT's como interruptores de potencia.

➤ **Inversor PWM:**



**Fig.5** Esquema de un inversor por Modulación de Ancho de Pulso y sus formas de ondas



El inversor consiste de seis IGBT's que se encienden y apagan en una secuencia tal que producen un voltaje en forma de pulsos cuadrados que se alimentan al motor. Para variar la frecuencia del motor, el número de pulsos y su ancho se ajustan resultando en un tiempo de ciclo mayor para bajar la velocidad o tiempo de ciclo menor para subir la velocidad. Para cada frecuencia específica hay un número óptimo de pulsos y anchos que producen la menor distorsión armónica en la corriente que se aproxime a la señal sinusoidal.

El cambio de voltaje requerido para mantener la relación Volts-Hz constante conforme varía la frecuencia, se realiza por medio del microprocesador de propósito dedicado que controla el ancho de los pulsos y los demás parámetros para conseguir un adecuado funcionamiento.

La distorsión armónica afecta los aislamientos del motor, incrementa su ruido audible y eleva el calentamiento entre un 5% y un 15% dependiendo del diseño del fabricante y velocidad de operación.

### **Módulo de control.**

En los arrancadores y variadores modernos, todas las funciones se controlan mediante un microprocesador que gestiona la configuración, las órdenes transmitidas por un operador o por una unidad de proceso y los datos proporcionados por las medidas como la velocidad, la corriente, etcétera.

Las capacidades de cálculo de los microprocesadores, así como de los circuitos dedicados (ASIC) han permitido diseñar algoritmos de mando con excelentes prestaciones y en particular, el reconocimiento de los parámetros de la máquina. A partir de estas informaciones, el microprocesador gestiona las rampas de aceleración y deceleración, el control de la velocidad y la limitación de corriente, generando las señales de control de los componentes de potencia. Las protecciones y la seguridad son procesadas por circuitos especializados (ASIC) o están integradas en los módulos de potencia (IPM).

Los límites de velocidad, las rampas, los límites de corriente y otros datos de configuración, se definen usando un teclado integrado o mediante PLC (sobre buses de campo) o mediante PC.

Del mismo modo, los diferentes comandos (marcha, parada, frenado...) pueden proporcionarse desde interfaces de diálogo hombre/máquina, utilizando autómatas programables o PC.



Los parámetros de funcionamiento y las informaciones de alarma, y los defectos pueden verse mediante displays, diodos LED, visualizadores de segmentos o de cristal líquido o pueden enviarse hacia la supervisión mediante un bus de terreno.

Los relés, frecuentemente programables, proporcionan información de:

- fallos (de red, térmicos, de producto, de secuencia, de sobrecarga),
- vigilancia (umbral de velocidad, pre-alarma, final de arranque).

Las tensiones necesarias para el conjunto de circuitos de medida y de control son proporcionadas por una alimentación integrada en el variador y separadas galvánicamente de la red.

### **El módulo de potencia.**

El módulo de potencia está principalmente constituido por:

- Componentes de potencia (diodos, tiristores, IGBT...) Ver ANEXO 4
- Interfaces de medida de las tensiones y/o corrientes,
- Frecuentemente de un sistema de ventilación.

#### **1.4.2 Aplicaciones de los variadores de frecuencia.**

Los variadores de frecuencia tienen sus principales aplicaciones en los siguientes tipos de máquinas:

- **Transportadoras.** Controlan y sincronizan la velocidad de producción de acuerdo al tipo de producto que se transporta, para dosificar, para evitar ruidos y golpes en transporte de botellas y envases, para arrancar suavemente y evitar la caída del producto que se transporta, etc.
- **Bombas y ventiladores centrífugos.** Controlan el caudal, uso en sistemas de presión constante y volumen variable. En este caso se obtiene un gran ahorro de energía porque el consumo varía con el cubo de la velocidad, o sea que para la mitad de la velocidad, el consumo es la octava parte de la nominal.
- **Bombas de desplazamiento positivo.** Control de caudal y dosificación con precisión, controlando la velocidad. Por ejemplo en bombas de tornillo, bombas de engranajes. Para transporte de pulpa de fruta, pasta, concentrados mineros, aditivos químicos, chocolates, miel, barro, etc.



- **Ascensores y elevadores.** Para arranque y parada suaves manteniendo el momento del motor constante, y diferentes velocidades para aplicaciones distintas.
- **Extrusoras.** Se obtiene una gran variación de velocidades y control total de del momento del motor.
- **Centrífugas.** Se consigue un arranque suave evitando picos de corriente y velocidades de resonancia.
- **Prensas mecánicas y balancines.** Se consiguen arranques suaves y mediante velocidades bajas en el inicio de la tarea, se evitan los desperdicios de materiales.
- **Máquinas textiles.** Para distintos tipos de materiales, inclusive para telas que no tienen un tejido simétrico se pueden obtener velocidades del tipo random para conseguir telas especiales.
- **Compresores de aire.** Se obtienen arranques suaves con máximo momento y menor consumo de energía en el arranque.
- **Pozos petrolíferos.** Se usan para bombas de extracción con velocidades de acuerdo a las necesidades del pozo.

#### 1.4.3 Principales funciones de los variadores de velocidad electrónicos.

##### **Aceleración controlada.**

La aceleración del motor se controla mediante una rampa de aceleración lineal o en «S».

Generalmente, esta rampa es controlable y permite por tanto elegir el tiempo de aceleración adecuado para la aplicación.

##### **Variación de velocidad.**

Un variador de velocidad no puede ser al mismo tiempo un regulador. En este caso, es un sistema, rudimentario, que posee un mando controlado mediante las magnitudes eléctricas del motor con amplificación de potencia, pero sin bucle de realimentación: es lo que se llama «en bucle abierto».

La velocidad del motor se define mediante un valor de entrada (tensión o corriente) llamado consigna o referencia. Para un valor dado de la consigna, esta velocidad puede variar en función de las perturbaciones (variaciones de la tensión de alimentación, de la carga, de la temperatura). El margen de velocidad se expresa en función de la velocidad nominal.

## Regulación de la velocidad.

Un regulador de velocidad es un dispositivo controlado que como se muestra en la figura 6 posee un sistema de mando con amplificación de potencia y un bucle de alimentación: se denomina, «bucle abierto».

La velocidad del motor se define mediante una consigna o referencia.

El valor de la consigna se compara permanentemente con la señal de alimentación, imagen de la velocidad del motor. Esta señal la suministra un generador tacométrico o un generador de impulsos colocado en un extremo del eje del motor.

Si se detecta una desviación como consecuencia de una variación de velocidad, las magnitudes aplicadas al motor (tensión y/o frecuencia) se corrigen automáticamente para volver a llevar la velocidad a su valor inicial.

Gracias a la regulación, la velocidad es prácticamente insensible a las perturbaciones.

La precisión de un regulador se expresa generalmente en % del valor nominal de la magnitud a regular.

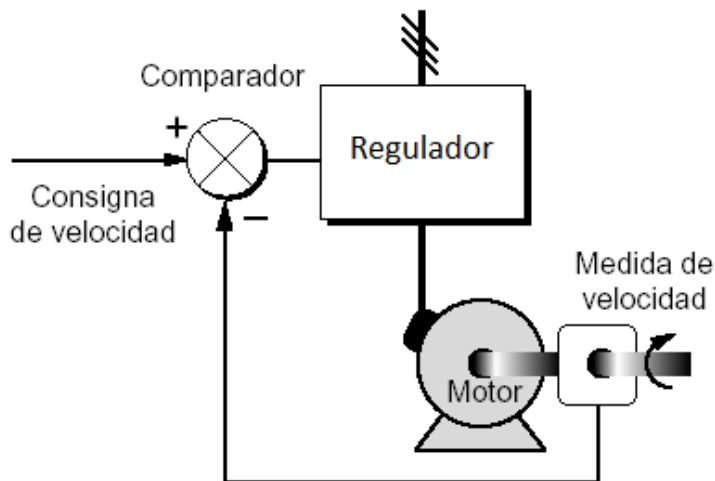


Fig.6 Esquema de un sistema de regulación de velocidad

## Desaceleración controlada.

Cuando se desconecta un motor, su desaceleración se debe únicamente al par resistente de la máquina (deceleración natural). Los arrancadores y variadores electrónicos permiten controlar la desaceleración mediante una rampa lineal, generalmente independiente de la rampa de aceleración.



Esta rampa puede ajustarse de manera que se consiga un tiempo para pasar de la velocidad de régimen fijada a una velocidad intermedia o nula:

- Si la desaceleración deseada es más rápida que la natural, el motor debe desarrollar un par resistente que se debe sumar al par resistente de la máquina; se habla entonces de frenado eléctrico, que puede efectuarse reenviando energía a la red de alimentación, o disipándola en una resistencia de frenado.

- Si la desaceleración deseada es más lenta que la natural, el motor debe desarrollar un par superior al par resistente de la máquina y continuar arrastrando la carga hasta su parada.

### **Inversión del sentido de marcha.**

La mayoría de los variadores actuales tienen implementada esta función. La inversión de la secuencia de fases de alimentación del motor se realiza automáticamente o por inversión de la consigna de entrada, o por una orden lógica en un borne, o por la información transmitida mediante una red.

### **Frenado.**

Este frenado consiste en parar un motor pero sin controlar la rampa de desaceleración. Con los arrancadores y variadores de velocidad para motores asíncronos, esta función se realiza de forma económica inyectando una corriente continua en el motor, haciendo funcionar de forma especial la etapa de potencia. Toda la energía mecánica se disipa en el rotor de la máquina y, por tanto, este frenado sólo puede ser intermitente. En el caso de un variador para motor de corriente continua, esta función se realiza conectando una resistencia en bornes del inducido.

### **Protección integrada.**

Los variadores modernos aseguran tanto la protección térmica de los motores como su propia protección. A partir de la medida de la corriente y de una información sobre la velocidad (si la ventilación del motor depende de su velocidad de rotación), un microprocesador calcula la elevación de temperatura de un motor y suministra una señal de alarma o de desconexión en caso de calentamiento excesivo.

Además, los variadores, y especialmente los convertidores de frecuencia, están dotados de protecciones contra:





- los cortocircuitos entre fases y entre fase y tierra,
- las sobretensiones y las caídas de tensión,
- los desequilibrios de fases,
- el funcionamiento monofásico.[23]

#### 1.4.4 Comparación de las características de funcionamiento que demuestran la gran importancia de los variadores de velocidad del tipo convertidores de frecuencia.

