



REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA
“Dr. ANTONIO NUÑEZ JIMENEZ”

Racionalización del consumo de energía eléctrica en las escaleras mecánicas del Metro de Caracas.

Tesis presentada en opción al Título Académico de Master en

Electromecánica

Autor: Ing. David Linarez Castillo

Tutores: Dr. C. Reynaldo Laborde Brown

Dr. C. Luis Delfín Rojas Purón

Caracas, 2010

| INDICE | | |
|--|--|-------------|
| N_{ro} | DESCRIPCIÓN | Pág. |
| | INTRODUCCIÓN | 6 |
| CAPITULO I – MARCO TEORICO - CONCEPTUAL | | |
| | Introducción al capítulo | 6 |
| 1.1 | Estado del arte | 12 |
| 1.2 | Fundamentación teórica | 20 |
| 1.2.1 | La escalera mecánica | 20 |
| 1.2.2 | Fundamentos básicos del control de la velocidad por variación de la frecuencia. | 21 |
| 1.2.3 | Control de la velocidad de una carga de momento constante. | 25 |
| 1.2.4 | Control de la velocidad de una carga de momento variable. | 29 |
| 1.2.5 | Comportamiento del motor de inducción trifásico alimentado por tensiones no sinusoidales. | 31 |
| 1.2.6 | Comportamiento del motor de inducción trifásico alimentado por tensiones no sinusoidales. | 41 |
| 1.2.7 | Consideraciones especiales en el diseño y utilización de motores de inducción para variadores de velocidad por frecuencia. | 45 |
| | Conclusiones del Capítulo I. | 48 |
| CAPITULO II – MATERIALES Y METODOS | | |
| | Introducción | 50 |
| 2.1 | Caracterización general del Metro de Caracas. | 50 |
| 2.2 | Caracterización de las escaleras mecánicas objeto de estudio. | 56 |
| 2.3 | Caracterización de las estaciones. | 61 |
| 2.4 | Planificación del trabajo experimental. | 62 |

| | | |
|---|---|----|
| 2.5 | Características de los equipos de medición empleados. | 63 |
| | Conclusiones del Capítulo II | 64 |
| CAPITULO III – RESULTADOS Y DISCUSION. | | |
| | Introducción | 65 |
| 3.1 | Comportamiento de las corrientes, tensiones y potencias en los accionamientos de las escaleras objeto de estudio. | 65 |
| 3.1.1 | Escaleras de la estación Mamera. | 65 |
| 3.1.2 | Escaleras de la estación Cortijos. | 66 |
| 3.1.3 | Escaleras de la estación Altamira. | 73 |
| 3.1.4 | Escaleras de la estación Miranda. | 75 |
| 3.1.5 | Escaleras de la Estación Capuchinos | 77 |
| 3.2 | Evaluación de la efectividad de los variadores de frecuencia. | 80 |
| 3.3 | Valoración económica | 89 |
| | Conclusiones generales. | 90 |
| | Recomendaciones | 91 |
| | Referencias Bibliográfica | 92 |
| | Anexo I | |
| | Anexo II | |
| | Anexo III | |
| | Anexo IV | |
| | Anexo V | |

Resumen

Con el presente trabajo se persigue evaluar el impacto que produce sobre la racionalización del consumo de energía eléctrica, la introducción de variadores de frecuencia en estas escaleras. El trabajo se fundamenta en un muestreo de las corrientes, tensiones, potencias y otras magnitudes eléctricas de ocho escaleras que fueron seleccionados de forma aleatoria en varias estaciones del Metro. Los resultados obtenidos evidencian la efectividad de los variadores de frecuencia desde el punto de vista energético, aunque no en todos los casos se logra el mismo impacto.

Abstract

This paper aims to study the energy performance of modernized escalators or reloaded and the impact that the introduction of modern technologies such as frequency converter for energy save in the escalators of the Caracas Metro. Measurement of currents, voltages, powers and others electric magnitudes are carried out in a group of escalators previously selected in a random way. Obtain results, show the effectivity of frequency converters since the energy point of view, although not in all the cases impact is the same.

INTRODUCCION

Anualmente la humanidad produce más de 3 600 millones de toneladas equivalentes de petróleo (Mept), 2.400 Mpet de carbón, 2,300 Mept de gas natural, 610 Mept de energía nuclear, 950 Mept de biomasa, 590 Mept de hidroeléctrica y cantidades relativamente pequeñas de geotérmica, solar y eólica. Como se observa, la mayor parte de la energía proviene de fuentes no renovables que por estar agotándose, cada día cuestan más. El 60 % de esta energía es consumida de manera desmedida por los países más industrializados, donde vive el 15 % de la población mundial. En el mundo se ha producido un agotamiento de los combustibles fósiles debido fundamentalmente al consumo desmedido de los países altamente industrializados. Los combustibles fósiles seguirán siendo las fuentes primarias de energía, conformando más del 90% del aumento de la demanda mundial.

Se necesita mucha más electricidad para potenciar el desarrollo y la misma crecerá más rápidamente que cualquier otra fuente de energía de uso final, a razón de un 2,4 % por año. La demanda mundial de electricidad se duplicará en el año 2030 con relación a la del año 2002 y su parte en el consumo energético final alcanzará el 22 % (OIEA). En el presente es del 19 %. De ahí la importancia que tiene el ahorro de energía en la actualidad.

En Venezuela, la principal fuente de energía es el petróleo. Posee una de las mayores reservas del mundo y es el quinto exportador del planeta. También es uno de los países con mayores reservas de gas y carbón. Además es uno de los países latinoamericanos que más produce energía mediante la hidroelectricidad. A pesar de tantos recursos el Estado venezolano está convencido de la necesidad de multiplicar los esfuerzos para hacer un uso más racional de estos recursos y junto a otros países ha emprendido el camino de la llamada

revolución energética, en aras de las mejoras de la economía y de la sustentabilidad de su desarrollo, en medio de los profundos cambios climáticos que sufre el planeta, que en particular se han manifestado en una aguda sequía; la más intensa desde el año 1963, que ha afectado seriamente los niveles de la represa Guri, elemento clave para la producción de energía eléctrica en el SEN venezolano.

El 70% de la electricidad que usa el país (9870 MW) la genera CORPOELEC EDELCA a través de sus centrales hidroeléctricas gracias al río Caroni, aún cuando su potencia promedio es de 7500 MW.

Solamente Guri genera 6200 MW, es decir, el 63% de toda esa energía. El 30% la genera el resto de las empresas de CORPOELEC.

En los últimos años la demanda de electricidades ha incrementado en mas de 4000 MW y la tendencia es que siga aumentando de acuerdo al crecimiento social y económico del país.

Para la solución de estos problemas, el estado invierte 1.000 millones de dólares, que estarán destinados a financiar 59 proyectos de generación y distribución eléctrica y 50 obras de operación y mantenimiento. Dentro de los factores que han golpeado duro, el del derroche ha sido el destacado por el ministro de Energía Eléctrica. Éste ha mencionado que, del programa para ahorrar energía, sólo se ha llegado a dejar de consumir un 4% y no el 20% que se esperaba.

Como medidas para solucionar estos problemas, en el sector público, el Gobierno decretó una reducción a cinco horas diarias de la jornada laboral y cortes programados en todo el país. Asimismo, la ya conocida franja horaria, podría ser movida adelantándose una hora. Esto se realizaría para aprovechar mejor la luz solar.

Entre las medidas tomadas para contrarrestar esta crisis destacan la interrupción periódica del suministro eléctrico en todo el país, excepto en Caracas; penalizaciones económicas para los usuarios que no cumplan con metas de reducción de consumo; la paralización de actividades de diversas industrias de alto consumo; la creación de un ministerio de energía eléctrica, la siembra de nubes sobre el embalse de Guri y sus afluentes; la instalación y

reactivación de centrales termoeléctricas; así como diversas campañas mediáticas llamando al ahorro de la energía eléctrica y el consumo de agua.

, a través de exoneración de pago de impuestos y el suministro de combustible.

La capacidad de generación eléctrica de Venezuela es en la actualidad de 4.299 megavatios.

El consumo eléctrico venezolano es de "4.175 KW/hora por habitante, de los más altos de "Latinoamérica ".

La tasa de crecimiento interanual de la demanda nacional ha sido entre 6 y 8 por ciento en los últimos años.

De acuerdo con la consulta realizada en el sitio Web www.CIRCUTOR; la opción eficiencia energética aparece como uno de los medios más eficaces, desde el punto de vista técnico, ambiental, social y económico, para contribuir a la solución de los problemas del sector eléctrico de los países de América Latina y el Caribe en el futuro cercano.

Se pueden describir tres tipos de medidas de conservación de energía.

El primer tipo es el recorte, es decir, prescindir del uso de energía.

El segundo tipo es la reforma, que consiste en cambiar los hábitos de vida y la forma de producción de bienes y servicios.

El tercer tipo de medidas implica un uso más eficiente de la energía para adaptarse a su mayor coste. Esta última alternativa es más fácil de aceptar para los gobiernos y la sociedad en general.

Es por todo lo anteriormente planteado que la Compañía Metro de Caracas ha estado incorporando en sus escaleras, las repotenciadas o la de nueva aplicación en las recientes líneas expandidas la introducción de tecnología de punta entre las que tenemos los variadores de frecuencia, para el sistema de tracción con el objetivo de lograr más eficiencia, en su sistema de tracción (motor) que consiste mayormente en reducir la velocidad de desplazamiento de las escaleras sin la presencia de usuario, y cuando los

usuario van a abordar la escalera ésta aumenta su velocidad de operación. Lográndose un ahorro energético según fabricante de 20 a 30% de energía.

Si tomamos en cuenta, que más del 60 % de la energía total que se consume en la industria [Leonhard, 1995] [Cleland y Turner, 1996] es a costa de los accionamientos eléctricos con motores de inducción y se estima que más del 20 % de la energía que se puede ahorrar está asociada con el mejoramiento del rendimiento en los motores y los de suministros eléctricos [Hopkins y Lynch, 2000]; entonces tiene importancia atender cualquier medida que técnicamente se justifique y contribuya a mejorar los índices de rendimientos de estos sistemas.

El transporte ferroviario venezolano está inmerso en un creciente y constante ascenso, que demanda cada vez más un apreciable consumo de energía cuyos portadores deciden la rentabilidad de esta empresa, que está entre las más grandes consumidores de energía eléctrica del país. El metro de Caracas forma parte de este sistema, en el cual se dan pasos firmes en pos del ahorro energético. Uno de estos pasos lo constituye la remodelación de las escaleras mecánicas, donde uno de los elementos distintivos de dicha remodelación es la introducción de convertidores de frecuencia en los accionamientos para reducir la velocidad de las escaleras cuando estas funcionan sin la presencia de pasajeros. Esta medida ha sido aplicada en el 17 % de todas las escaleras del Metro.

Situación problemática.

La introducción de los variadores de frecuencia en un grupo de escaleras mecánicas no ha sido acompañada de un estudio para determinar el impacto energético de los mismos, por lo tanto, existe incertidumbre acerca de la conveniencia o no desde los puntos de vistas técnico y económico de continuar con la introducción de los convertidores de frecuencia en el resto de las escaleras del Metro

Problema.

Insuficiente conocimiento sobre el impacto energético de los variadores de frecuencia en las escaleras mecánicas del Metro de Caracas

Objetivo.

Evaluar el impacto energético de los variadores de frecuencia que han sido introducidos en las escaleras mecánicas modernizadas del Metro de Caracas

Objetivos específicos.

1. Lograr el acopio de información actualizada sobre el comportamiento de las corrientes, tensiones y potencias en los accionamientos de las escaleras mecánicas modernizadas del Metro de Caracas.
2. Determinar el rango posible de ahorro de energía que puede lograrse en las escaleras mecánicas del Metro con la introducción de los convertidores de frecuencia.