**Tabla 1.** Comparación entre el funcionamiento de un motor asíncrono en uso normal (directo) y con el empleo de variador de velocidad. [23]

Motor asíncrono	...en uso normal	...con variador de velocidad
Corriente de arranque	Muy elevada, del orden de 68 veces la corriente nominal en valor eficaz, 15-20 en valor cresta.	Limitado en el motor (en general: cerca de 1.5 veces la corriente nominal).
Par de arranque $C_d$	Elevado y no controlado, del orden de 2 a 3 veces el Par nominal $C_n$ .	Del orden de 1.5 veces el Par nominal $C_n$ y controlado durante toda la aceleración.
Arranque	Brutal, cuya duración solo depende de las características del motor y de la carga arrastrada (Par resistente, inercia)	Progresivo, sin brusquedades y controlado (Rampa lineal de velocidad, por ejemplo)
Velocidad	Variando ligeramente según la carga (Próxima a la velocidad de sincronismo $N_s$ )	Variación posible desde cero hasta un valor superior a la velocidad de sincronismo $N_s$
Par máximo $C_m$	Elevado, del orden de 2-3 veces el Par nominal $C_n$	Elevado, disponible para todo el rango de velocidades (del orden de 1.5 veces el Par nominal)
Frenado eléctrico	Relativamente complejo, necesita protecciones y un esquema particular	Fácil
Inversión del sentido de Marcha	Fácil solamente después de parada motor	Fácil
Riesgo de bloqueo	Sí, en caso de exceso de Par (Par Resistente $> C_m$ ), o en caso de ba-	no



	jada de tensión.	
Funcionamiento del motor en el plano Par-Velocidad	Fig. 2(ANEXO 3)	Fig. 3(ANEXO 3)

## 1.5 Descripción del accionamiento a evaluar.

### Grúa India # 2

La grúa tipo pórtico, de forma general está compuesta por una estructura metálica que soporta, en la parte superior un carro móvil que se traslada por rieles, compuesto por los accionamientos eléctricos y mecánicos, la jaiba que carga el mineral; y en la parte inferior los trenes de ruedas.

El accionamiento mecánico está compuesto por 2 reductores que accionan 2 motores (Spain Indar) de 190 kW, del peso y cierre de la jaiba y 2 ventiladores (Siemens) de 3.45 kW para el enfriamiento de cada uno de estos, 2 reductores con motores (Spain Alconza) de 70 kW acoplados para mover el carro y sus respectivos ventiladores (Siemens) de enfriamiento de 3.45 kW y 8 reductores con motores (Ruso) de 9 kW acoplados para mover la grúa, todos los motores de esta grúa son con rotor bobinado.

El equipamiento eléctrico está compuesto principalmente por 2 pizarras que contienen toda la paramenta eléctrica de fuerza y control incluyendo los sistemas de contactores que accionan los motores.

### Grúa India # 1, 3 y 4

El accionamiento mecánico está compuesto por 2 reductores que accionan 2 motores (Siemens) de 200 kW, del peso y cierre de la jaiba, 4 reductores con motores (Siemens) de 32 kW acoplados para mover el carro y 8 reductores con motores (Siemens) de 22 kW acoplados para mover la grúa.

El equipamiento eléctrico está compuesto principalmente por 2 pizarras metálicas que contienen toda la paramenta eléctrica de fuerza y control incluyendo los 4 variadores de velocidad (2 de 250 kW y 2 de 110 kW) que accionan los motores.



### **Grúa de depósito interior (GH # 1 y 2)**

El accionamiento mecánico está compuesto por 2 reductores que accionan 2 motores (Siemens) de 90 kW, del peso y cierre de la jaiba, 2 reductores con motores (Siemens) de 7.5 kW acoplados para mover el carro y 4 reductores con motores (Siemens) de 15 kW acoplados para mover el puente de la grúa.

El equipamiento eléctrico está compuesto principalmente por 1 pizarra de control que contiene toda la paramenta eléctrica de fuerza y control incluyendo los 4 variadores de velocidad; 3 de 110 kW de los motores de peso, cierre y puente y 1 de 22 kW para los 2 motores del carro. Además de los bancos de resistencias del frenado de los motores.

### **Alimentadores Secaderos.**

En la sección de secado hay instalados 7 secaderos de tambor rotatorio y cada uno cuenta con un alimentador de mineral, el accionamiento mecánico está compuesto por 7 reductores accionados por 7 motores (AS#1- 4 HELMKE y AS#5-7 USA) de 22 kW.

El equipamiento eléctrico está compuesto principalmente por 1 gaveta extraíble insertada en un cubículo de pizarra, que contienen toda la paramenta eléctrica de fuerza y control incluyendo 1 variador de velocidad de 22 kW para cada alimentador.

### **Separadores Dinámicos (SEPOL A y B)**

El separador es un equipo formado por un cuerpo cilíndrico cónico revestido interiormente por placas de material resistente al desgaste en las zonas de contacto activo con el mineral. En la parte superior posee una entrada para el mineral. En la parte interior posee un rotor para la clasificación del mineral. En la zona superior, lateralmente posee una entrada tangencial tipo caracol para el aire de clasificación, procedente de un ventilador. Debajo del rotor se encuentra el canal de salida del aire más el mineral fino con cuatro salidas laterales hacia los respectivos ciclones. En la parte inferior posee una tolva para la recepción del material grueso, dotada de una compuerta doble pendular para la salida del mineral, que impide la libre entrada de aire en sentido contrario.

Los ciclones son cuerpos cilíndricos cónicos revestidos interiormente de placas resistentes al desgaste. Posee una entrada tangencial tipo caracol en la zona superior, una salida superior



para el aire y una descarga inferior para el mineral, dotada de una compuerta pendular que estanca el aire.

Cada molino cuenta con un Sepol para clasificar las partículas de mineral. El accionamiento mecánico de ambos se compone fundamentalmente de una reductora que acciona el mecanismo de paletas.

El accionamiento eléctrico lo compone fundamentalmente 1 variador de velocidad de 250 kW alimentado por un interruptor desde un cubículo de pizarra, este acciona un motor de 183 kW que mueve el mecanismo.



## Capítulo 2. Variador de velocidad.

### 2.1 Selección del variador de velocidad.

**Los principales aspectos que hay que considerar para seleccionar un variador de velocidad son:**

- Verificar la tensión de suministro y las tensiones nominales del convertidor y del motor.
- Seleccionar el convertidor adecuado a la potencia nominal del motor.
- Comprobar también que la corriente nominal del convertidor sea igual o mayor que la del motor seleccionado.
- Verificar el tipo de característica de momento de la carga.
- Prestar mucha atención a los casos especiales en cuanto a altos requerimientos de momento de arranque o de momento máximo.
- Comprobar el intervalo de velocidad requerido y el que puede proporcionar el convertidor.
- La velocidad máxima permisible del motor no se puede exceder.
- Debe comprobarse el sistema de tierra del motor y equipo accionado.
- Verificar técnica y económicamente si un sistema separado de enfriamiento reduce el tamaño del motor y, consecuentemente, el tamaño del convertidor.
- A altas velocidades debe prestarse especial atención a la construcción de los rodamientos, la lubricación, el ruido del ventilador, el balanceo, las velocidades críticas, los sellos de los ejes y el momento máximo del motor.
- A bajas velocidades debe evaluarse la lubricación de los rodamientos, la ventilación del motor y el ruido electromagnético.



Sin embargo el procedimiento más sencillo para elegir un convertidor, consiste simplemente en conocida la potencia del motor, buscar en el catalogo y de acuerdo con esa potencia, elegir el convertidor que la admita. De esta forma no hay seguridad de que esta selección se haya realizado correctamente y de que el convertidor permita moverse al motor. Por tanto para una correcta selección del convertidor se debe seguir los siguientes pasos.

Intensidad nominal del motor:

$$I_N = \frac{P_N}{\sqrt{3} * U_N * \cos\phi * \eta} \quad (2.1)$$

Intensidad del variador:

$$I_V \geq 1,05 * I_N \quad (2.2)$$

El factor 1,05 se debe a que la corriente de salida del convertidor no es perfectamente sinusoidal sino que presenta unos armónicos que no producen par útil, sino calor en los arrollamientos del estator.

Si se tratara de accionar varios motores y estos pudieran entrar estando otros en funcionamiento el cálculo sería el siguiente:

$$I_V \geq \left( 1,05 * \sum I_{\max} + 2 \sum I_{arr} \right) * \frac{1}{1,5} \quad (2.3)$$

$\sum I_{arr}$  : Sumatoria de las corrientes de los motores que arrancan.

$\sum I_{\max}$  : Sumatoria de las corrientes de los motores que están funcionando.

El factor de seguridad se debe a que el motor que arranca estando el sistema funcionando 60Hz demanda 5-6 la corriente nominal creando una situación de picos de corriente cuyas consecuencias son difíciles de prever.

El convertidor admite una sobrecarga de 110%, pero habrá que tener en cuenta que esta sobrecarga afecta la vida del convertidor



### 2.1.1 Calculo del convertidor para el proceso del arranque.

Intensidad que debe circular por el convertidor durante el proceso de arranque.

$$I_{arr} = I_N + I_a = I_n + 0,7I_N = 1,7 * I_N \quad (2.4)$$

Para elegir convenientemente el convertidor, desde el punto de vista del arranque es importante tener en cuenta la frecuencia de los arranques (Debe dar tiempo a enfriarse el motor). También tener en cuenta la velocidad a que se debe arrancar.

Los convertidores de frecuencia a frecuencias muy bajas no mantienen el par debido a la influencia excesiva a estas frecuencias de la componente resistiva de la impedancia que no genera par.

El límite de frecuencia inferior a que esto ocurre es variable en función de la carga pero se mueve alrededor de los 5 a 7Hz o incluso más. Por tanto siempre que se deba arrancar a velocidad baja abra que tener mucho cuidado y probablemente sobredimensionar el convertidor.

### 2.1.2 Problema del frenado.

El problema del frenado existe desde el momento en que la carga en movimiento dispone de una energía cinética de la que debe desprenderse para quedar parada.

Esta energía solo puede ser evacuada por el camino del motor hacia la red a través del convertidor.

Si no existe este último el motor podría funcionar en sentido contrario y conducir dicha energía hacia la red, pero el puente de diodos de la etapa rectificadora del convertidor no permite tal circulación. La energía devuelta se acumula en el condensador de la etapa de continua y cuando la tensión en los bornes del condensador alcanza un determinado valor peligroso para el convertidor, este pone en acción su circuito de protección y a partir de ese momento la carga se frena libremente, pues se desconecta el motor. [7]

## 2.2 Evaluación de la selección de los variadores de velocidad que están operando, cálculo de la corriente del variador de velocidad, de la corriente de arranque y de la potencia de los variadores.



Partiendo de las ecuaciones:

$$P_v = k * P_n \quad (2.5)$$

$$k = \frac{P_v}{P_n} \quad (2.6)$$

Por la ecuación 2.2 y 2.4 se tiene que:

$$I_v \geq 1,05 * I_N$$

$$I_{arr} = 1,7 * I_N$$

K debe estar entre 1 y 1.2, y el valor más empleado es 1.05 este se debe a que la corriente de salida del convertidor no es perfectamente sinusoidal sino que presenta unos armónicos que no producen par útil, sino calor en los arrollamientos del estator.

### Grúa India.

Para los motores de traslación del puente:

Son 8 motores asíncronos con rotores de jaula de ardilla, con los datos nominales siguientes:

$P_n = 8.6kW$ ,  $U_n = 440V$ ,  $I_n = 17.4A$ ,  $\cos \phi = 0.73$

Son operados por un solo variador de velocidad de ALTIVAR 71 de  $P_n=110kW$ .

Empleando la ecuación (2.6) se tiene que:

$$k = \frac{110kW}{(8 * 8.6kW)} = \frac{110kW}{68.8kW} = 1.6$$

Empleando la ecuación (2.2) se tiene que:

$$I_v \geq 1.05 * \left[ \begin{matrix} \leftarrow \\ \rightarrow \end{matrix} * 17.4A \right]$$

$$I_v \geq 146.16A$$





Empleando la ecuación (2.4) se tiene que:

$$I_{arr} = 1.7 * 17.4A$$
$$I_{arr} = 236.64A$$

Empleando la ecuación (2.5) se tiene que:

$$P_v \geq 1.05 * 8.6kW$$
$$P_v \geq 72.24kW$$

Para los motores de Peso y Cierre:

Son 2 motores asíncronos con rotores de jaula de ardilla, con los datos nominales siguientes:

$P_n = 200kW$ ,  $U_n = 440V$ ,  $I_n = 340A$ ,  $\cos \varphi = 0.88$

Cada uno es accionado por un variador de velocidad de ALTIVAR 71 de  $P_n=250kW$ .

Empleando la ecuación (2.6) se tiene que:

$$k = \frac{250kW}{200kW} = 1.25$$

Empleando la ecuación (2.2) se tiene que:

$$I_v \geq 1.05 * 340A$$
$$I_v \geq 357A$$

Empleando la ecuación (2.4) se tiene que:

$$I_{arr} = 1.7 * 340A$$
$$I_{arr} = 578A$$



Empleando la ecuación (2.5) se tiene que:

$$P_v \geq 1.05 * 200kW$$

$$P_v \geq 210kW$$

Para los motores de traslación del carro:

Son 4 motores asíncronos con rotores de jaula de ardilla, con los datos nominales siguientes:

$$P_n = 26.5kW, U_n = 440V, I_n = 44.5A, \cos \phi = 0.82$$

Son operados por un solo variador de velocidad de ALTIVAR 71 de  $P_n=110kW$ .

Empleando la ecuación (2.6) se tiene que:

$$k = \frac{110kW}{(4 * 26.5kW)} = \frac{110kW}{106kW} = 1.04$$

Empleando la ecuación (2.2) se tiene que:

$$I_v \geq 1.05 * 4 * 44.5A$$

$$I_v \geq 186.9A$$

Empleando la ecuación (2.4) se tiene que:

$$I_{arr} = 1.7 * 4 * 44.5A$$

$$I_{arr} = 302.6A$$

Empleando la ecuación (2.5) se tiene que:

$$P_v \geq 1.05 * 4 * 26.5kW$$

$$P_v \geq 111.3kW$$

**Grúa de depósito interior (GH).**

Para los motores de traslación del puente:

Son 4 motores asíncronos con rotores de jaula de ardilla, con los datos nominales siguientes:



$P_n = 15kW$ ,  $U_n = 440V$ ,  $I_n = 26.5A$ ,  $\cos \varphi = 0.88$

Son operados por un solo variador de velocidad de ALTIVAR 71 de  $P_n=110kW$ .

Empleando la ecuación (2.6) se tiene que:

$$k = \frac{110kW}{(4 * 15kW)} = \frac{110kW}{60kW} = 1.83$$

Empleando la ecuación (2.2) se tiene que:

$$I_v \geq 1.05 * 4 * 26.5A$$

$$I_v \geq 111.3A$$

Empleando la ecuación (2.4) se tiene que:

$$I_{arr} = 1.7 * 4 * 26.5A$$

$$I_{arr} = 180.2A$$

Empleando la ecuación (2.5) se tiene que:

$$P_v \geq 1.05 * 4 * 15kW$$

$$P_v \geq 63kW$$

Para los motores de Peso y Cierre:

Son 2 motores asíncronos con rotores de jaula de ardilla, con los datos nominales siguientes:

$P_n = 90kW$ ,  $U_n = 440V$ ,  $I_n = 140A$ ,  $\cos \varphi = 0.88$

Cada uno es accionado por un variador de velocidad de ALTIVAR 71 de  $P_n=110kW$ .

Empleando la ecuación (2.6) se tiene que:

$$k = \frac{110kW}{90kW} = 1.22$$



Empleando la ecuación (2.2) se tiene que:

$$I_v \geq 1.05 * 140 A$$

$$I_v \geq 147 A$$

Empleando la ecuación (2.4) se tiene que:

$$I_{arr} = 1.7 * 140 A$$

$$I_{arr} = 238 A$$

Empleando la ecuación (2.5) se tiene que:

$$P_v \geq 1.05 * 90 kW$$

$$P_v \geq 94 kW$$

Para los motores de traslación del carro:

Son 2 motores asíncronos con rotores de jaula de ardilla, con los datos nominales siguientes:

$P_n = 7.5 kW$ ,  $U_n = 440 V$ ,  $I_n = 13.7 A$ ,  $\cos \phi = 0.88$

Son operados por un solo variador de velocidad de ALTIVAR 71 de  $P_n = 22 kW$ .

Empleando la ecuación (2.6) se tiene que:

$$k = \frac{22 kW}{(2 * 7.5 kW)} = \frac{22 kW}{15 kW} = 1.47$$

Empleando la ecuación (2.2) se tiene que:

$$I_v \geq 1.05 * \text{Ⓢ} * 13.7 A$$

$$I_v \geq 28.77 A$$

Empleando la ecuación (2.4) se tiene que:

$$I_{arr} = 1.7 * \text{Ⓢ} * 13.7 A$$

$$I_{arr} = 46.58 A$$



Empleando la ecuación (2.5) se tiene que:

$$P_v \geq 1.05 * \text{C} * 7.5kW$$
$$P_v \geq 15.75kW$$

### **Alimentadores de secaderos(AS):**

Son 7 motores asincrónicos con rotores de jaula de ardilla, con los datos nominales siguientes:

#### Alimentadores del 1 al 4

$P_n = 22kW$ ,  $U_n = 440V$ ,  $I_n = 31A$ ,  $\text{Cos } \varphi = 0.8$

#### Alimentador 5

$P_n = 22kW$ ,  $U_n = 440V$ ,  $I_n = 25.9A$ ,  $\text{Cos } \varphi = 0.79$

#### Alimentador 6

$P_n = 22kW$ ,  $U_n = 440V$ ,  $I_n = 70A$ ,  $\text{Cos } \varphi = 0.75$

#### Alimentador 7

$P_n = 22kW$ ,  $U_n = 440V$ ,  $I_n = 25A$ ,  $\text{Cos } \varphi = 0.75$

Cada uno es accionado por un variador de velocidad de ALTIVAR 71 de  $P_n=22kW$ .

Empleando la ecuación (2.6) se tiene que:

$$k = \frac{22kW}{22kW} = 1$$

Empleando la ecuación (2.2) se tiene que:

#### Alimentadores del 1 al 4

$$I_v \geq 1.05 * 31A$$

$$I_v \geq 32.55A$$

#### Alimentador 5

$$I_v \geq 1.05 * 25.9A$$

$$I_v \geq 27.20A$$



Alimentador 6

$$I_v \geq 1.05 * 70A$$

$$I_v \geq 73.5A$$

Alimentador 7

$$I_v \geq 1.05 * 25A$$

$$I_v \geq 26.25A$$

Empleando la ecuación (2.4) se tiene que:

Alimentadores del 1 al 4

$$I_{arr} = 1.7 * 31$$

$$I_{arr} = 52.7A$$

Alimentador 5

$$I_{arr} = 1.7 * 25.9A$$

$$I_{arr} = 44.03A$$

Alimentador 6

$$I_{arr} = 1.7 * 70A$$

$$I_{arr} = 119A$$

Alimentador 7

$$I_{arr} = 1.7 * 25A$$

$$I_{arr} = 42.5A$$



Empleando la ecuación (2.5) se tiene que:

$$P_v \geq 1.05 * 22kW$$

$$P_v \geq 23.1kW$$

### **Separadores dinámicos (SEPOL A y B)**

Son 2 motores asincrónicos con rotores de jaula de ardilla, con los datos nominales siguientes:

$$P_n = 184kW, U_n = 440V, I_n = 290A, \text{Cos } \varphi = 0.87$$

Cada uno es accionado por un variador de velocidad de ALTIVAR 71 de  $P_n=250kW$ .

Empleando la ecuación (2.6) se tiene que:

$$k = \frac{250kW}{184kW} = 1.36$$

Empleando la ecuación (2.2) se tiene que:

$$I_v \geq 1.05 * 290A$$

$$I_v \geq 304.5A$$

Empleando la ecuación (2.4) se tiene que:

$$I_{arr} = 1.7 * 290A$$

$$I_{arr} = 493A$$

Empleando la ecuación (2.5) se tiene que:

$$P_v \geq 1.05 * 184kW$$

$$P_v \geq 193.2kW$$



**Tabla 2.** Estado del coeficiente k para los variadores de velocidad que están operando.

Grúa India			
Puente	Peso y cierre	Carro	
k=1.6	k=1.25	k=1.04	
Grúa GH			
k=1.83	k=1.22	k=1.47	
Alimentadores			
1-4	5	6	7
k=1	k=1	k=1	k=1
Separadores			
k=1.36			

**Tabla 3.** Datos para la selección de los variadores de velocidad.

Grúa India			
Puente	Peso y cierre	Carro	
Iv $\geq$ 146.16A	Iv $\geq$ 357A	Iv $\geq$ 186.9A	
Pv $\geq$ 72.24Kw	Pv $\geq$ 210kW	Pv $\geq$ 111.3kW	
Pv $\geq$ 96.84HP	Pv $\geq$ 281.50HP	Pv $\geq$ 149.20HP	
Iarr=236.64A	Iarr=578A	Iarr=302.6A	
Grúa GH			
Iv $\geq$ 111.6A	Iv $\geq$ 147A	Iv $\geq$ 28.77A	
Pv $\geq$ 63kW	Pv $\geq$ 94kW	Pv $\geq$ 15.75kW	
Pv $\geq$ 84.45HP	Pv $\geq$ 126.01HP	Pv $\geq$ 21.11HP	
Iarr=180.2A	Iarr=238A	Iarr=46.58A	
Alimentadores			
1-4	5	6	7
Iv $\geq$ 32.55A	Iv $\geq$ 27.20A	Iv $\geq$ 73.5A	Iv $\geq$ 26.25 <sup>a</sup>
Pv $\geq$ 23.1kW	Pv $\geq$ 23.1kW	Pv $\geq$ 23.1kW	Pv $\geq$ 23.1kW
Pv $\geq$ 30.97HP	Pv $\geq$ 30.97HP	Pv $\geq$ 30.97HP	Pv $\geq$ 30.97HP





larr=52.7A	larr=44.03A	larr=119A	larr=42.5A
Separadores			
Iv≥304.5A			
Pv≥193.2kW			
Pv≥258.98HP			
larr=493A			

### 2.2.1 Selección de los variadores de velocidad por Altivar 71 (ATV 71).

#### Para las grúas indias

##### Puente

Para los datos requeridos:

Iv≥146.16A, Pv≥72.24kW y larr=236.64A, se selecciona un variador ATV71HD75N4, que tiene Pn=75kW, I<sub>máx permanente</sub>=160A, I<sub>transitoria máx60seg</sub>=240A y I<sub>transitoria máx2seg</sub>=264A.