Objeto de estudio

Las escaleras mecánicas del Metro de Caracas.

Campo de acción.

Eficiencia energética de los accionamientos eléctricos de las escaleras modernizadas del Metro de Caracas

Hipótesis.

Si se evalúan las magnitudes eléctricas que caracterizan el funcionamiento de los accionamientos de las escaleras mecánicas, en el Metro de Caracas, el tiempo de trabajo de las escaleras sin presencia de usuarios, la ubicación de las escaleras dentro de las estaciones y la ubicación geográfica de estas últimas, entonces es posible emitir un criterio fundamentado sobre el impacto energético de los variadores de frecuencia.

Tareas

1. Medición y registro de las principales magnitudes eléctricas en el sistema de alimentación de las escaleras.
2. Caracterización del sistema de alimentación eléctrico de las escaleras y de los accionamientos.
3. Evaluación del tiempo de trabajo de los convertidores de frecuencia.
4. Valoración económica

Capítulo I. Marco Teórico.

Introducción

En este capítulo se desarrolla la investigación bibliográfica del tema, haciendo mención, de algunos tópicos, que se relacionen con la temática planteada de las escaleras mecánicas del metro de caracas.

1.1 Estado del arte de la investigación

Se estima que más del 60% de la energía eléctrica generada en el mundo es consumida por las máquinas eléctricas [Leonhard, 1995]; y el mejoramiento de la eficiencia en los accionamientos eléctricos es importante, principalmente por dos razones: efecto económico y reducción del impacto medio ambiental.

Tal como hemos planteado, se estima que por lo menos el 20 % del ahorro de energía está en el mejoramiento de los rendimientos de los motores y sistemas eléctricos, el otro 80 % puede ser tomado de cada una de las partes del accionamiento eléctrico, incluyendo sus cargas mecánicas y el propio proceso.

Los motores de inducción tienen una elevada eficiencia cuando operan con sus cargas y torques nominales [Bodson, 1994]. Así mismo operando con cargas ligeras, las pérdidas del hierro se incrementan dramáticamente, reduciendo considerablemente la eficiencia [Kusko y Galler, 1983].

Gran parte de las aplicaciones de los motores de inducción corresponden a bombas, ventiladores y compresores; en la mayoría de estas aplicaciones, los motores operan significativamente por debajo de sus valores nominales de carga; el voltaje aplicado al

estator, crea un campo magnético rotatorio que induce corrientes en el rotor, generándose par en el eje; si no se requiere el par nominal, el máximo campo magnético tampoco se requerirá; la corriente que produce el campo magnético adicional aumenta las pérdidas por efecto Joule en las resistencias, disminuyendo el rendimiento del motor. En muchos complejos industriales, los motores de inducción son controlados mediante convertidores de frecuencia con la técnica de control U/f, la cual se basa en el mantenimiento de una relación Volts-Hertz (U/f) apropiada para la demanda de par exigido por la carga; estos accionamientos tienen flexibilidad de configuración para adaptarse a las necesidades de la carga pudiendo el usuario especificar la curva U/f deseada. Sin embargo, la mayoría de las veces no se conocen los criterios prácticos de ajuste de la curva U/f, lo que no permite explotar al máximo las posibilidades del accionamiento. En el control óptimo de motores de inducción uno de los problemas que se ha considerado es el de maximizar el rendimiento (Ramírez, 1998); éste se obtiene minimizando la energía consumida por la máquina.

La mejora del rendimiento de los accionamientos para bombas se ha tratado por varios especialistas entre ellos D.A. Jarc et. J.D. Robeck (1982), los cuales muestran como con el uso de un accionamiento a velocidad variable por control de flujo magnético, a cambio de velocidad constante y válvula de estrangulación, permite mejoras en el consumo de energía; la mejora se obtiene en el aumento del rendimiento de la bomba; para la mejora del rendimiento del motor en régimen estacionario varios autores han buscado los puntos de operación óptimos por diferentes técnicas; D.S. Kirschen et. al (1985) propusieron un método heurístico para variar el flujo en línea, buscando disminuir la potencia total de entrada para controles de tipo vectorial; P. Famouri et. al (1991) utilizan las ideas de Kirschen para obtener el deslizamiento óptimo para un control U/f; se obtienen, experimentalmente, los deslizamientos óptimos para diferentes puntos de operación en controles U/f; otros autores han atacado el problema de manera analítica; A. Kusko et. D. Galler (1983) calculan el deslizamiento óptimo que minimiza las pérdidas por efecto Joule de la máquina; S.I. Seleme Jr. et. C. Canudas de Wit (1992) consideran adicionalmente la energía magnética almacenada en las inductancias; García et. al. (1992) consideraron adicionalmente las pérdidas en el núcleo.

La mayoría de los algoritmos heurísticos fueron validados en bancos de prueba de laboratorio; estos algoritmos resultan relativamente complejos para su aplicación en un accionamiento para transporte de usuarios con control U/f; aunque algunos de los resultados teóricos son relativamente simples de implementar, no se conocen reportes de su aplicación en accionamientos eléctricos regulados de escaleras mecánicas. La mayor parte de los trabajos en busca del mejoramiento de la eficiencia del motor de inducción basan sus razonamientos sobre el estudio de sus principales pérdidas, las cuales están usualmente comprendidas dentro de cinco componentes: las pérdidas del cobre del estator, las pérdidas del cobre del rotor, las pérdidas en el hierro, las pérdidas mecánicas y las pérdidas adicionales. El mejoramiento ha sido obtenido mediante el balance entre las pérdidas del cobre y el hierro de la máquina manteniendo constante el flujo. En esto se ha llegado establecer una estrategia de control de pérdidas en base un analizador óptimo de energía que opera bajo el principio de adecuar la curva de magnetización del motor con el nivel de la carga mecánica, mediante el manejo escalar del accionamiento [Abrahamsen, 2000]. Parece más completo llevar acabo este propósito con un enfoque vectorial del algoritmo, y que atienda de manera combinacional el modelo de pérdidas.

Resulta meritorio los trabajos aportados por P. Van Roy, B. Slaets y Ronnie Belmans, en ICEM-2000, en cuanto a detectar el grado de imprecisiones que contienen las diferentes normas (IEC, IEEE, NEMA, JEC) para establecer standars de rendimientos. Ellos concluyen que para motores de una misma capacidad y tipo, la diferencia puede llegar a ser de hasta de un 2 % de la potencia de entrada en la determinación de las pérdidas adicionales de la máquina, y el rendimiento con carga parcial es tan importante como a plena carga con respecto a la energía consumida. La distorsión de los armónicos puede llegar a ser de hasta un 30 % sin cargas.

En cuanto a los métodos y cálculo del rendimiento en los diferentes motores eléctricos John S. Hsu y otros, en 1998 ofrecen un detallado estudio en el que explican ocho formas diferentes de evaluar el rendimiento en estas máquinas, desde la inclusión de las pérdidas mediante el uso de un circuito equivalente, el método estadístico, el método de la medición de la corriente, del deslizamiento y hasta el método del torque en el entrehierro que permite conocer las asimetrías y contenidos de armónicos desde el sistema.

Si observamos algunos estudios realizados en la eficiencia de los motores eléctricos atendiendo al costo desde su etapa de diseño y montaje, es significativo el hecho de que para entregar motores eléctricos preparados para operar con elevadas eficiencias, se necesita para incrementos desde un 92 % a un 95,5 % un costo productivo desde 1000 a 8000 USD, con gastos en inversiones de hasta 2,8 USD por cada KW [Appelbaum, Khan y Fuch, 1987], y entre más grandes son las máquinas mayor es su costo, tal como se ve en las figura 1.3 (Figura 10 pag 421, Appelbaum). Se establecen correlaciones en las que se incluyen $\eta_{\max} = f(\text{costos (USD)})$, $\eta_{\max} = f(\text{Cos } \varphi)$, $\eta_{\max} = f(\Delta p)$, así cómo los efectos del cambio de voltaje en el rendimiento y el factor de potencia.

El uso de modelos difusos

La implementación de modelos difusos en el motor de inducción es una técnica notable para extraer el máximo comportamiento de los motores eléctricos modernos. [Cleland y Turner, 1996].

La aplicación de técnicas difusas se justifica por las ventajas que esta ofrece en los sistemas de accionamientos de velocidad variable utilizando dispositivos avanzados de potencia y medios programables, lo cual ha propiciado el mejoramiento de su control debido a su alta exactitud en la simulación de los procesos complejos, en sistemas no lineales (con algún grado de incertidumbre), así como en aquellos mecanismos que exigen un control optimizado y predictivo en el comportamiento del sistema.

El rendimiento del motor de inducción que opera a velocidad constante puede caer drásticamente cuando se va reduciendo su carga, especialmente por debajo del 50 % de su torque nominal. La regulación del gasto o caudal por estrangulamiento de las válvulas mecánicas en las bombas, ventiladores y compresores no sólo causan pérdidas de potencia en los motores, sino también se incrementan como pérdidas por fricción en estos sistemas.

Para minimizar las pérdidas en el motor es necesario adecuar su velocidad con los requerimientos que exigen las cargas mecánicas. Lo más avanzado, y perfeccionado que se tiene hasta ahora son los Accionamientos de Velocidad Ajustable (AVA), comercialmente llamados variadores de velocidad, que constituyen en sí convertidores de frecuencia o

Inversores Sinusoidales de Voltajes con modulación por ancho de pulsos (VSI to PWM, sus siglas en inglés), aunque también pueden ser modulados por la amplitud de sus pulsos (VSI to PAM); también están los Inversores Sinusoidales de Corrientes (CSI, en inglés).

Esencialmente los AVA operan bajo el principio de rectificar el voltaje alterno de entrada desde la línea de la red, filtrar la señal, y entonces conmutan la potencia de corriente directa mediante válvulas (que hacen de interruptor abierto-cerrado) hacia una sección inversora que devuelve en la entrada de los terminales del motor un voltaje alterno con la misma frecuencia con que se conmutan las válvulas. Un bloque a microprocesador modifica las características de conmutación del inversor de tal forma que satisface los requerimientos exigidos por el proceso. El voltaje o corriente rectificadas es directamente controlado con respecto a la frecuencia.

Con el uso de algoritmos difusos se puede efectuar la dirección del bloque de mando del AVA y analizar el sistema con retroalimentación para combinaciones de voltajes, corrientes y frecuencias que optimizan la eficiencia de la energía consumida.

La implementación de un algoritmo difuso se puede adicionar en el bloque convencional del AVA, y se ha demostrado en EE.UU. que para un mejoramiento de un 1 % del rendimiento en motores eléctricos mayores de 5.6 kW, se consigue un efecto de hasta un 10 % en motores más grandes de 175 kW. [Cleland y Turner, 1996]

Mejoramiento de la eficiencia desde esquemas de control

El rendimiento de los accionamientos de motores eléctricos ha estado enmarcado en función del estudio de las pérdidas en relación con la potencia de entrada del sistema, la velocidad, el torque, el flujo en el entrehierro, la corriente del estator, el factor de potencia y el cálculo por diferentes métodos del rendimiento del motor. [Hsu y otros, 1998] [Slaets, Van Roy y Belmans, 2000]

Usualmente en los accionamientos eléctricos, los motores operan manteniendo el flujo en sus valores nominales o con radio de voltaje / frecuencia (V/Hz) sostenidamente constante para las condiciones de cargas de diseño, ofreciendo un favorable trabajo con respuestas rápidas ante los transitorios del sistema. Pero cuando el accionamiento pasa a trabajar con

cargas más bajas o ligeras, estas aproximaciones causan pérdidas en el núcleo o pérdidas en el hierro que pueden llegar a ser excesivas comparadas con las pérdidas en el cobre de la máquina, comportándose en condiciones de rendimientos mucho menores. Esto significa que poner a trabajar el accionamiento a flujo reducido para elevados rendimientos es deseado para aplicaciones en que no se necesita rápida respuesta en sus procesos transitorios.

Varios esquemas de control de motores eléctricos a lazo abierto y cerrado son implementados basándose en:

- a) Control del deslizamiento del motor
- b) Control del voltaje o corriente mediante una fuente inversora
- c) Control combinado de voltaje y frecuencia
- d) Control vectorial
- e) Control de la perturbación de la velocidad del rotor
- f) Minimización de la potencia de entrada para el máximo rendimiento .

Esencialmente el control se efectúa con la medición de la potencia de entrada P_e (su valor de línea o desde la salida del rectificador), y entonces uno ó más parámetros son variados desde el ajuste del AVA con radio constante de voltaje-frecuencia (V/Hz), con bajos voltajes en proporción con bajas velocidades (rpm); nuestra apreciación está en realizar lo mismo pero con el arreglo de atender mediante el algoritmo, las oscilaciones que aparecen desde la carga mecánica rotacional que ocasionan cambios a veces no cíclicos en el comportamiento de la máquina.

La potencia de entrada es medida otra vez y comparada con un valor previo (usando el bloque difuso) que incluye las relaciones mecánicas dadas por las especificaciones del proceso tecnológico (como velocidad del fluido, densidad, viscosidad, entre otros) y luego

ante otra perturbación se modifica algún parámetro del accionamiento que permita la compensación de esta potencia. El esquema es independiente de los parámetros del sistema y el algoritmo sirve para ser utilizado en cualquier otra aplicación.

Por otra parte se ha avanzado en el estudio de la eficiencia de los accionamientos por la vía de efectuar la dirección del motor de inducción por variación del flujo magnético, usando el control directo del torque, en aras de un menor consumo de corriente del estator con mínima distorsión, muy rápida respuesta del flujo y el torque a los cambios repentinos en los procesos transitorios, pero resulta un poco costosa su implementación, y debe tratarse con mucho cuidado su algoritmo de control porque se altera con facilidad la estabilidad del sistema [Blaabjerg, 2000].

Con este enfoque, es de interés el estudio de las pérdidas considerando el flujo magnético reducido [Moreno Eguilaz y otros, 2001], utilizando técnica de lógica difusa y esquemas adaptivos, el cual parte de un modelo aproximado de pérdidas, y una aproximación basada en mediciones de potencia, donde utiliza un algoritmo que permite encontrar el valor óptimo del flujo [Moreno Eguilaz y otros, 1996] [García y otros, 1994] [Kioskeridis y Margaris, 1996]. Ellos garantizan la estabilidad del accionamiento para las condiciones a mínimo flujo magnético. Nos parece un poco arriesgado el trabajo de la máquina de inducción con mínimo flujo sobre todo para cargas ligeras y altas, donde se exige el desarrollo permanente de un torque elevado.

Zdenek Cerovsky y J. Javurek en 1997 hicieron un estudio del accionamiento con mínimo consumo de la corriente desde el convertidor (fuente inversora sinusoidal), donde exponen un algoritmo a partir de definir las componentes activas y reactivas del torque electromagnético, así como las componentes reales e imaginarias de la impedancia y las corrientes que participan en la creación del flujo magnético.

Por otra parte, durante el trabajo de la máquina de inducción se aprecia como rasgo característico su comportamiento oscilatorio, aspecto motivado por las variaciones de voltajes desde la red, o por los efectos de la energía reactiva de intercambio entre el motor de inducción y la fuente o convertidor de frecuencia. Pero hasta la fecha no se reflejan en los modelos de pérdidas, las incidencias que ocasionan los cambios de magnitudes de los

parámetros del mecanismo y que de forma casi cíclica exigen al motor, es decir, se separa o se excluye en los modelos la sección de carga mecánica rotacional del mecanismo de producción, que una vez puesto en marcha el accionamiento, es éste el que rige de forma permanente el comportamiento de todo el sistema. En tal sentido, los últimos estudios se han centrado en el grupo Convertidor – Motor de Inducción. [Moreno Eguilaz, 1997] [Harnerfors, 1997] [Rezzoug y Razik, 1998] [Abrahamsen, 2000] [Grabowski y Kasmierkowski, 2000], [Vas, 2001], que aunque se han establecido límites en su manipulación [Bergás, 2000], el problema de mantener elevados rendimientos en la transferencia de energía del accionamiento para diferentes niveles y regímenes todavía no está suficientemente resuelto como para estar satisfecho en bases a estos enfoques.

Dentro de varios caminos posibles a recorrer, la evaluación del sistema de accionamiento eléctrico comportándose bajo dos condiciones:

- a) Cuando las oscilaciones del motor de inducción son respuestas a cambios desde la fuente
- b) Cuando las oscilaciones del motor de inducción son respuestas a cambios desde carga mecánica rotacional.

El Motor de Inducción es capaz de reponerse a gran parte de estas oscilaciones, y si son de origen electromagnético y de aceptable intensidad casi siempre las absorbe y las comparte en pequeños transitorios con la red, y este aspecto está contemplado en la fase de diseño de la máquina; pero cuando éstas son más intensas y vienen desde el eje mecánico, por mucho estado inercial que tenga el sistema, al motor le resulta más difícil reponerse a los cambios, y es aquí donde aspiramos profundizar para ampliar la capacidad de respuesta del accionamiento en base a trabajar en zonas de mejores rendimientos.

Estos trabajos se enfocan a la determinación de las pérdidas en estado estático y dinámico del motor de inducción, dentro de las cuales se sitúan restricciones. Todos ellos están enmarcados bajo las condiciones de una máquina de inducción ordinaria operando con frecuencias normalizadas (50 ó 60 Hz).

Aunque de forma empírica se ponen coeficientes dentro de las expresiones analíticas que intervienen en el cálculo de las potencias y dimensiones de las escaleras mecánicas y sus

instalaciones, todavía no es suficiente las especificidades que exigen estos sistemas de transporte, es por esto que adquiere importancia correlacionar todas aquellas variables que inciden de manera sensible en el comportamiento eficiente relacionado con la distribución de la energía que se transfiere desde el Motor hasta el mecanismo.

Todos estos estudios basan su análisis en minimizar las pérdidas de la máquinas de inducción para cargas de tipo ventilador, que con aproximación simulan las condiciones de explotación mecánicas, pero no alcanza tener en cuenta con exactitud los diferentes regímenes de trabajo que exigen las escaleras mecánicas como mecanismos de transporte.

1 2.- Fundamentación teórica.

1 2.1.- La escalera mecánica

Las escaleras mecánicas constituyen uno de los medios más eficientes para el transporte continuo de personas. Se componen de escalones que se desplazan subiendo o bajando sobre la estructura metálica que lo soporta. De esta manera, los usuarios son desplazados de forma cómoda al no tener que moverse, y rápida ya que al caminar sobre las escaleras evidentemente su velocidad será la suma de ambas, la suya propia mas la del mecanismo de la escalera.

Las escaleras mecánicas tienen sus orígenes en escaleras manuales y movidas por tracción animal durante la antigüedad y por mecanismos movidos por maquinas a vapor a principios del siglo XIX.

En 1892, Jesse Reno diseño y patento una rampa inclinada móvil con plataformas curvadas triangulares desplazándose de forma continua sobre una cinta transportadora que cambiaba de dirección mediante dos tambores dispuestos en las partes superior e inferior de la escalera mecánica. Esta escalera se componía de una serie de indentaciones inclinadas que en el inicio presentaba los típicos peines que tenemos hoy en día en toda nuestra escalera mecánica.

A lo largo de los años, las escaleras mecánicas se han ido perfeccionando y desde se han convertido en un medio de transporte vertical, seguro y de gran rendimiento, muy adecuado para transportar gran número de usuarios, entre altura medias, habiendo encontrado su principal aplicación en grandes almacenes, hoteles, edificios de oficinas, estaciones de ferrocarriles interurbanas, metropolitanas, aeropuertos, etc.

Sin embargo a pesar de los años que han transcurrido desde su presentación inicial en el año 1900 hasta la actualidad, el diseño básico de la escalera se ha mantenido prácticamente igual con respecto a ciertos puntos esenciales, como el mecanismo que las impulsa por electricidad, que consiste fundamentalmente de un motor y dos cadenas para activa los pasamanos y el movimiento de los peldaños. Existen las escaleras de peldaños y las escaleras que presentan una superficie uniforme o lisa, y para el caso de las escaleras de peldaños, la inclinación es treinta grados con respecto a la horizontal.

1.2.2.- Accionamiento de la escalera mecánica.

Generalidades sobre el control de velocidad en los accionamientos eléctricos.

Se entiende por control de velocidad al cambio intencional de esta variable en un accionamiento eléctrico, con el objetivo de realizar determinado proceso o cumplir algún requerimiento impuesto al sistema de regulación. El control de velocidad en el sentido en que es estudiado aquí no se lleva a cabo solamente para regular la velocidad como tal, sino también otras coordenadas mecánicas tales como la posición, la aceleración y el momento. Realmente sería más correcto hablar de control de movimiento.

En la selección y diseño de un accionamiento eléctrico de velocidad variable deben tenerse en cuenta, fundamentalmente, los requerimientos impuestos al accionamiento por el mecanismo. Estos requerimientos aunque, en general, pueden ser de índole muy diversa respondiendo a la gran variedad de mecanismos que pueden encontrarse, pueden resumirse en seis indicadores o parámetros fundamentales que sirven también para evaluar cada tipo de variador o sistema de accionamiento eléctrico de velocidad variable. Estos requerimientos son:

- 1- El diapasón de control de la velocidad.
- 2- La gradación del control.

- 3- La exactitud en estado estacionario.
- 4- La calidad de la respuesta transitoria.
- 5- La dirección del control.
- 6- La carga permisible.

Estos son los indicadores técnicos. Existen además indicadores económicos que siempre deben ser evaluados y son, fundamentalmente, dos:

- 1- La inversión inicial.
- 2- El costo de explotación.

A continuación se explicará cada uno de ellos:

- 1- El diapasón de control de la velocidad se determina dividiendo la velocidad máxima de operación necesaria entre la mínima:

$$D = \frac{\omega_{m.max}}{\omega_{m.min}} \quad (1.1)$$

Casi siempre el diapasón se expresa en forma de proporciones tales como 4:1, 20:1, etc.

- 2- La gradación del control indica la cantidad de velocidades estables de operación del método y se expresa cuantitativamente mediante el factor de gradación:

$$K_{gr} = \frac{\omega_{m.n}}{\omega_{m.n-1}} \quad (1.2)$$

Siendo $\omega_{m.n}$ la velocidad en el paso n del control y $\omega_{m.n-1}$ la velocidad en el paso n-1.

Este indicador da idea de lo continuo (suave) o discreto que es un método de control de velocidad.

- 3- La exactitud en estado estacionario se refiere a las variaciones que ocurren en la velocidad ante perturbaciones externas tales como la tensión, la temperatura o la carga mecánica, siendo esta última la más importante de todas, por lo que, generalmente, este indicador se evalúa a través de la denominada rigidez de la característica mecánica a

carga nominal, β_N . La rigidez de la característica mecánica se define, en general, como:

$$\beta = -\frac{dM}{d\omega_m} \quad (1.3)$$

Si la característica es como la 2 de la figura 1.3 el valor de β es igual al inverso de la pendiente de la característica mecánica en cada punto y debe evaluarse para la carga nominal. Si la característica es lineal y descendente, tal como la 1, la rigidez es constante e igual a:

$$\beta = -\frac{M_N}{\Delta\omega_m} = -\frac{M_N}{(\omega_o - \omega_{mN})} \quad (1.4)$$

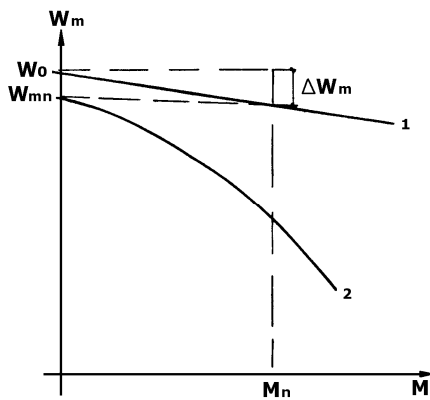


Figura 1.1-Característica Mecánica del Motor en el Accionamiento Eléctrico.