Con esta selección el coeficiente k=1.6, se reduce a 1.039

##### Peso y Cierre

Para los datos requeridos:

Iv≥357A, Pv≥210kW y larr=578A, se selecciona un variador ATV71HC25N4, que tiene Pn=220kW, I<sub>máx permanente</sub>=427A, I<sub>transitoria máx60seg</sub>=640A y I<sub>transitoria máx2seg</sub>=704A.

Con esta selección el coeficiente k=1.25, se reduce a 1.048

##### Carro

Para los datos requeridos:

Iv≥186.9A, Pv≥113.3kW y larr=302.6A, se selecciona un variador ATV71HC13N4, que tiene Pn=132kW, I<sub>máx permanente</sub>=259A, I<sub>transitoria máx60seg</sub>=388A y I<sub>transitoria máx2seg</sub>=427A.

Con esta selección el coeficiente k=1.04, se aumenta a 1.19

#### Para la grúa de depósito interior (GH).

##### Puente

Para los datos requeridos:



$I_v \geq 111.3A$ ,  $P_v \geq 63kW$  y  $I_{arr} = 180.2A$ , se selecciona un variador ATV71HD75N4, que tiene  $P_n = 75kW$ ,  $I_{m\acute{a}x\ permanente} = 160A$ ,  $I_{transitoria\ m\acute{a}x60seg} = 240A$  y  $I_{transitoria\ m\acute{a}x2seg} = 264A$ .

Con esta selecci3n el coeficiente  $k = 1.83$ , se reduce a 1.19

### Peso y Cierre

Para los datos requeridos:

$I_v \geq 147A$ ,  $P_v \geq 94kW$  y  $I_{arr} = 238A$ , se selecciona un variador ATV71HC11N4, que tiene  $P_n = 110kW$ ,  $I_{m\acute{a}x\ permanente} = 215A$ ,  $I_{transitoria\ m\acute{a}x60seg} = 323A$  y  $I_{transitoria\ m\acute{a}x2seg} = 355A$ .

Con esta selecci3n el coeficiente  $k = 1.22$ , se reduce a 1.17

### Carro

Para los datos requeridos:

$I_v \geq 28.77A$ ,  $P_v \geq 15.75kW$  y  $I_{arr} = 46.58A$ , se selecciona un variador ATV71HD18N4, que tiene  $P_n = 18.5kW$ ,  $I_{m\acute{a}x\ permanente} = 41A$ ,  $I_{transitoria\ m\acute{a}x60seg} = 61.5A$  y  $I_{transitoria\ m\acute{a}x2seg} = 67.7A$ .

Con esta selecci3n el coeficiente  $k = 1.47$ , se reduce a 1.17

### **Para los Alimentadores de secaderos.**

#### Del alimentador 1 al 4

Para los datos requeridos:

$I_v \geq 32.55A$ ,  $P_v \geq 23.1kW$  y  $I_{arr} = 52.7A$ , se selecciona un variador ATV71HD30N4, que tiene  $P_n = 30kW$ ,  $I_{m\acute{a}x\ permanente} = 66A$ ,  $I_{transitoria\ m\acute{a}x60seg} = 99A$  y  $I_{transitoria\ m\acute{a}x2seg} = 109A$ .

Con esta selecci3n el coeficiente  $k = 1$ , aumenta a 1.29

#### Alimentador 5

Para los datos requeridos:

$I_v \geq 27.20A$ ,  $P_v \geq 23.1kW$  y  $I_{arr} = 44.03A$ , se selecciona un variador ATV71HD30N4, que tiene  $P_n = 30kW$ ,  $I_{m\acute{a}x\ permanente} = 66A$ ,  $I_{transitoria\ m\acute{a}x60seg} = 99A$  y  $I_{transitoria\ m\acute{a}x2seg} = 109A$

Con esta selecci3n el coeficiente  $k = 1$ , aumenta a 1.29

#### Alimentador 6

Para los datos requeridos:



$I_v \geq 73.5A$ ,  $P_v \geq 23.1kW$  y  $I_{arr} = 119A$ , se selecciona un variador ATV71HD37N4, que tiene  $P_n = 37kW$ ,  $I_{m\acute{a}x\ permanente} = 79A$ ,  $I_{transitoria\ m\acute{a}x60seg} = 118.5A$  y  $I_{transitoria\ m\acute{a}x2seg} = 130A$

Con esta selecci3n el coeficiente  $k=1$ , aumenta a 1.6

Nota: La  $I_{transitoria\ m\acute{a}x60seg} = 118.5A$ , queda 0.5A por debajo de la  $I_{arr} = 119A$ .

**Alimentador 7**

Para los datos requeridos:

$I_v \geq 26.25A$ ,  $P_v \geq 23.1kW$  y  $I_{arr} = 42.5A$ , se selecciona un variador ATV71HD30N4, que tiene  $P_n = 30kW$ ,  $I_{m\acute{a}x\ permanente} = 66A$ ,  $I_{transitoria\ m\acute{a}x60seg} = 99A$  y  $I_{transitoria\ m\acute{a}x2seg} = 109A$

Con esta selecci3n el coeficiente  $k=1$ , aumenta a 1.29

**Para los separadores.**

Para los datos requeridos:

$I_v \geq 304.5A$ ,  $P_v \geq 193.2kW$  y  $I_{arr} = 493A$ , se selecciona un variador ATV71HC20N4, que tiene  $P_n = 200kW$ ,  $I_{m\acute{a}x\ permanente} = 387A$ ,  $I_{transitoria\ m\acute{a}x60seg} = 580A$  y  $I_{transitoria\ m\acute{a}x2seg} = 638A$

Con esta selecci3n el coeficiente  $k=1.36$ , se reduce a 1.035.

**Tabla 4.** Estado del coeficiente k antes y despu3s de la selecci3n de Altivar.

Grúa India			
Puente	Peso y cierre	Carro	
k=1.6	k=1.25	k=1.04	
k=1.04	k=1.05	k=1.19	
Grúa GH			
k=1.83	k=1.22	k=1.47	
k=1.19	k=1.17	k=1.17	
Alimentadores			
1-4	5	6	7
k=1	k=1	k=1	k=1
k=1.29	k=1.29	k=1.6	k=1.29
Separadores			
k=1.36			
k=1.04			



Tabla 5. Variadores de velocidad Altivar 71 seleccionados. [19]

Ubicación	No. Serie	P(kW)	Ipm(A)	I <sub>tm60s</sub> (A)	I <sub>tm2s</sub> (A)	Precio(€)
Grúa India						
Puente	ATV71HD75N4	75	160	240	264	6639.36
Peso	ATV71HC25N4	220	427	640	704	14070.40
Cierre	ATV71HC25N4	220	427	640	704	14070.40
Carro	ATV71HC13N4	132	259	388	427	11123.84
Grúa GH						
Puente	ATV71HD75N4	75	160	240	264	6639.36
Peso	ATV71HC11N4	110	215	323	355	7421.87
Cierre	ATV71HC11N4	110	215	323	355	7421.87
Carro	ATV71HD18N4	18.5	41	61.5	67.7	1754.68
Alimentadores						
Alimentador 1	ATV71HD30N4	30	66	99	109	3790.10
Alimentador 2	ATV71HD30N4	30	66	99	109	3790.10
Alimentador 3	ATV71HD30N4	30	66	99	109	3790.10
Alimentador 4	ATV71HD30N4	30	66	99	109	3790.10
Alimentador 5	ATV71HD30N4	30	66	99	109	3790.10
Alimentador 6	ATV71HD37N4	37	79	118.5	130	4565.26
Alimentador 7	ATV71HD30N4	30	66	99	109	3790.10
Separadores						
Separador A	ATV71HC20N4	200	387	580	638	13140.37
Separador B	ATV71HC20N4	200	387	580	638	13140.37



## 2.2.2 Selección de los variadores de velocidad Yaskawa.

### Para las grúas indias

#### Puente

Para los datos requeridos:

$I_v \geq 146.16A$ ,  $P_v \geq 96.84HP$  y  $I_{arr} = 236.64A$ , se selecciona un variador Yaskawa modelo CIMR-F7U 4090, que tiene  $P_n = 125/150HP$ ,  $I_{m\acute{a}x\ permanente} = 180A$ ,  $I_{transitoria\ m\acute{a}x60seg} = 270A$ ,

Con esta selecci3n el coeficiente  $k = 1.6$ , se reduce a 1.36.

#### Peso y Cierre

Para los datos requeridos:

$I_v \geq 357A$ ,  $P_v \geq 281.50HP$  y  $I_{arr} = 578A$ , se selecciona un variador Yaskawa modelo CIMR-F7U 4220, que tiene  $P_n = 350/400HP$ ,  $I_{m\acute{a}x\ permanente} = 506A$ ,  $I_{transitoria\ m\acute{a}x60seg} = 759A$

Con esta selecci3n el coeficiente  $k = 1.25$ , aumenta a 1.31.

#### Carro

Para los datos requeridos:

$I_v \geq 186.9A$ ,  $P_v \geq 149.20HP$  y  $I_{arr} = 302.6A$ , se selecciona un variador Yaskawa modelo CIMR-F7U 4132, que tiene  $P_n = 200HP$ ,  $I_{m\acute{a}x\ permanente} = 260A$ ,  $I_{transitoria\ m\acute{a}x60seg} = 2390A$

Con esta selecci3n el coeficiente  $k = 1.04$ , se aumenta a 1.41.

### Para la grúa GH

#### Puente

Para los datos requeridos:

$I_v \geq 111.3A$ ,  $P_v \geq 84.45HP$  y  $I_{arr} = 180.2A$ , se selecciona un variador Yaskawa modelo CIMR-F7U 4075, que tiene  $P_n = 100HP$ ,  $I_{m\acute{a}x\ permanente} = 150A$ ,  $I_{transitoria\ m\acute{a}x60seg} = 225A$

Con esta selecci3n el coeficiente  $k = 1.83$ , se reduce a 1.24.