Aunque este parámetro depende de la variación de la velocidad con la carga, no siempre es el mejor para evaluar este indicador, sobre todo cuando el diapasón de control es grande. Para poder apreciar esto se hace referencia a las características de la figura 1.4. En ambas características la rigidez es la misma, sin embargo, la variación de velocidad en la característica 2 es mucho más ostensible ya que de vacío a plena carga se reduce en mucho más de la mitad (el motor casi se detiene). Para tener en cuenta este elemento es mejor evaluar el denominado por ciento de estatismo de la característica, que se define como:

$$\%S = \frac{\omega_o - \omega_{m.n}}{\omega_o} \cdot 100 \quad (1.5)$$

y, si la característica es lineal, de (1.4) y (1.5):

$$\%S = \frac{M_N}{\beta \cdot \omega_o} \cdot 100 \quad (1.6)$$

a mayor por ciento de estatismo peor es la exactitud de la característica. Como se aprecia, el por ciento de estatismo de la característica 2 es mucho mayor.

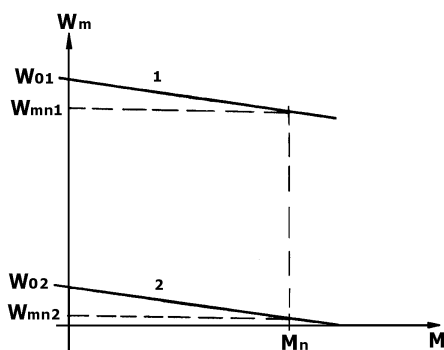


Figura 2.1 - Características de igual rigidez y diferente estatismo.

4- La calidad de la respuesta transitoria se refiere a la forma de la respuesta de la velocidad en función del tiempo cuando varía el comando de control. Esta variación se supone, generalmente, en forma de escalón, aunque para evaluar sistemas de altas prestaciones dinámicas (sistemas de seguimiento) puede ser necesaria otra señal de prueba a la entrada, tal como la rampa. Este indicador tiene dos aspectos a considerar: la rapidez de respuesta y la oscilatoriedad o estabilidad relativa. La rapidez de respuesta se refiere al tiempo en el que se alcanza un nuevo estado estacionario y la estabilidad relativa, al nivel de amplitud de las oscilaciones de la velocidad durante el período transitorio y el tiempo en que ellas se mantienen.

5- La **dirección del control** se refiere a si la velocidad puede variarse por encima, por debajo o en ambos sentidos de la velocidad base, la cual es la correspondiente a la característica mecánica natural en condiciones nominales.

6- La carga permisible se refiere al tipo de carga mecánica que debe ser accionada por el variador de velocidad. Esta clasificación puede hacerse en base a tres criterios:

6.1- Sentido de rotación:

Existen dos tipos de cargas: las no reversibles, que sólo giran en un sentido, y las reversibles, que pueden girar en ambos sentidos.

6.2- Carácter de la carga:

Se dice que es una carga pasiva cuando sólo consume energía del accionamiento eléctrico y que es una carga activa, cuando puede tanto consumir como entregar energía al accionamiento eléctrico. Este es el caso de los mecanismos o cargas sometidos a la acción de la gravedad, tales como las grúas y los ascensores o mecanismos de elevación.

6.3- Relación momento-velocidad. Existen cargas de:

MOMENTO CONSTANTE: $M_c = cte$.

POTENCIA CONSTANTE: $P = M_c \cdot \omega_m = cte$.

Por ejemplo: Un ascensor o elevador es una carga reversible, activa y de momento constante; una bomba centrífuga es una carga no reversible, pasiva y de momento variable.

A veces en este punto se especifica también la aceleración máxima o el momento máximo necesario para obtenerla.

En cuanto a los indicadores económicos, estos son la inversión inicial y el costo de explotación. Existen métodos que permiten, realizando un estudio económico comparativo decidir, por una parte el tipo de variador de velocidad que debe seleccionarse (si esto es necesario, ya que en muchos casos la experiencia indica cual es el mejor) y, por otra,

garantizar la factibilidad técnico económica del proyecto, lo cual siempre debe hacerse independientemente de que se conozca de antemano el tipo de variador a utilizar.

1.2.3. Fundamentos básicos del control de la velocidad por variación de la frecuencia.

Como se sabe, la velocidad sincrónica, en radianes por segundo, del campo magnético giratorio de un motor de inducción trifásico, está dada por:

$$\omega_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{(P/2)} \quad (1.7)$$

donde P es el número de polos del motor.

La velocidad del rotor del motor es ligeramente menor que la sincrónica y está dada por:

$$\omega_m = \omega_s \cdot (1 - s) \quad (1.8)$$

donde s es el deslizamiento del motor que varía generalmente, en condiciones estables de trabajo, entre 0,005 y 0,1.

Quiere decir que si se varía la frecuencia de trabajo del motor de inducción, puede variarse su velocidad de rotación. Para controlar por debajo de la velocidad base debe reducirse la frecuencia f_1 . Ahora bien, recuérdese que la fem inducida en el devanado del estator depende de la frecuencia.

Según la ecuación (1.3): $E_s = 4,44 \cdot f_1 \cdot w_s \cdot K_{devS} \cdot \phi_m$

Por otra parte, del circuito equivalente del motor (figura 1.14) se obtiene que el fasor de la tensión aplicada en el estator por fase, es igual a:

$$\bar{U}_s = \bar{E}_s + j\bar{I}_s \cdot (R_s + jX_s) \quad (1.9)$$

A frecuencias cercanas a la nominal la caída en la impedancia interna del estator es despreciable y puede suponerse aproximadamente igual a la fem:

$$\bar{U}_s \approx \bar{E}_s \quad (1.10)$$

Quiere esto decir que si la frecuencia disminuye y la tensión no varía, el flujo ϕ_m aumenta, provocando la saturación de la máquina y el consiguiente aumento de la corriente magnetizante y las pérdidas del motor a valores inadmisibles. Por lo tanto, es recomendable operar de forma tal que, al reducirse la frecuencia, la tensión se reduzca proporcionalmente, o sea, con la Ley de mando tensión / frecuencia constante:

$$\frac{U_s}{f_1} = K_{u.f} \quad (1.11)$$

Por lo antes expuesto se comprende que para realizar en la práctica este método es necesario disponer de un inversor trifásico, el cual es un dispositivo que convierte corriente continua en corriente alterna trifásica y que será explicado en el siguiente capítulo, mediante el cual puede controlarse independientemente tanto la tensión como la frecuencia, tal como se muestra en la figura 2.3. Al conjunto formado por el inversor y su control de tensión y frecuencia suele denominársele modulador.

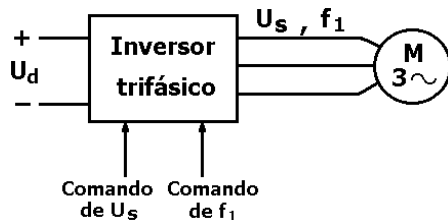


Figura 3.1- Esquema de control de la frecuencia.

En la figura 1.6 se muestra cómo varía la característica mecánica del motor al reducir la frecuencia con esta ley de mando. Como se observa, cuando la frecuencia disminuye mucho la capacidad de sobrecarga (momento máximo) disminuye también y a velocidades bajas se hace tan pequeña que la operación del motor con carga nominal se hace prácticamente imposible. Esto se debe a que, al reducirse la frecuencia y la tensión, llega el momento en que la caída en la resistencia se hace comparable con la fem E_s y la tensión aplicada, y al disminuir esta última, la fem y el flujo disminuyen. Recuérdese que, a menor flujo, el motor tiene menos posibilidades de producir momento electromagnético y la capacidad de sobrecarga o momento máximo cae. Para evitar esto debe trabajarse el motor con la Ley de mando a flujo constante, en la cual se cumple que:

$$\frac{E_s}{f_1} = K_{\phi f} \quad (1.12)$$

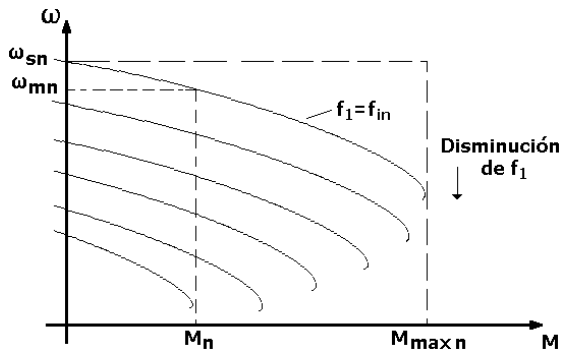


Figura 4.1 Características mecánicas con ley de mando U/f constante.

En la figura (1.5 a) se muestra cómo varían las características con esta ley de mando, observándose que la capacidad de sobrecarga se mantiene constante. En la figura (1.5 b) se aprecia cómo debe variar la tensión en función de la frecuencia para obtener esta ley de mando.

Para trabajar con valores de velocidad por encima del nominal es necesario aumentar la frecuencia de alimentación, pero la tensión no puede ser aumentada por encima de la nominal. Esto hace que el flujo, la capacidad de sobrecarga y el momento nominal, disminuyan, operándose en la zona de trabajo de debilitamiento del campo, la cual es una zona de potencia constante. Esto se observa en la figura 1.6.

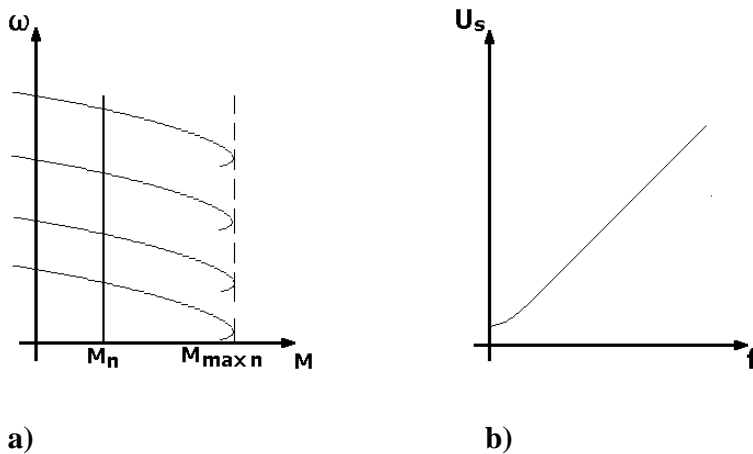


Figura 5.1- Características mecánicas y ley de mando a flujo constante.

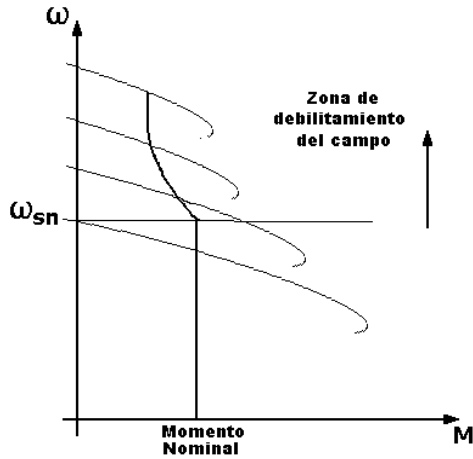


Figura 6.1- Características mecánicas en las zonas de momento constante y de potencia constante

1.2.4- Control de la velocidad de una carga de momento constante.

Para las cargas de momento constante debe utilizarse una ley de mando de flujo constante, cuyas características se dan en la figura 1.5. Es interesante determinar en este tipo de carga las expresiones para la corriente del estator, el deslizamiento (y la velocidad) y la tensión aplicada en el estator en función de la frecuencia de alimentación, si se aplica esta ley de mando. Para ello se utilizará el circuito equivalente de la figura 1.7 y el diagrama fasorial aproximado de la figura 1.8.

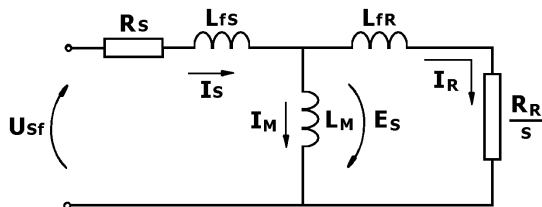


Figura 7.1- Circuito equivalente del motor de inducción.

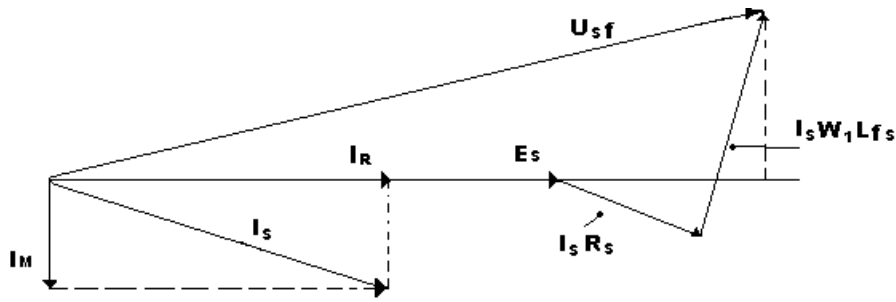


Figura 8.1- Diagrama fasorial aproximado del circuito equivalente de la figura 1.7

Como se trabaja en la zona estable de las características mecánicas, el deslizamiento es pequeño y se cumple que $\frac{R_R}{s} \gg \omega_1 \cdot L_{f,R}$, esto hace que la corriente \bar{I}_R esté en fase con la fem inducida \bar{E}_S . Por otra parte, la corriente \bar{I}_M está en cuadratura con \bar{E}_S y, dado que el flujo se mantiene constante, esta corriente también es constante. La fem es igual entonces a:

$$\bar{E}_S = j\omega_1 \cdot L_M \cdot \bar{I}_M \quad (1.13)$$

La corriente del rotor es:

$$\bar{I}_R = \frac{\bar{E}_S}{\frac{R_R}{s}} = \frac{s \cdot \bar{E}_S}{R_R} \quad (1.14)$$

Combinando (2.13) y (2.14) y hallando el módulo:

$$I_R = \frac{s \cdot \omega_1 \cdot L_M \cdot I_M}{R_R} \quad (1.15)$$

Por otra parte, si se supone el momento de la carga igual al momento electromagnético (operación en estado estacionario):

$$M_c = M = \frac{3 \cdot (P/2)}{\omega_1} \cdot I_R^2 \cdot \frac{R_R}{s} \quad (1.16)$$

$$\text{Sustituyendo (2.15) en (2.16) se obtiene: } M_c = K_M \cdot \omega_1 \cdot s \quad (1.17)$$

$$\text{donde: } K_M = \frac{3 \cdot (P/2) \cdot (L_M \cdot I_M)^2}{R_R} \quad (1.18)$$

$$\text{de (2.17): } s = \frac{M_c}{K_M \cdot \omega_1} = \frac{M_c}{2 \cdot \pi \cdot K_M \cdot f_1} \quad (1.19)$$

Como puede apreciarse, al disminuir la frecuencia aumenta el deslizamiento. Con el deslizamiento puede calcularse la velocidad del motor como:

$$\omega_m = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{(P/2)} (1-s) \quad (1.20a)$$

En esta expresión la velocidad está en rad/s, si se quiere en r/min la ecuación es:

$$n_m = \frac{120 \cdot f_1}{P} \cdot (1-s) \quad (1.20b)$$

$$\text{Sustituyendo (2.18) y (2.19) en (2.15) se obtiene: } I_R = \frac{M_c}{3 \cdot (P/2) \cdot L_M \cdot I_M} \quad (121)$$

Como se ve, la corriente del rotor es constante, por lo cual la corriente del estator es también constante e igual a:

$$I_S = \sqrt{I_M^2 + I_R^2} \quad (1.22)$$

De las ecuaciones anteriores y el diagrama fasorial de la figura 2.8 se determina la tensión de fase:

$$U_{s,f} = \sqrt{(E_s + I_R \cdot R_s + \omega_1 \cdot L_{f,s} \cdot I_M)^2 + (\omega_1 \cdot L_{f,s} \cdot I_R - I_M \cdot R_s)^2} \quad (1.23a)$$

$$\text{siendo aproximadamente: } U_{s,f} \approx E_s + I_R \cdot R_s + \omega_1 \cdot L_{f,s} \cdot I_M \quad (1.23b)$$

1.2.5- Control de la velocidad de una carga de momento variable.

En la figura 1.10 se muestra la característica de este tipo de carga y tres características mecánicas correspondientes a tres valores de frecuencia diferentes suponiendo que se mantiene la ley de mando a flujo constante.

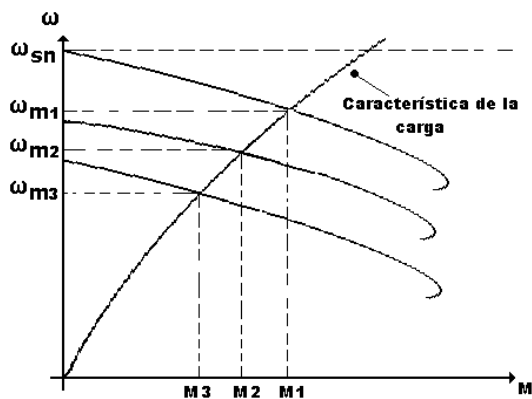


Figura 9.1- Característica de una carga de momento variable.

Como puede apreciarse, cuando disminuye la velocidad disminuye también el momento y tiene que disminuir, por tanto, la corriente que toma el motor. Utilizando el mismo motor se llevará a cabo un cálculo similar para este tipo de carga. Para simplificar el análisis se supondrá que la ecuación de la característica de la carga es de la forma:

$$M_c = K_c \cdot \omega_M^2 \quad (1.24)$$

$$\text{pero: } \omega_M = \frac{\omega_1}{(P/2)} \cdot (1-s) \quad (1.25)$$

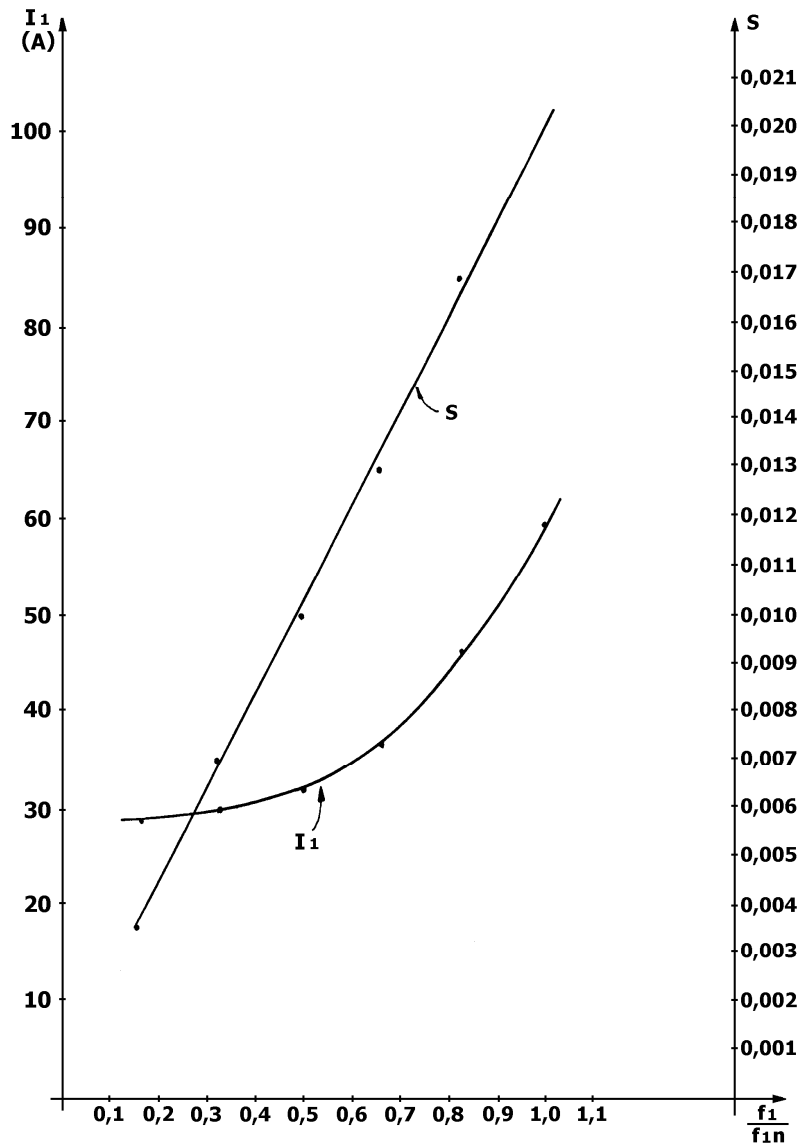
$$\text{Sustituyendo (2.25) en (2.24) e igualando con (2.17): } K_M \cdot \omega_1 \cdot s = K_c \cdot \left[\frac{\omega_1}{(P/2)} \cdot (1-s) \right]^2 \quad (1.26)$$

De esta igualdad, y para cada valor de frecuencia, se obtiene una ecuación de segundo grado en la cual el deslizamiento es la incógnita.

En la figura 1.11 se muestra la variación de la corriente y el deslizamiento para este tipo de carga. Se observa que la corriente disminuye al disminuir la frecuencia, tendiendo a la corriente de vacío.

Debe señalarse que, en los sistemas de control de velocidad modernos no es la ley de mando a flujo constante la que se recomienda aplicar con este tipo de mecanismo debido, precisamente, a que al reducir la velocidad la corriente es muy pequeña y las pérdidas de cobre son prácticamente despreciables en comparación con las de núcleo, las que resultan

ser predominantes. Como éstas dependen del flujo y, por tanto, de la tensión, se emplea una ley de mando cuya expresión es $U/f^2 = \text{constante}$. Esta ley de mando reduce la tensión aún más que lo que lo hace la característica $U/f = \text{constante}$. Esto aumenta la eficiencia del motor.



10.1- Control de la velocidad de una carga de tracción eléctrica.

Inicialmente se analizarán las características y los requerimientos generales de este tipo de mecanismos. En la figura 2.12 se muestran los diagramas tacométrico (de velocidad) y de carga, para un caso típico. Debido a que el recorrido entre paradas debe hacerse en el tiempo mínimo posible, la aceleración debe tomar el valor máximo permisible en el

instante inicial, limitada sólo por el confort de los pasajeros. Esto se logra imprimiendo al accionamiento el momento máximo en este período. Ahora bien, como el momento es constante y la velocidad va aumentando, la potencia entregada por la fuente de alimentación del vehículo va aumentando también, hasta que llega el instante en que se alcanza la potencia máxima de esta fuente, P_{max} . La velocidad a la que ocurre esto es la velocidad base ω_b . Después de este instante el accionamiento debe operarse a potencia constante, por lo que el momento va disminuyendo al aumentar la velocidad hasta llegar a la velocidad máxima ω_{max} , en la cual se alcanza el estado estacionario y el vehículo se mueve a velocidad constante, hasta que se decide detenerlo. En este momento se comienza a disminuir la velocidad reintegrando a la red la energía cinética almacenada, o sea, operando en la zona de frenaje regenerativo, inicialmente a potencia constante y, finalmente, a momento constante.