#### Peso y Cierre

Para los datos requeridos:



$I_v \geq 147A$ ,  $P_v \geq 126.01HP$  y  $I_{arr} = 238A$ , se selecciona un Yaskawa modelo CIMR-F7U 4090, que tiene  $P_n = 125/150HP$ ,  $I_{m\acute{a}x\ permanente} = 180A$ ,  $I_{transitoria\ m\acute{a}x60seg} = 270A$

Con esta selecci3n el coeficiente  $k = 1.22$ , se reduce a 1.04.

### Carro

Para los datos requeridos:

$I_v \geq 28.77A$ ,  $P_v \geq 21.11HP$  y  $I_{arr} = 46.58A$ , se selecciona un variador Yaskawa modelo CIMR-F7U 4018, que tiene  $P_n = 25HP$ ,  $I_{m\acute{a}x\ permanente} = 39A$ ,  $I_{transitoria\ m\acute{a}x60seg} = 58.5A$

Con esta selecci3n el coeficiente  $k = 1.47$ , se reduce a 1.24.

### **Para los Alimentadores**

Para los datos requeridos:

$P_v \geq 30.97HP$  y  $I_{v_{1-4}} \geq 32.55A$  y  $I_{arr} = 52.7A$ ,  $I_{v_5} \geq 27.20A$  y  $I_{arr_5} = 44.03A$ ,  $I_{v_6} \geq 73.5A$  y  $I_{arr_6} = 119A$  y  $I_{v_7} \geq 26.25A$  y  $I_{arr_7} = 42.5A$ , se seleccionan para los alimentadores del 1-4,5 y 7 variadores Yaskawa modelo CIMR-F7U 4030, que tiene  $P_n = 40HP$ ,  $I_{m\acute{a}x\ permanente} = 60A$ ,  $I_{transitoria\ m\acute{a}x60seg} = 90A$ , y para el alimentador 6 se selecciona un variador Yaskawa modelo CIMR-F7U 4045, que tiene  $P_n = 60HP$ ,  $I_{m\acute{a}x\ permanente} = 91A$ ,  $I_{transitoria\ m\acute{a}x60seg} = 136.5A$

Con esta selecci3n el coeficiente  $k = 1$ , aumenta a 1.36 en los alimentadores del 1-4,5 y 7, y a 2.04 en el alimentador 6.

### **Para los SEPOL**

Para los datos requeridos:

$I_v \geq 304.5A$ ,  $P_v \geq 258.98HP$  y  $I_{arr} = 493A$ , se selecciona un variador Yaskawa modelo CIMR-F7U 4185, que tiene  $P_n = 300HP$ ,  $I_{m\acute{a}x\ permanente} = 370A$ ,  $I_{transitoria\ m\acute{a}x60seg} = 555A$

Con esta selecci3n el coeficiente  $k = 1.36$ , se reduce a 1.22.



Tabla 6. Variadores de velocidad Yaskawa seleccionados. [21]

Ubicación	No. Serie	P(HP)	lpm(A)	ltm <sub>60s</sub> (A)	Precio(cuc)
Grúa India					
Puente	CIMR-F7U 4090	125/150	180	270	
Peso	CIMR-F7U 4220	350/400	506	759	
Cierre	CIMR-F7U 4220	350/400	506	759	
Carro	CIMR-F7U 4132	200	260	390	
Grúa GH					
Puente	CIMR-F7U 4075	100	150	225	
Peso	CIMR-F7U 4090	125/150	180	270	
Cierre	CIMR-F7U 4090	125/150	180	270	
Carro	CIMR-F7U 4018	25	39	58.5	
Alimentadores					
Alimentador 1	CIMR-F7U 4030	40	60	90	
Alimentador 2	CIMR-F7U 4030	40	60	90	
Alimentador 3	CIMR-F7U 4030	40	60	90	
Alimentador 4	CIMR-F7U 4030	40	60	90	
Alimentador 5	CIMR-F7U 4030	40	60	90	
Alimentador 6	CIMR-F7U 4045	60	91	136.5	
Alimentador 7	CIMR-F7U 4030	40	60	90	
Separadores					
Separador A	CIMR-F7U 4185	300	370	555	
Separador B	CIMR-F7U 4185	300	370	555	



Tabla 7. Estado del coeficiente k antes y después de la selección de Yaskawa.

Grúa India			
Puente	Peso y cierre	Carro	
k=1.6	k=1.25	k=1.04	
k=1.36	k=1.31	k=1.41	
Grúa GH			
k=1.83	k=1.22	k=1.47	
k=1.24	k=1.04	k=1.24	
Alimentadores			
1-4	5	6	7
k=1	k=1	k=1	k=1
k=1.36	k=1.36	k=2.04	k=1.36
Separadores			
k=1.36			
k=1.22			





## Capítulo 3. Análisis de los resultados

### 3.1 Valoración técnica de la explotación de los variadores de velocidad.

El empleo de los variadores de velocidad en el proceso tecnológico de la planta de secaderos es de gran importancia, ya que tiene múltiples funciones y aplicaciones, como se muestra en el Capítulo 1, además el variador Altivar 71 específicamente tiene ventajas como son:

- Gama de potencia para red 50...60 Hz (kW): 0,37...500
  - Monofásica 200...240 V (kW): 0.37...5.5
  - Trifásica 200...240 V (kW): 0.37...75
  - Trifásica 380...480 V (kW): 0.75...500

Nota: Tiene intervalos más pequeños de potencia que el Yaskawa F7.

- Frecuencia de salida: 0...1000 Hz.
- Sobrepar transitorio: 220 % del par nominal motor durante 2 segundos y 170% durante 60 segundos
- Número de funciones: > 150
- Número de velocidades preseleccionadas: 16
- Número de entradas/salidas
  - Entradas analógicas: 2...4
  - Entradas lógicas: 6...20
  - Salidas analógicas: 1...3
  - Salidas lógicas: 0...8
  - Salidas de relé: 2...4
- Comunicación:
  - Integrada: Modbus y CANopen.
  - Opcional: Ethernet TCP/IP, Fipio, Modbus Plus, INTERBUS, Profibus DP, Modbus/Uni-Telway, DeviceNet.
- Tarjetas (opcional):
  - Tarjetas de interface de codificador.
  - Tarjetas de extensión de entradas/salidas.
  - Tarjeta programable "Controller Inside". [19]



- Cuenta con un módulo de resistencias de frenado, que es de vital importancia para las aplicaciones de izaje.

Nota: los variadores Yaskawa F7 que le están suministrando a la empresa, no cuentan con este módulo.

- El proveedor ofrece además de la posibilidad de mantenimiento, cursos de superación para los operadores.

Partiendo de las aplicaciones, funciones y ventajas que ofrece el variador de velocidad Altivar 71, además que es el que está operando actualmente en la planta, se realizó una evaluación a los 29 variadores de velocidad que operan en la planta de secaderos, los que están distribuidos de la siguiente forma:

- 4 Grúas Indias en el depósito exterior, pero solo tres de ellas están modernizadas, estas cuentan con cuatro variadores de velocidad, uno que controla a los cuatro motores de movimiento del carro, uno para el motor que controla el peso, uno para el motor que controla el cierre, y uno que controla a los ocho motores que se encargan del movimiento del puente.
- 2 Grúas GH en el depósito interior, estas cuentan con cuatro variadores de velocidad, uno que controla a los dos motores de movimiento del carro, uno para el motor que controla el peso, uno para el motor que controla el cierre, y uno que controla a los cuatro motores que se encargan del movimiento del puente.
- 7 secaderos, cada uno cuenta con un alimentador, y estos tienen a su vez un variador de velocidad que acciona a sus respectivos motores.
- 2 Separadores dinámicos que cuentan con un variador de velocidad cada uno para controlar a sus respectivos motores.

Atendiendo a la ecuación 2.5, que el coeficiente  $k$  debe estar entre 1 y 1.2, preferentemente 1.05, se puede observar que de los 29 variadores analizados, solo hay 3 que están bien seleccionados, los de los accionamientos del movimiento del carro de las grúas Indias, en el depósito exterior, con un  $k=1.04$ . Los accionamientos de los alimentadores de secaderos tienen un  $k=1$ , pero esto se debe a que los variadores de velocidad seleccionados tienen la misma



potencia que los motores que están alimentando, lo que es incorrecto por la ecuación 2.1, y los accionamientos de peso y cierre de las grúas del depósito interior están en el límite máximo con  $k=1.22$ . Estos valores están dados a que casi todos los variadores de velocidad están seleccionados con parámetros que están por encima de los que se necesitan, esto, además de encarecer las instalaciones, hace que consuman energía que podría ser empleada en otras operaciones productivas ya que están consumiendo en la entrada de alimentación y están subutilizados .

Con la nueva selección, tal como se muestra en la Tabla.4, se logra que todos los accionamientos mejoren sus coeficientes  $k$ , llevando a los variadores al rango correcto de selección, menos los de los alimentadores de secaderos que como tenían la misma potencia que los motores que estaban accionando, al corregir la selección se afectó el coeficiente  $k$ .

### **3.2 Cálculo del aporte económico.**

La producción de níquel por el proceso CARON constituye uno de los métodos de mayor consumo energético en la industria nacional.

Actualmente una tonelada de níquel obtenida por este proceso consume más de 10 MWh de energía eléctrica y constituye más del 20 % del costo de producción, y esto se refleja en el nivel de vida de la población. Es por esto que la eficiencia en el uso de la energía eléctrica tiene un impacto, tanto económico como social.

En las plantas minero metalúrgicas como las de Moa y Nicaro, los mayores consumidores de energía eléctrica lo representan los accionamientos eléctricos de producción de aire comprimido, las bombas centrífugas, las instalaciones de molienda y secado y los ventiladores.

El cálculo económico está dado por el ahorro de dinero y de energía que puede significar la correcta selección y ajuste de los variadores de velocidad.

Partiendo de los datos de potencias y precios que se muestran en la tabla.5 se elabora la tabla.8, donde se muestra cuánta potencia se ahorra con la nueva selección:



Tabla 8. Ahorro de potencia con la nueva selección.

Ubicación	Potencia actual(kW)	Potencia propuesta(kW)	Potencia ahorrada(kW)/Variador	Potencia ahorrada(kW) total
Grúa India				
Puente	110	75	35	105
Peso	250	220	30	90
Cierre	250	220	30	90
Carro	110	132	-22	-66
Grúa GH				
Puente	110	75	35	70
Peso	110	110	-	-
Cierre	110	110	-	-
Carro	22	18.5	3.5	7
Alimentadores				
Alimentador 1	22	30	-8	-8
Alimentador 2	22	30	-8	-8
Alimentador 3	22	30	-8	-8
Alimentador 4	22	30	-8	-8
Alimentador 5	22	30	-8	-8
Alimentador 6	22	37	-15	-15
Alimentador 7	22	30	-8	-8
Separadores				
Separador A	250	200	50	50
Separador B	250	200	50	50
<b>Total de potencia ahorrada</b>				<b>333 kW</b>

Nota: los valores negativos significan que se consume, en vez de ahorrar.