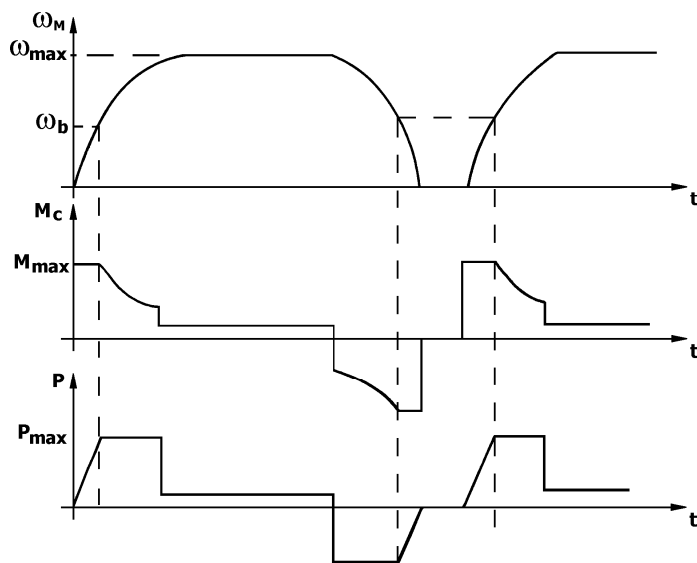


Figura 11. 1- Diagramas tacométrico y de carga de un mecanismo de tracción

Debido a que para invertir el sentido de marcha es necesario detener por completo el vehículo, puede decirse que este tipo de mecanismos trabaja sólo en el primer y el segundo cuadrantes, tal como se muestra en la figura 1.13, existiendo cuatro zonas de trabajo de acuerdo a si se opera en régimen motor o régimen generador, y a momento constante o

potencia constante. Debe señalarse que la velocidad base se toma igual o cercana a la velocidad nominal.

Otra característica muy importante de este tipo de mecanismos es la alta inercia de su sistema mecánico, la cual suele ser por lo menos 10 ó 20 veces mayor que la del motor eléctrico. Esta situación no es usual en los accionamientos eléctricos en los cuales la inercia de la carga es del mismo orden que la del motor, o cuando más, 4 ó 5 veces su valor.

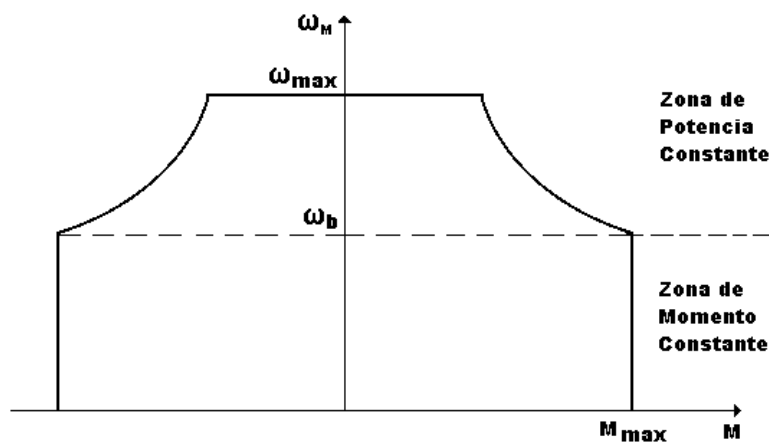


Figura 12.1 - Características en los cuadrantes de una carga de tracción eléctrica

Como se muestra en la figura 1.14, al operar un mecanismo de tracción con un control por frecuencia se trabaja desde el arranque hasta la velocidad base a momento constante, aumentando simultáneamente la tensión y la frecuencia aplicadas al motor. Para valores superiores de velocidad se aumenta la frecuencia sin aumentar la tensión, manteniéndola en su valor nominal, entonces se trabaja a potencia constante pues al aumentar la velocidad el momento nominal disminuye. En esta zona de trabajo se cumple la siguiente relación:

$$M_N \cdot \omega_m = K_1 = P_{fuente} \quad (1.27)$$

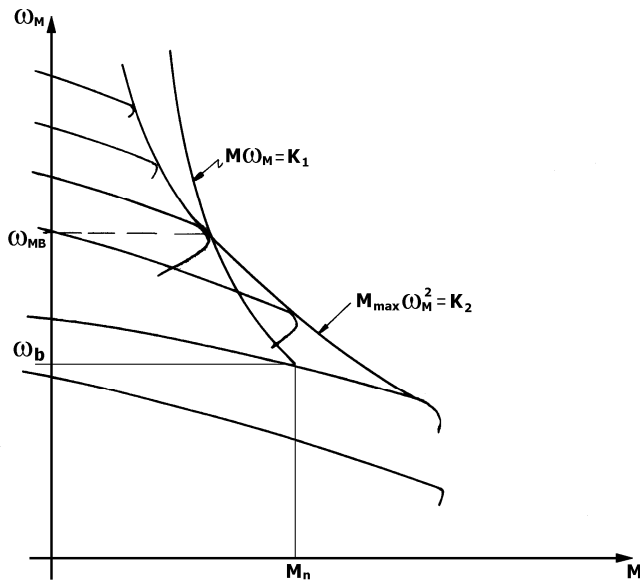


Figura 13.1 - Características mecánicas en el control por frecuencia de una carga de tracción eléctrica.

Obsérvese que en la zona de debilitamiento del campo el momento nominal no es el que resulta de dividir la potencia nominal entre la velocidad nominal, ya que disminuye al aumentar la velocidad.

Por otra parte, si se hace referencia a la ecuación (1.105) para el momento máximo, se desprecia la resistencia R_1 , y se hace:

$$X_{c.c} = X_1 + X_{f.R} = \omega_1 \cdot L_{c.c} \quad (1.28)$$

se obtiene la siguiente expresión para el momento máximo: $M_{\max} = \frac{3}{P} \cdot \left(\frac{U_{f1}}{\omega_s} \right)^2 \cdot \frac{1}{L_{cc}}$

$$(1.29)$$

Como el deslizamiento es muy pequeño se supone que la velocidad sincrónica es aproximadamente igual a la del motor, y la expresión del momento máximo queda de la siguiente forma:

$$M_{\max} = \frac{K_2}{\omega_m^2} \quad (1.30)$$

$$\text{donde: } K_2 = \frac{3.U_{f1}^2}{P.L_{cc}} \quad (1.31)$$

De (1.27) y (1.30) se concluye que el momento nominal (refiriéndose a M_N , y no a M_n que es el momento nominal en la zona de momento constante el cual no depende de la velocidad) en esta zona es inversamente proporcional a la velocidad y el momento máximo, inversamente proporcional al cuadrado de la velocidad. Esto quiere decir (ver figura 1.14) que para velocidades superiores a ω_{MB} (que es la que corresponde al punto en que se igualan el momento máximo y el nominal) la potencia que puede entregar el motor es menor que la que puede dar la fuente, perdiéndose capacidad. Cuando esto ocurre se cumple:

$$\frac{K_1}{\omega_{mb}} = \frac{K_2}{\omega_{mb}^2} \quad (1.32)$$

$$\text{Si el momento nominal del motor es } M_n: K_1 = M_n \cdot \omega_b \quad (1.33)$$

$$\text{De (2.32) y (2.33): } K_2 = M_n \cdot \omega_b \cdot \omega_{mb} \quad (1.34)$$

$$\text{y } M_{\max.n} = \frac{M_n \cdot \omega_b \cdot \omega_{mb}}{\omega_b^2} = \frac{M_n \cdot \omega_{mb}}{\omega_b} \quad (1.35)$$

donde $M_{\max.n}$ es el momento máximo de la característica natural.

$$\text{Si la capacidad de sobrecarga del motor es igual a: } \lambda = \frac{M_{\max.n}}{M_n}$$

$$\text{de las ecuaciones anteriores se cumple que: } \lambda = \frac{\omega_{mb}}{\omega_b} \quad (1.36)$$

Esto quiere decir que para que no ocurra este fenómeno de pérdida de potencia disponible en el accionamiento es necesario que la capacidad de sobrecarga del motor sea mayor que la relación entre la velocidad máxima y la base. Si esto no sucede el problema puede resolverse seleccionando un motor de mayor capacidad, aunque esto no es recomendable hacerlo ya que significaría un motor de mayor tamaño, y en este tipo de mecanismos las limitaciones de espacio disponible son grandes. La mejor solución es escoger un motor cuya tensión pueda ser incrementada por encima de la nominal el por ciento necesario.

Es utilizado también en este tipo de accionamiento el denominado inversor de corriente, el cual se alimenta con una fuente de corriente constante. Para obtener dicha fuente se utiliza un rectificador controlado con realimentación de corriente y una inductancia elevada, tal como se muestra en la figura 1.29. A diferencia del inversor de tensión, en este caso la corriente es la que tiene forma de pulsos rectangulares y la tensión se aproxima a una senoide, tal como se muestra en la figura 1.30 Este esquema tiene la ventaja de poder operar con facilidad en los cuatro cuadrantes, utilizar convertidores relativamente baratos y sencillos y proveer un alto momento de arranque. Tiene las desventajas de empeorar el factor de potencia, ser de respuesta lenta y poder trabajar con un solo motor. Se utiliza en grúas, transportadores, etc.

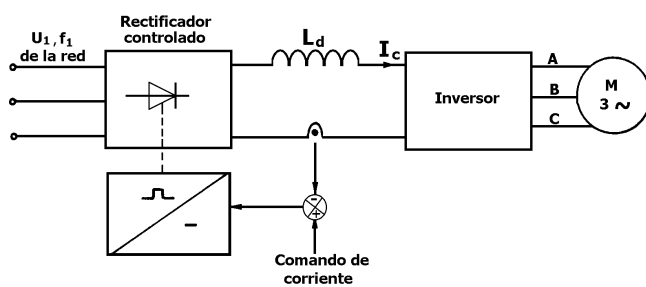


Figura 14.1. – Inversor de corriente.

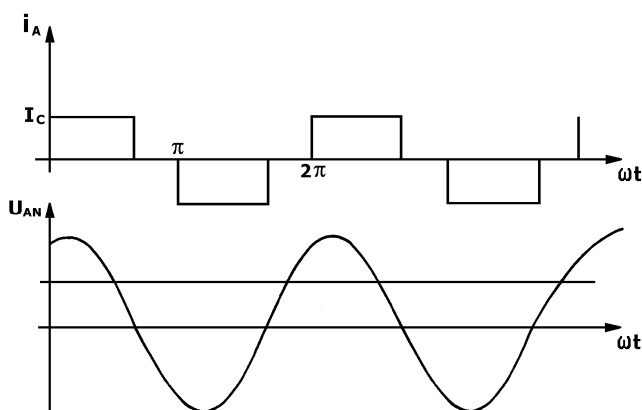


Figura 15.1. – Tensiones y corrientes en el inversor de corriente.

En el capítulo I se analizó la operación del motor de inducción con corriente constante y se llegó al circuito equivalente que se muestra en la figura 2.17. La corriente de la fuente, que aparece en la figura, es el valor efectivo de la componente fundamental de corriente de la figura 2.16, igual a:

$$I_s = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot I_c \quad (1.37)$$

En el capítulo I se explicó también que si el motor trabaja en la zona estable de la característica, la corriente magnetizante es muy grande y se produce la saturación excesiva del circuito magnético, lo cual no es permisible debido al gran incremento de la corriente y las pérdidas. Esto quiere decir que este accionamiento tiene que operar siempre a lazo cerrado, con el objetivo de estabilizar su operación.

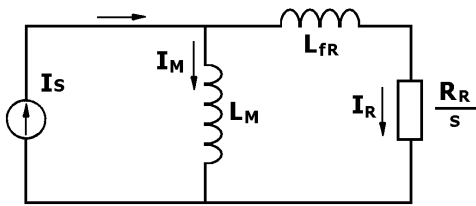


Figura 16.1– Circuito equivalente del inversor de corriente.