**Tabla 9.** Resultados del cálculo de la potencias y las divisas que se ahorran al año gracias a la nueva selección.

Potencia ahorrada (kW)	kWh/año	\$/kWh/año
333	2877120	546652.80

Atendiendo a los resultados mostrados en las Tablas 8 y 9 se observa que si se llevan los variadores de velocidad que están operando, a su valor óptimo, se ahorra un total de 333 kW, que al año representa 2877120 kWh, lo que al precio que paga la Empresa Cmdte. René Ramos Latour un kWh a la Empresa Eléctrica, que es a 0.19 CUC, equivale a un ahorro de 546652.80 CUC al año, que en otras palabras es lo que actualmente la fábrica está pagando de más.

**Tabla 10.** Cálculo del ahorro que representa en cuanto al precio del equipamiento a la hora de sustituir los variadores que están operando.

Ubicación	Pactual (kW)	Precio (€)	Propuesta (kW)	Precio (€)	Capital ahorrado (€)	Total Cap. ahorrado (€)
<b>Grúa India</b>						
Puente	110	7421.87	75	6639.36	782.51	2347.53
Peso	250	15541.23	220	14070.40	1470.83	4412.49
Cierre	250	15541.23	220	14070.40	1470.83	4412.49
Carro	110	7421.87	132	11123.84	-3701.97	-11105.91
<b>Grúa GH</b>						
Puente	110	7421.87	75	6639.36	782.51	2347.53
Peso	110	7421.87	110	7421.87	-	-
Cierre	110	7421.87	110	7421.87	-	-
Carro	22	2309.96	18.5	1754.68	555.28	1665.84
<b>Alimentadores</b>						
Alimentador 1	22	2309.96	30	3790.10	-1480.14	-1480.14
Alimentador 2	22	2309.96	30	3790.10	-1480.14	-1480.14
Alimentador 3	22	2309.96	30	3790.10	-1480.14	-1480.14
Alimentador 4	22	2309.96	30	3790.10	-1480.14	-1480.14
Alimentador 5	22	2309.96	30	3790.10	-1480.14	-1480.14
Alimentador 6	22	2309.96	37	4565.26	-2255.30	-2255.30
Alimentador 7	22	2309.96	30	3790.10	-1480.14	-1480.14
<b>Separadores</b>						
Separador A	250	15541.23	200	13140.37	2400.86	2400.86
Separador B	250	15541.23	200	13140.37	2400.86	2400.86
<b>Total del capital ahorrado</b>						<b>-2254.45</b>

**Nota:** los valores negativos significan pérdidas, o sea, que el que se propone es más caro que el que está operando.

Como se observa en los resultados en la tabla 10, a la hora de sustituir los variadores que están operando, se incurre en un gasto de 2254.45 euros.



### 3.2.1 Cálculo del tiempo de amortización de la inversión.

Se tiene que 
$$T_{amortización} = \frac{Inversión}{Energía Ahorrada}$$

Donde:

$T_{amortización}$ : es el tiempo de recuperación de la inversión.

Inversión: es lo que se invierte en la compra del producto.

Energía ahorrada: es la energía que se ahorra con el producto que se propone comprar en (CUC). [3].

Atendiendo a que el costo de la inversión es en euros, se convierte a moneda libremente convertible y se obtiene que para un costo de inversión de 122728.38 €, equivalentes a 168137.88 CUC, el tiempo de recuperación de la inversión es de 111 días, o lo que es lo mismo aproximadamente 4 meses, teniendo en cuenta que es una planta de producción continua, y que estos resultados son para una sustitución total del equipamiento, acción que el proceso tecnológico de la planta no permite, por lo que al realizarse el remplazo a medida que se vayan averiando los equipos, haría mucho menos costoso este proceso.

### 3.3 Valoración Medioambiental

La operación del variador de velocidad esta abalada por las normas internacionales de seguridad e higiene del trabajo, un comportamiento integralmente ecológico pues en su funcionamiento no vierten al medio sustancias químicas ni toxicas con peligro para la vida ni tampoco desechos sólidos.

Desde el punto de vista ecológico la influencia que puede tener el variador es la contaminación sónica porque al trabajar en conmutación genera oscilaciones, vibraciones, ruido e inyección armónica, sin embargo el principio de trabajo estático le proporciona un trabajo silencioso prácticamente nulo no audible, independientemente de que el valor de la frecuencia de modulación está en el ancho de banda humano.



El nivel de vibración mecánica es admisible si se garantiza adecuado ajuste de las partes y componentes que componen el sistema sobre todo después de la primera reparación.

El problema serio del variador aunque no se vea es la inyección armónica que causa a la red en que está conectado, independientemente de los filtros que tiene al respecto, estos armónicos son causa de sobrecalentamiento y ruido en las líneas provocando también la deformación del valor eficaz de la tensión a frecuencia fundamental.

El impacto visual que causa el empleo de los variadores es insignificante y son incapaces de transformar el entorno industrial propio de la planta de secaderos, donde la forma, el tamaño y el color de estos son despreciables con respecto al tamaño del resto de los accionamientos.

### **3.4 Valoración Social**

Todas las medidas que se toman para disminuir los agentes contaminantes y optimizar el trabajo del equipamiento repercuten en gran medida en la humanización de las condiciones de trabajo del obrero, ya que alargando la vida útil de los equipos, y disminuyendo la exposición al ruido, las vibraciones y las emisiones de calor, factores que a corto, mediano y largo plazo pueden afectar la capacidad del trabajo físico y mental del hombre, se hace más placentera la jornada laboral en las duras condiciones que impone la planta de secadero en la empresa Cmdte. René Ramos Latour.





## Conclusiones

Una vez realizado este trabajo:

- Se obtuvo información sobre la funcionalidad y rentabilidad del empleo de los variadores de velocidad en la planta de secaderos, arrojando datos sobre la mala selección de los variadores que están operando.
- Se obtuvo información sobre la afectación económica y energética sobre el proceso tecnológico de la planta, ya que al averiarse un equipo, y este estar sobredimensionado, se encarece la instalación del mismo, y una vez instalado este consume energía que podría ser empleada en otra parte del proceso.
- Se obtiene una metodología de selección correcta de variadores, lo que da una medida de cuanto se ahorra en cuanto a los precios de estos y a los que dejan de consumir producto a la sobredimensión y a la subutilización.
- Se pudo observar que el variador de velocidad Altivar 71 tiene menores intervalos entre los rangos de potencias, lo que permite realizar una selección más precisa.



## Recomendaciones

- Tener en cuenta los resultados arrojados por este trabajo a la hora de sustituir un variador que se haya averiado y para la futura modernización de la Grúa India # 2 del depósito exterior.
- Continuar estudiando la selección de los variadores de velocidad en el resto de la empresa.
- Aplicar para la selección de variadores la metodología planteada en este trabajo.



## Bibliografía

1. Álvarez Leyva, D. *Influencia de los armónicos en la eficiencia de los accionamientos con variadores de velocidad en la Empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara de Moa*. Luis Delfín Rojas Purón (tutor). Tesis en opción al título de Ingeniero Eléctrico. Instituto Superior Minero Metalúrgico Moa. 2010. 114 h.
2. Aparicio, J. L. *Criterios de Diseño de Convertidores Estáticos para Accionamientos Regulados en Corriente Alterna con Motores de Inducción*. Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo, 1987.
3. Ávila Pérez, A.R. *Observador de eficiencia para accionamiento con motor de inducción usando agentes difusos con variador de Velocidad Yaskawa*. Luis Delfín Rojas Purón(tutor). Tesis en opción al título de Ingeniero Eléctrico. Instituto Superior Minero Metalúrgico Moa. 2010. 104 h.
4. Briz del Blanco, F. *Control Vectorial del Motor de Inducción con Identificación y Adaptación a los Parámetros de la Carga*, Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo. 1995.
5. Cano Postigo, I. *Análisis de anomalías en variadores de velocidad*. [s.a]. 32 h.
6. Fonseca Alpajón, D. *Interfaz para comunicación de sistema SCADA de accionamientos con variadores de velocidad*. Luís Delfín Rojas Purón (tutor). Tesis en opción al título de Ingeniero Eléctrico. Instituto Superior Minero Metalúrgico Moa. 2009. 97 h.
7. Graña Alarcón, O. *Sistema de bombeo de combustible de la Empresa Puerto de Moa*. Wilber Acuña Rodríguez (tutor). Tesis en opción al título de Ingeniero Eléctrico. Instituto Superior Minero Metalúrgico Moa, 2010. 87 h.
8. Guía de instalación Altivar 71: *Variadores de velocidad para motores síncronos y motores asíncronos*. [s.a] [s.l]. 78 h.



9. Guía Rápida Frenic Mega: *Variadores Multifunción de Altas prestaciones. Documento: SG\_MEGA\_ES\_1.2.*
10. Kostenko, M.P.; Piotrovsky, L. *Máquinas Eléctricas*, Editorial Mir, Moscú 1976.
11. Leyva Marrero, G. *Metodología para determinar parámetros eléctricos en Variadores de Velocidad*. Osmani Pérez Aballe (tutor). Tesis en opción al título de Ingeniero Eléctrico. Instituto Superior Minero Metalúrgico Moa. 2010. 84 h.
12. Manual de trabajo. *Aumento de la productividad en secaderos*. [s.a] [s.l]. 26 h.
13. Manual de trabajo. *Presentación para ingenieros nuevos*. [s.a] [s.l].
14. Manual de trabajo. *Control y regulación de la velocidad en motores asincrónicos trifásicos*. [s.l]. 2002.
15. Muhammad H. Rashid. *Electrónica de Potencia: Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones*. Tomo II.
16. Nota de aplicación de Fluke: *Medidas en variadores de velocidad*. Autor J. David Rodríguez.
17. Pedroso Tarafa, S. E. *Sistema experto de eficiencia en accionamientos con variadores de velocidad en la Empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara de Moa*. Luís Delfín Rojas Purón (tutor). Tesis en opción al título de Ingeniero Eléctrico. Instituto Superior Minero Metalúrgico Moa. 2009. 107 h.
18. Phipps, Clarence A. (1997). *Variable Speed Drive Fundamentals*. The Fairmont Press, Inc. ISBN 0-88173-258-3.