En el circuito de la figura 2.17, trabajando a una frecuencia angular cualquiera, se cumple que:

$$I_M = \left| \frac{\frac{R_R}{s} + j\omega_1 \cdot L_{f.R}}{\frac{R_R}{s} + j\omega_1 \cdot (L_M + L_{f.R})} \right| \cdot I_s \quad (1.38)$$

Despreciando $\omega_1 \cdot L_{f.R}$ y haciendo $L_R = L_M + L_{f.R}$ y

$$\omega_{RS} = s \cdot \omega_1 / (P/2) \quad (1.39)$$

donde ω_{RS} es la velocidad de deslizamiento, igual a:

$$\omega_{RS} = \omega_s - \omega_R \quad (1.40)$$

se obtiene:

$$I_M = \sqrt{\frac{1}{1 + [(P/2) \cdot \omega_{RS} \cdot T_R]^2}} \cdot I_S \quad (1.41)$$

donde $T_R = \frac{L_R}{R_R}$

Para operar a flujo constante la corriente magnetizante I_M debe mantenerse también constante. Esto quiere decir que para cada valor de corriente I_S existe un valor de velocidad de deslizamiento ω_{RS} que mantiene a la corriente magnetizante en su valor nominal. Para determinar esta característica es mejor escribir (2.41) de la forma:

$$I_S = \sqrt{1 + [(P/2) \cdot \omega_{RS} \cdot T_R]^2} \cdot I_M \quad (1.42)$$

En la figura 2.18 se muestra la característica de velocidad de deslizamiento (en r/min) en función de la corriente del estator del motor, para mantener la corriente magnetizante en su valor nominal en el motor que se ha estado estudiando en este capítulo. Si el inversor es controlado por una microcomputadora esta característica se almacena en la memoria de la misma y para cada valor de carga se censa la velocidad de deslizamiento, se le suma la velocidad real del rotor y se obtiene, con esto, la frecuencia del inversor.

Para una carga de momento constante, tal como la analizada en el epígrafe 2.3, la velocidad de deslizamiento es constante, al igual que la corriente del estator. Debe señalarse que velocidad de deslizamiento constante no significa deslizamiento constante. Esto se comprende analizando la expresión (2.39) pues al disminuir la frecuencia aumenta el deslizamiento, si la velocidad de deslizamiento permanece constante. Esto coincide con los resultados obtenidos en 2.3.

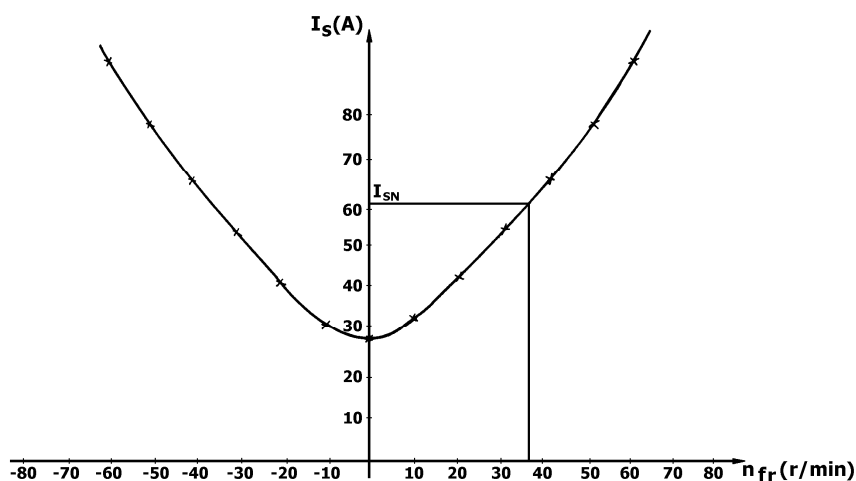


Figura 17.1. – Característica corriente - velocidad de deslizamiento del inversor de corriente.

1.2.6- Comportamiento del motor de inducción trifásico alimentado por tensiones no sinusoidales.

Como se explicará en el siguiente capítulo, los inversores trifásicos utilizados en el control por variación de la frecuencia dan ondas de tensión y corriente no sinusoidales. Esto provoca el aumento de las pérdidas y la aparición de momentos pulsantes en el motor, que pueden ser de importancia en su selección y aplicación. En general, la onda de tensión contiene una componente fundamental y armónicas impares de orden superior, con la expresión:

$$u_s(t) = \sqrt{2} \cdot U_{s1} \cdot \cos(\omega_1 t) + \sqrt{2} \cdot U_{s5} \cdot \cos(5\omega_1 t) + \sqrt{2} \cdot U_{s7} \cdot \cos(7\omega_1 t) + \dots \quad (1.43)$$

en la cual no aparece la armónica de orden tres ni sus múltiplos debido a la conexión trifásica del inversor y el motor.

El análisis del comportamiento del motor puede llevarse a cabo suponiendo que cada armónico de tensión actúa por separado, para determinar la corriente correspondiente y aplicar posteriormente el principio de superposición. Para esto, se utilizará un circuito equivalente para cada armónica, el cual queda como aparece en la figura 2.19 para la armónica de orden k.

En esta figura:

$R_{S,k}$ y $R_{R,k}$ son las resistencias del estator y el rotor, las cuales aumentan al aumentar la frecuencia de la armónica, debido al efecto pelicular. Este efecto es particularmente notable en el rotor y en aquellos motores de ranura más profunda. Esta resistencia puede ser, en este último caso, de 5 a 10 veces la resistencia a la corriente continua.

$kX_{f.S,k}$ y $kX_{f.R,k}$ son las reactancias de dispersión del estator y el rotor, las cuales también se ven afectadas por el efecto pelicular.

$kX_{m,k}$ es la reactancia magnetizante. Debe señalarse que la inductancia magnetizante, de la cual depende esta reactancia, debido a la existencia de una onda de densidad de flujo no sinusoidal con valores pico relativamente altos, es menor que a la frecuencia fundamental, debido al efecto de una mayor saturación del circuito magnético de la máquina. Esto implica una mayor corriente magnetizante.

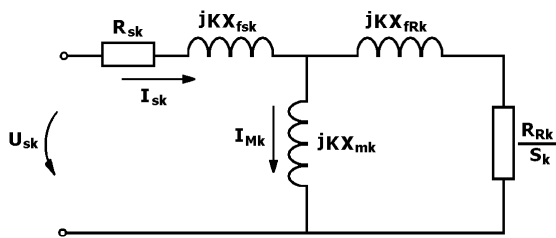


Figura 18.1. – Circuito equivalente exacto del motor de inducción para la armónico k.

El deslizamiento de la armónica k está dado por:
$$s_k = \frac{k \cdot \omega_1 \pm \omega_R}{k \cdot \omega_1} \quad (1.44)$$

El signo depende de si se trata de una armónica de secuencia positiva o negativa.

Como ω_R está muy cerca de ω_1 , entonces:
$$s_k = \frac{k \pm 1}{k} \quad (1.45)$$

cumpléndose también que $\frac{R_{R,k}}{s_k}$ es muy pequeño en comparación con las reactancias de dispersión, al igual que $R_{s,k}$. Si se desprecia también la reactancia magnetizante, por estar en paralelo y ser mucho mayor que la de dispersión, se obtiene el circuito equivalente de la figura 2.20, válido para las armónicas superiores, y donde:

$$X_{c.c,k} = k \cdot (X_{f.S,k} + X_{f.R,k}) \quad (1.46)$$

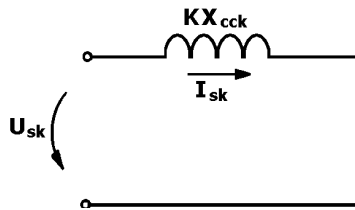


Figura 19.1. – Circuito equivalente aproximado del motor de inducción para el armónico k.

Obsérvese que las armónicas de corriente no dependen de la carga mecánica del motor. Esto quiere decir que, mientras menos carga tenga el motor mayor es la deformación de la corriente con respecto a una onda sinusoidal.

Después de aplicar el principio de superposición pueden obtenerse las siguientes expresiones de corriente, para cada una de las tres fases del motor, suponiendo la corriente de la fase A como referencia:

$$i_{SA} = \sqrt{2} \cdot I_{S1} \cdot \cos(\omega_1 t) + \sqrt{2} \cdot I_{S5} \cdot \cos(5\omega_1 t) + \sqrt{2} \cdot I_{S7} \cdot \cos(7\omega_1 t) + \dots$$

(1.47a)

$$i_{SB} = \sqrt{2} \cdot I_{S1} \cdot \cos\left(\omega_1 t - \frac{2\pi}{3}\right) + \sqrt{2} \cdot I_{S5} \cdot \cos\left(5\omega_1 t + \frac{2\pi}{3}\right) + \sqrt{2} \cdot I_{S7} \cdot \cos\left(7\omega_1 t - \frac{2\pi}{3}\right) + \dots$$

(1.47b)

$$i_{SC} = \sqrt{2} \cdot I_{S1} \cdot \cos\left(\omega_1 t + \frac{2\pi}{3}\right) + \sqrt{2} \cdot I_{S5} \cdot \cos\left(5\omega_1 t - \frac{2\pi}{3}\right) + \sqrt{2} \cdot I_{S7} \cdot \cos\left(7\omega_1 t + \frac{2\pi}{3}\right) + \dots$$

(1.47c)

De estas ecuaciones pueden sacarse las siguientes conclusiones:

- 1- Las armónicas de orden $k = 3n + 1$ (con n igual a 0, 2, 4, entre otros) producen una fuerza magnetomotriz giratoria, de velocidad igual a $k\omega_s$ ($\omega_s = \frac{\omega_1}{P/2}$), en el sentido de la rotación del motor.
- 2- Las armónicas de orden $k = 3n + 2$ (n igual a 1, 3, 5, entre otros) producen una fuerza magnetomotriz giratoria, de velocidad igual a $k\omega_s$, en sentido contrario a la rotación del motor.

3- Las armónicas de orden $k = 3n$ no existen en un devanado trifásico.

Seguidamente se pasará a analizar brevemente el efecto de estas corrientes y tensiones no sinusoidales en las pérdidas y la eficiencia del motor.

- Las pérdidas de cobre del estator están dadas por: $\Delta p_{cobs} = 3 \cdot R_{Sk} \cdot [I_{s1}^2 + I_{arm}^2]$
(1.48)

donde I_{arm} es el valor efectivo de las armónicas superiores de corriente.

Estas pérdidas no sólo aumentan por la presencia de este factor sino también por el aumento de la corriente magnetizante, el cual ya fue tratado.

- Las pérdidas de cobre del rotor son de dos tipos: las fundamentales y las debidas a las armónicas.

Las fundamentales están dadas por: $\Delta p_{cbrf} = s \cdot M \cdot \omega_s$ (1.49)

donde M es el momento electromagnético.

Estas pérdidas aumentan muy poco.

Por otra parte, las pérdidas de cobre del rotor debidas a las armónicas son las más altas existentes con onda no sinusoidal, y están dadas por:

$$\Delta p_{cobr} = 3 \cdot \sum I_{Rk}^2 \cdot R_{Rk} \quad (1.50)$$

Este gran aumento de las pérdidas se debe, fundamentalmente, al efecto de ranura profunda de las barras del rotor.

- Las pérdidas de núcleo aumentan ligeramente debido a la existencia de picos más altos de densidad de flujo. Este aumento es prácticamente despreciable.

- Las pérdidas adicionales aumentan ligeramente debido al aumento de las pulsaciones de flujo y al incremento de la saturación en los dientes.