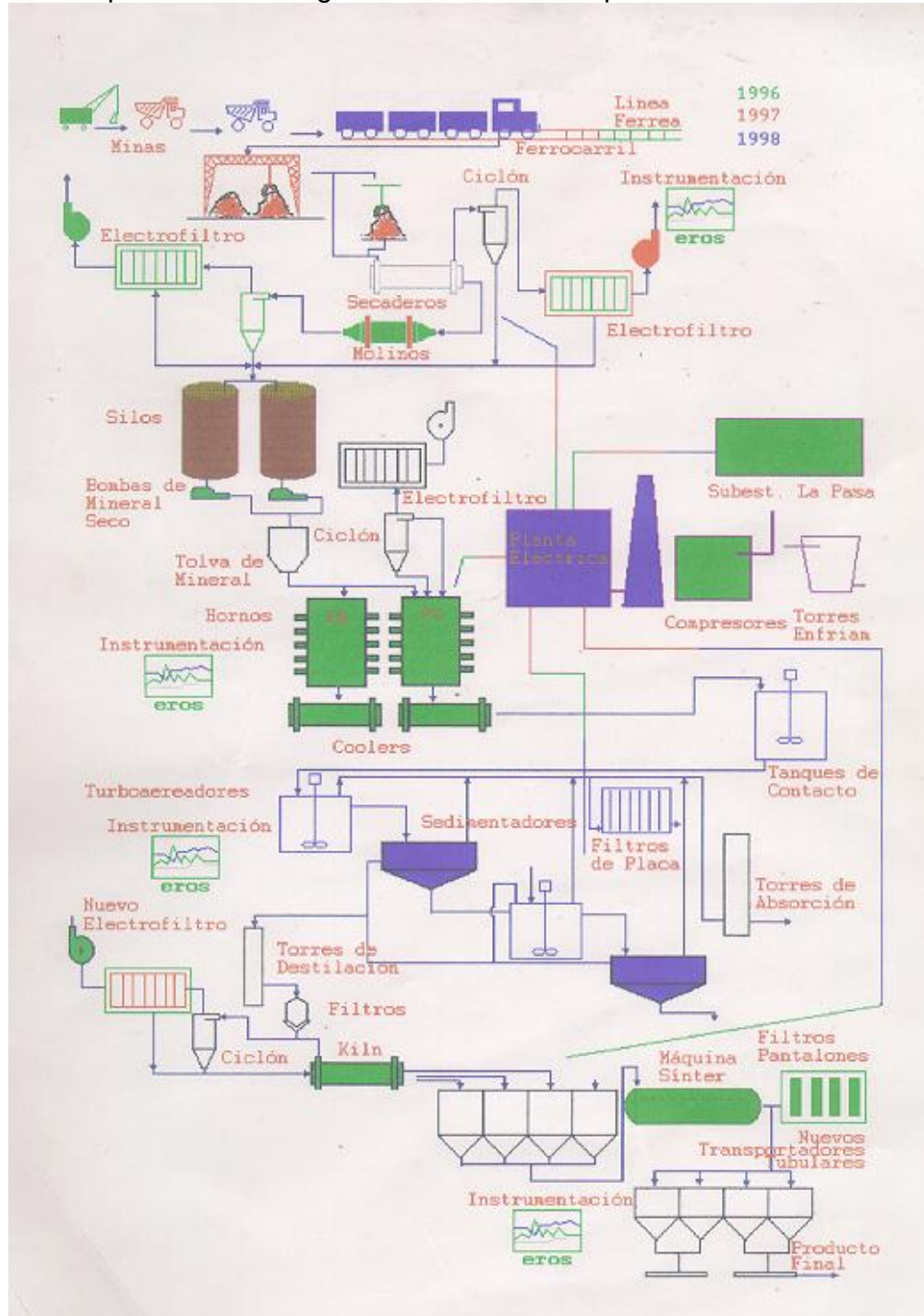
19. Schneider Electric [s.l]. *Variadores de velocidad Altivar 71*. 2005.
20. Spitzer, David W. (1990). *Variable Speed Drives*. Instrument Society of America. ISBN 1-55617-242-7.
21. Yaskawa [s.l]. *inversor F7*. [s.a].
22. Voldek, A. *Máquinas eléctricas*. Tomo II.
23. <http://www.afinidadelectrica.com.ar>
24. <http://html.rincondelvago.com/variadores-de-velocidad.html>
25. <http://www.schneider-electric.com>.
26. <http://www.wikipedia.com>
27. <http://www.google.com>.



## Anexos

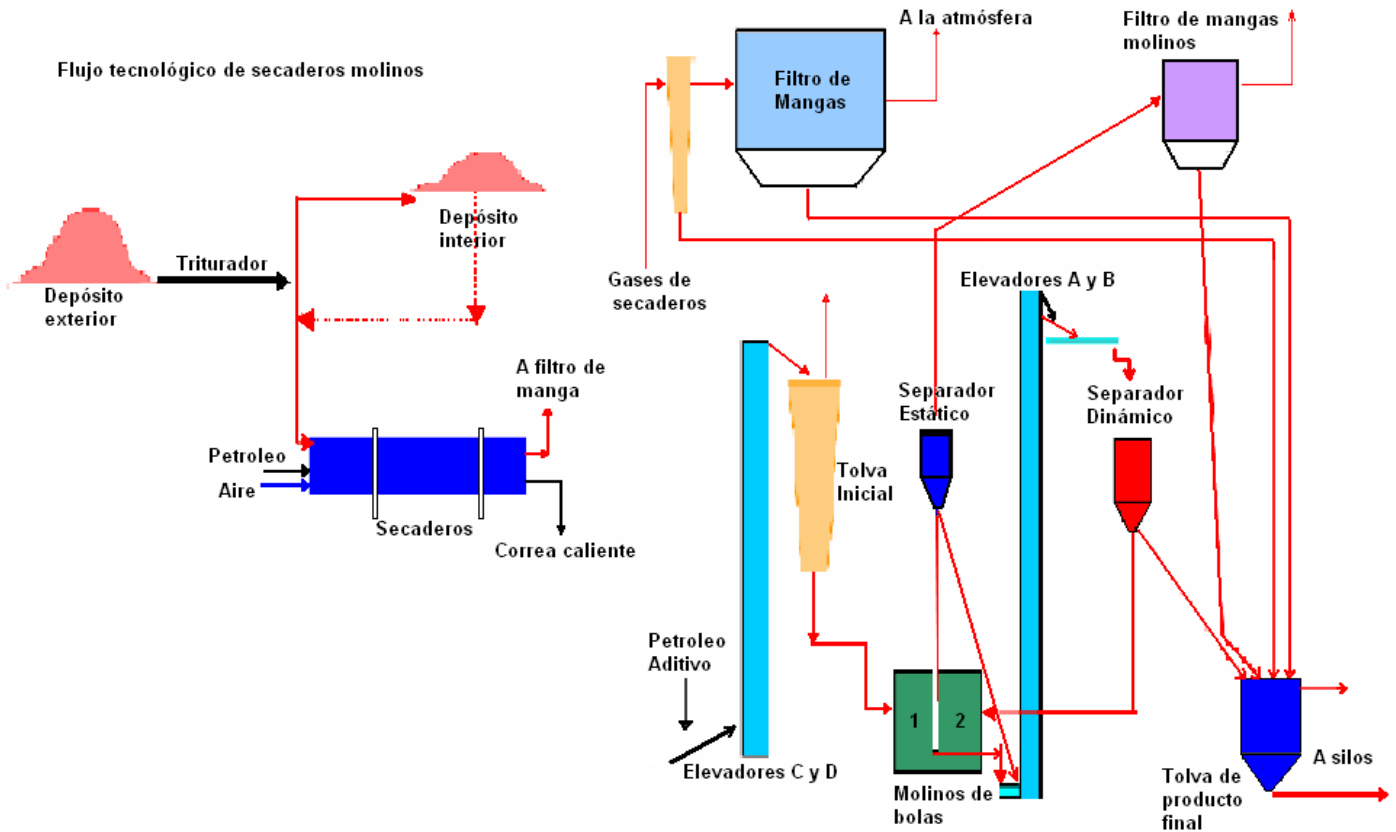
### ANEXO 1

Esquema del proceso tecnológico de la fábrica completa.



### ANEXO 2

Esquema del proceso tecnológico de la planta de secaderos y molinos.



### ANEXO 3

Figuras de comparación entre un motor alimentado en directo y uno alimentado por variador de frecuencia.

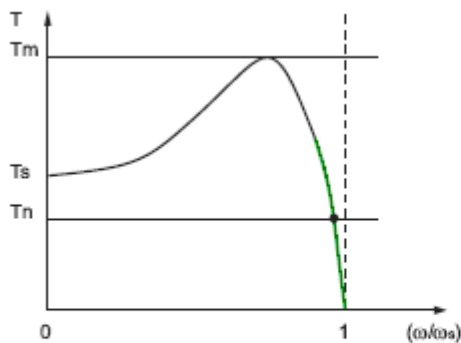


Fig. 2: Diagrama par-velocidad de un motor alimentado en directo. La zona de funcionamiento del motor en el plano par-velocidad está limitada a la parte verde de la curva.

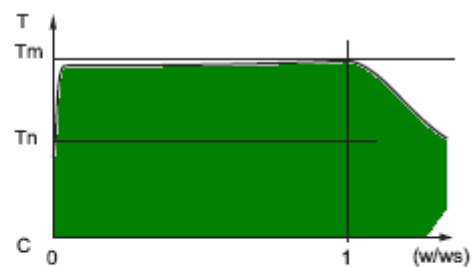
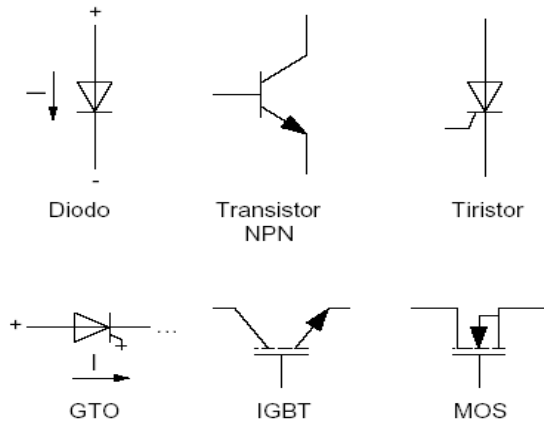


Fig. 3: Diagrama par-velocidad de un motor alimentado por convertidor de frecuencia. Aquí la zona de funcionamiento del motor en el plano par-velocidad está representada en verde.

### ANEXO 4

Los componentes de potencia



### ANEXO 5

Motores eléctricos operados por variadores de velocidad en la planta de secaderos y molinos.

EQUIPOS	Fabricante o País	Motor		Corriente		Potencia		Un V	In A	Veloc r.p.m	m Fase	Cos φ F.P
		Asin	Sin	CA	CD	KW	HP					
<b>Grúa India # 1</b>												
Traslación del Puente	SIEMENS	X		X		8,6		440 - Δ	17,4	885	3	0,73
Traslación del Puente	SIEMENS	X		X		8,6		440 - Δ	17,4	885	3	0,73
Traslación del Puente	SIEMENS	X		X		8,6		440 - Δ	17,4	885	3	0,73
Traslación del Puente	SIEMENS	X		X		8,6		440 - Δ	17,4	885	3	0,73
Traslación del Puente	SIEMENS	X		X		8,6		440 - Δ	17,4	885	3	0,73
Traslación del Puente	SIEMENS	X		X		8,6		440 - Δ	17,4	885	3	0,73
Traslación del Puente	SIEMENS	X		X		8,6		440 - Δ	17,4	885	3	0,73
Peso	SIEMENS	X		X		200		440 - Δ	340	1786	3	0,88
Cierre	SIEMENS	X		X		200		440 - Δ	340	1786	3	0,88
Traslación del Carro	SIEMENS	X		X		26.5		440- Δ	44.5	1175	3	0,82
Traslación del Carro	SIEMENS	X		X		26.5		440- Δ	44.5	1175	3	0,82
Traslación del Carro	SIEMENS	X		X		26.5		440- Δ	44.5	1175	3	0,82
Traslación del Carro	SIEMENS	X		X		26.5		440- Δ	44,5	1175	3	0,82

Nota: Las grúas 1, 3 y 4 tienen los mismos datos.





**Grúa GH # 1**

Puente	SIEMENS	X	X	15	440- Y	26,5	3000	3	0,88
Puente	SIEMENS	X	X	15	440- Y	26,5	3000	3	0,88
Puente	SIEMENS	X	X	15	440- Y	26,5	3000	3	0,88
Puente	SIEMENS	X	X	15	440- Y	26,5	3000	3	0,88
Peso	SIEMENS	X	X	90	440- Y	140	1500	3	0,88
Cierre	SIEMENS	X	X	90	440- Y	140	1500	3	0,88
Carro	SIEMENS	X	X	7,5	440- Y	13,7	3000	3	0,88
Carro	SIEMENS	X	X	7,5	440- Y	13,7	3000	3	0,88

Nota: Las grúas 1 y 2 tienen los mismos datos.

**Alimentador Secadero**

Alim. Secadero AS # 1	HELMKE	X	X	22	440- Δ	31	1176	3	0,8
Alim. Secadero AS # 2	HELMKE	X	X	22	440- Δ	31	1176	3	0,8
Alim. Secadero AS # 3	HELMKE	X	X	22	440- Δ	31	1176	3	0,8
Alim. Secadero AS # 4	HELMKE	X	X	22	440- Δ	31	1176	3	0,8
Alim. Secadero AS # 5	USA	X	X	22	440- Y	25,9	1762	3	0,79
Alim. Secadero AS # 6	USA	X	X	22	440- Y	70	1800	3	0,75
Alim. Secadero AS # 7	USA	X	X	22	440- Y	25	1765	3	0,75

**Separadores Dinámicos**

Sepol "A"	SIEMENS	X	X	184	440- Δ	290	1785	3	0,87
Sepol "B"	SIEMENS	X	X	184	440- Δ	290	1785	3	0,87

**ANEXO 6**

Secciones del catálogo del variador Yaskawa por el cual se realizó la selección.

Tabla i.3 Especificaciones de los inversores de 480 VCA

	Modelo CIMR-F7U	40P4	10P7	41P5	42P2	43P7	44P0	45P5	47P5	4011	4015	4018	4022
Trabajo pesado	Potencia nominal de salida*2 (kVA)	1.4	1.6	2.8	4.0	5.8	6.6	9.5	13.0	18.0	24.0	30.0	34.0
	Potencia H.P.*1,2,3	0.5/0.75	1	1.5/2	3	5	-	7.5	10	15	20	25	30
	Corriente nominal de salida*2 (A)	1.8	2.1	3.7	5.3	7.6	8.7	12.5	17.0	24.0	31.0	39.0	45.0
	Capacidad de Sobrecarga	150 % de la corriente nominal de salida para 60 segundos											
	Límite de la corriente*2	150% de la corriente nominal de salida											
Frecuencia portadora*2	2kHz												
Frecuencia máxima de Salida	300.0Hz												



Modelo CIMR-F7U	4030	4037	4045	4055	4075	4090	4110	4132	4160	4185	4220	4300
Potencia nominal de salida*2 (kVA)	46.0	57.0	69.0	85.0	110.0	140.0	160.0	200.0	230.0	280.0	390.0	510.0
Potencia H.P.*1,2,3	40	50	60	75	100	125/150	-	200	250	300	350/400	450/500+
Corriente nominal de salida*2 (A)	60.0	75.0	91.0	112.0	150.0	180.0	216.0	260.0	304.0	370.0	506.0	675.0
Capacidad de Sobrecarga	150 % de la corriente nominal de salida para 60 segundos											
Límite de la corriente*2	150% de la corriente nominal de salida											
Frecuencia portadora*2	2kHz											
Frecuencia máxima de Salida	300.0Hz											

## ANEXO 7

Sección del catálogo del variador Altivar 71 por el cual se realizó la selección.

Motor		Red				Altivar 71			Referencia	Peso
Potencia indicada en la placa (1)		Corriente de línea (2)		Potencia aparente	Icc línea presumible máx.	Corriente máxima permanente (1)	Corriente transitoria máx. durante			
kW	HP	380 V	480 V	380 V	kA	A	60 s	2 s		kg
<b>Tensión de alimentación trifásica: 380...480 V 50/60 Hz</b>										
0,75	1	3,7	3	2,4	5	2,3	3,5	3,8	ATV 71H075N4 (3) (4)	3,000
1,5	2	5,8	5,3	3,8	5	4,1	6,2	6,8	ATV 71HU15N4 (3) (4)	3,000
2,2	3	8,2	7,1	5,4	5	5,8	8,7	9,6	ATV 71HU22N4 (3) (4)	3,000
3	-	10,7	9	7	5	7,8	11,7	12,9	ATV 71HU30N4 (3) (4)	4,000
4	5	14,1	11,5	9,3	5	10,5	15,8	17,3	ATV 71HU40N4 (3) (4)	4,000
5,5	7,5	20,3	17	13,4	22	14,3	21,5	23,6	ATV 71HU55N4 (3) (4)	5,500
7,5	10	27	22,2	17,8	22	17,6	26,4	29	ATV 71HU75N4 (3) (4)	5,500
11	15	36,6	30	24,1	22	27,7	41,6	45,7	ATV 71HD11N4 (3) (4)	7,000
15	20	48	39	31,6	22	33	49,5	54,5	ATV 71HD15N4 (3) (4)	9,000
18,5	25	45,5	37,5	29,9	22	41	61,5	67,7	ATV 71HD18N4 (3)	9,000
22	30	50	42	32,9	22	48	72	79,2	ATV 71HD22N4 (3)	19,000
30	40	66	56	43,4	22	66	99	109	ATV 71HD30N4 (3)	26,000
37	50	84	69	55,3	22	79	118,5	130	ATV 71HD37N4 (3)	26,000
45	60	104	85	68,5	22	94	141	155	ATV 71HD45N4 (3)	44,000
55	75	120	101	79	22	116	174	191	ATV 71HD55N4 (3)	44,000
75	100	167	137	109,9	22	160	240	264	ATV 71HD75N4 (3)	44,000
90	125	166	134	109,3	35	179	269	295	ATV 71HD90N4 (5) (6)	60,000
110	150	202	163	133	35	215	323	355	ATV 71HC11N4 (5) (6)	74,000
132	200	239	192	157,3	35	259	388	427	ATV 71HC13N4 (5) (6)	80,000
160	250	289	233	190,2	50	314	471	518	ATV 71HC16N4 (5) (6)	110,000
200	300	357	286	235	50	387	580	638	ATV 71HC20N4 (5) (6)	140,000
220	350	396	320	260,6	50	427	640	704	ATV 71HC25N4 (5) (6)	140,000
250	400	444	357	292,2	50	481	721	793		
280	450	494	396	325,1	50	550	825	907	ATV 71HC28N4 (5) (6)	140,000
315	500	555	444	365,3	50	616	924	1016	ATV 71HC31N4 (5) (6)	215,000
355	-	637	512	419,3	50	671	1006	1107	ATV 71HC40N4 (5) (6)	225,000
400	600	709	568	466,6	50	759	1138	1252		
500	700	876	699	576,6	50	941	1411	1552	ATV 71HC50N4 (5) (6)	300,000



### ANEXO 8

Sección del documento del cual se sacaron los precios de los variadores Altivar 71.

POS	DESCRIPCIÓN	Referencia	UM	CANT.	PRECIO UNIDAD EUROS	IMPORTE TOTAL EUROS
1	Variador de frecuencia Telemecanique ATV71, 250KW, 440, 60Hz, ref. ATV71HC25N4	TEE	u	1	15.541,23	<b>15.541,23</b>
2	Variador de frecuencia Telemecanique ATV71, 220KW, 440, 60Hz, ref. ATV71HC25N4	TEE	u	1	14.070,40	<b>14.070,40</b>
3	Variador de frecuencia Telemecanique ATV71, 200KW, 440, 60Hz, ref. ATV71HC20N4	TEE	u	1	13.140,37	<b>13.140,37</b>
4	Variador de frecuencia Telemecanique ATV71, 132KW, 440, 60Hz, ref. ATV71HC13N4	TEE	u	1	11.123,84	<b>11.123,84</b>
5	Variador de frecuencia Telemecanique ATV71, 110KW, 440, 60Hz, ref. ATV71HC11N4	TEE	u	1	7.421,87	<b>7.421,87</b>
6	Variador de frecuencia Telemecanique ATV71, 75KW, 440, 60Hz, ref. ATV71HD75N4	TEE	u	1	6.639,36	<b>6.639,36</b>
7	Variador de frecuencia Telemecanique ATV71, 37KW, 440, 60Hz, ref. ATV71HD37N4	TEE	u	1	4.565,26	<b>4.565,26</b>
8	Variador de frecuencia Telemecanique ATV71, 30KW, 440, 60Hz, ref. ATV71HD30N4	TEE	u	1	3.790,10	<b>3.790,10</b>
9	Variador de frecuencia Telemecanique ATV71, 22KW, 440, 60Hz, ref. ATV71HD22N4	TEE	u	1	2.309,96	<b>2.309,96</b>
10	Variador de frecuencia Telemecanique ATV71, 18,5KW, 440, 60Hz, ref. ATV71HD18N4	TEE	u	1	1.754,68	<b>1.754,68</b>



## ANEXO 9

Vista exterior del variador Altivar 71 que se están empleando en la planta de secaderos de la Empresa Cmdte. René Ramos Latour.