En máquinas alimentadas con inversores de tensión variable, de onda rectangular, el aumento de las pérdidas y consecuente disminución de la eficiencia recomienda disminuir la potencia nominal del motor en un 10%, aproximadamente. En máquinas alimentadas con inversores con modulación del ancho del pulso y optimización de armónicas, o con modulación sinusoidal o vectorial (ver capítulo III), no es necesario "derratear" el motor a las velocidades superiores. Ahora bien, si el motor tiene un ventilador incorporado al eje, la carga es de momento constante, y el diapasón de regulación de velocidad es amplio,

entonces la potencia nominal a las velocidades inferiores disminuye debido a la pérdida del enfriamiento.

En cuanto a los momentos producidos por las armónicas de orden superior, éstos son pequeños y tienden a oponerse, debido a la existencia de momentos de secuencia positiva y negativa. La pulsación del momento también es, en general, pequeña.

1.2.7 Consideraciones especiales en el diseño y utilización de motores de inducción para variadores de velocidad por frecuencia.

Hasta el día de hoy los variadores de velocidad industriales se diseñan para trabajar con motores de inducción de propósito general ya que en muchos casos el variador se adquiere para cambiar un accionamiento de velocidad constante por uno de velocidad variable y el motor suele ser el mismo. Ahora bien, en instalaciones nuevas cada vez es más utilizado este tipo de accionamiento y, sin embargo, aún predomina la costumbre de adquirir motores de inducción diseñados para trabajar a velocidad, frecuencia y tensión de alimentación, constantes. El empleo de un motor especialmente diseñado para trabajar a frecuencia variable conduce a una mayor eficiencia y una mejor utilización del accionamiento. Por tanto, desde hace años, los investigadores y fabricantes de motores realizan ingentes esfuerzos por obtener un diseño apropiado para operar con variadores de velocidad. En este epígrafe se explicarán algunos de los aspectos más importantes considerados en el diseño de estos motores.

En la operación con variadores de velocidad no existe un punto nominal de trabajo del motor, o sea, no puede especificarse una velocidad nominal y un momento nominal únicos. Más bien, existe un "lugar geométrico" de valores nominales en la característica mecánica, la cual puede comprender zonas de momento constante, de momento variable o de potencia constante. Esto hace muy difícil la tarea de optimizar la operación del motor. A pesar de esta dificultad, es posible incidir en algunos aspectos de construcción y diseño del motor que han conducido a la obtención de series especiales que logran una mejor eficiencia y un mejor comportamiento con velocidad variable.

Uno de los problemas más importantes a considerar es el diseño de las barras del rotor. En los motores de propósito general debe llegarse a una solución de compromiso entre

construir una barra de baja resistencia para aumentar la eficiencia, o una de alta resistencia para obtener un momento de arranque adecuado. Cuando el motor arranca alimentado por un variador de velocidad el proceso de arranque se controla de forma tal que la frecuencia va aumentando suavemente. Esto hace que siempre se trabaje en la zona de la característica mecánica cercana al momento máximo y no sea necesario aumentar la resistencia del rotor. Esto posibilita fabricar una barra más grande y de un material de mayor conductividad, con el objetivo de reducir su resistencia. El aumento del tamaño de la barra tiene el efecto adicional de aumentar el flujo de dispersión y la reactancia de dispersión. Esto, aunque disminuye en algo la capacidad de sobrecarga del motor, tiene el efecto beneficioso, según fue explicado en el epígrafe anterior, de disminuir el contenido de armónicas de corriente del motor y hacer menor su calentamiento. Los motores denominados de alta eficiencia se basan también en este principio.

Las armónicas de la corriente del estator aumentan las pérdidas por efecto Joule y las pérdidas en el acero. Mientras mayor es la frecuencia de estas armónicas mayor es el efecto pelicular, lo cual tiende a aumentar todavía más el calentamiento. Este efecto puede disminuirse colocando en el estator un mayor número de conductores de diámetro más pequeño. Esto es caro y provoca una disminución de la razón cobre/aislamiento en la ranura del estator, obligando a llegar a una solución de compromiso. También suele usarse para disminuir este efecto la transposición de conductores. Las pérdidas de acero pueden disminuirse utilizando un mejor material y láminas más finas.

Otra ventaja de la utilización de los variadores de velocidad por frecuencia es que puede prescindirse de los motores de 2 polos para obtener velocidades altas. El motor de 2 polos impone requerimientos muy fuertes a los diseñadores ya que en ellos es muy difícil, prácticamente imposible, ubicar bobinas de paso completo. Esto obliga a utilizar bobinas de paso muy acortado, lo cual disminuye la utilización de los materiales. Con una fuente de frecuencia variable puede diseñarse un motor de 4 polos para trabajar a 3600 r/min. alimentándolo con 120 Hz. Debe señalarse que, en este caso, las pérdidas aumentan por el aumento de la frecuencia, por lo cual, nuevamente, debe llegarse a una solución de compromiso.

Es importante volver a insistir en la pérdida de enfriamiento del motor cuando trabaja a velocidades muy bajas. Esto hace que su potencia nominal a estas velocidades disminuya.

Los fabricantes recomiendan una disminución de la potencia nominal a partir de determinado por ciento de la velocidad nominal. En algunos casos puede ser más económico disponer de ventilación forzada.

Debe insistirse también en un fenómeno al cual en los últimos años se le está prestando gran importancia y es el efecto que tiene sobre el aislamiento del motor la forma de onda de la tensión, la cual, como se explicará en el capítulo 3, no es sinusoidal, sino que está formada por pulsos en los cuales la tensión varía de forma muy abrupta, dando lugar a elevados valores de du/dt , los cuales provocan un fenómeno de reflexión de ondas similar al que sucede en las líneas de transmisión y que trae por consecuencia picos de tensión de 2 a 3 veces el nominal, cada vez que se produce un “switching” o conmutación de los dispositivos semiconductores que conforman el puente (ver figura 2.21). Por ejemplo, para una frecuencia de conmutación de 6 kHz, con una frecuencia fundamental de 60 Hz, se producirán 100 picos de tensión como los señalados por cada ciclo, o sea por cada 16,6 milisegundos.

Si los valores de tensión de pico son superiores a las tensiones de descargas parciales del aislamiento del devanado, éstas comenzarán a aparecer y la vida útil del aislamiento disminuirá apreciablemente. Este fenómeno se acentúa cuando existe humedad, contaminación o partículas de polvo o aceite en el devanado. En la actualidad, los motores diseñados para operar con convertidores de frecuencia soportan picos de tensión de 1600 V durante 0,10 seg. Para disminuir este efecto se recomienda adoptar las siguientes medidas:

- Disminuir al máximo la longitud de los cables que van al motor.
- Minimizar la frecuencia de conmutación, siendo 3 kHz la óptima.
- Tratar de evitar las sobretensiones en el motor y trabajar con el menor valor posible de tensión nominal.
- Mantener la temperatura ambiente en menos de 40° centígrados.
- Operar el motor con un límite de clase de aislamiento inferior al nominal.
- Usar motores de construcción cerrada cuando existe posibilidad de trabajar en ambientes húmedos, contaminados o sucios.

Si aún tomando todas o algunas de estas medidas, se sospecha que puedan existir sobretensiones que limiten apreciablemente la vida del aislamiento debe conectarse algún dispositivo exterior que minimice estos efectos. Existen cuatro variantes posibles:

- Colocar reactores de línea a la salida. Estos deben tener una impedancia por unidad del 2 al 4%. Los reactores de 0,5 a 1% provocan picos aún más altos. Esta solución es barata y puede utilizarse con, prácticamente, cualquier frecuencia de conmutación. Tiene como inconveniente que provoca una caída de tensión adicional entre el convertidor y el motor.
- Filtro RLC con puente de diodos para la disminución del du/dt . Ese filtro recupera la energía adicional, reduce tanto el du/dt como los picos de tensión.
- Trampa de Onda Reflejada. Se instala en los terminales del motor y limita los picos de onda reflejada a un valor menor de 900 V.
- Filtro RLC para onda sinusoidal. Su estructura es similar a la del caso 2, pero su objetivo es producir una onda sinusoidal a la salida del convertidor. Es la variante que da lugar a más caídas de tensión y más pérdidas.
- Otro fenómeno muy importante a tener en cuenta en la operación del motor con una onda no sinusoidal es el debido a las componentes de corrientes de alta frecuencia, las cuales circulan a través de las capacidades existente entre el cojinete o chumacera y tierra o carcasa, el cojinete o caja de bolas y la película de aceite lubricante que se forma al girar el rotor y entre rotor y estator.. Estas corrientes van dañando estos elementos mecánicos y provocan una disminución apreciable de su vida útil.

Estos dos últimos fenómenos que hemos señalado son de una gran importancia si tenemos en cuenta que las principales causas de fallos en los motores de inducción son, precisamente, los problemas mecánicos en los cojinetes y el deterioro del aislamiento del devanado del estator.

Conclusiones del capítulo.

1.- Existe una gran cantidad de trabajos que tratan el tema sobre la aplicación del variador de frecuencia para el ahorro energético en bombas, grúas y otros mecanismos, sin embargo es pobre la literatura sobre la aplicación de este dispositivo en escaleras mecánicas.

2.- La teoría sobre los accionamientos eléctricos con motores de inducción, controlados por variadores de frecuencia, sirve de fundamento a la investigación sobre el impacto energético de los variadores de frecuencia empleados en las escaleras mecánicas para la racionalización del consumo de energía eléctrica en las mismas.

Capítulo II. Materiales y métodos.

Introducción.

En este capítulo se brinda una información general sobre las características del Metro de Caracas, sus estaciones y sus escaleras mecánicas. Se explica cómo se realizó el trabajo de campo, los métodos de medición empleados y las características de los instrumentos de medición.

2.1.- Caracterización general del Metro de Caracas.

El Metro de Caracas es uno de los sistemas de transporte público más importantes que atiende a la ciudad de Caracas, y el más extenso y antiguo de los construidos en Venezuela. Fue inaugurado el 2 de enero de 1983 con 6,7 Km.

Metro de Caracas C.A. es una empresa del Estado Venezolano fundada el 8 de Agosto de 1997 con personalidad jurídica y patrimonio propio e independiente del fisco Nacional y adscrito al antiguo Ministerio del Transporte y Comunicaciones; que nace como solución al problema de transporte en la ciudad de Caracas.

La empresa tiene por misión contribuir al desarrollo del transporte colectivo en el área metropolitana, mediante la planificación, construcción y explotación, comercial de un sistema integrado de transporte, conformado por una red ferroviaria metropolitana (METRO) y una red alimentadora de transporte superficial (METROBUS), que presta un servicio público seguro, efectivo, eficiente y confiable.

Se trata de una Organización Consolidada que enfrenta una coyuntura especial, plena de desafíos, que le exigen la modernización de los mecanismos, la revisión de sus procesos y la optimización del recurso humano y financiero.

En la actualidad, las cifras mas importantes que describen al sistema Metro-Metrobús al mes de marzo del año 2007 son las siguientes:

Pasajeros diarios: 1,500,000

Nº de Trenes: 55

Estaciones: 44

Vagones por tren: 6 o 7, según la línea.

Tiempo de espera entre dos trenes: de 1 a 10 minutos según el día y la estación.

Velocidad promedio: 80 Km/h

Longitud de las cuatros líneas: 54.2 Km

Las estaciones operan de 5:30 am hasta las 11:00 pm., excepto: Caño Amarillo, Colegio de Ingenieros (Línea1), La Yaguara (Línea2) y Los Símbolos (3), que culminan su operación comercial a las 9:00 pm.

La línea 1 por su parte, la más antigua del sistema, manejó un promedio diario de 880.883 pasajeros a lo largo de sus 30estaciones.

El Metro cuenta con 44 estaciones de pasajeros, con los siguiente niveles, calle, Mezzanina, andén, desplazándose los usuarios por escaleras fijas, escalera móvil (Mecánica) en reversa, algunas con velocidad variable y otros con velocidad fija). El buen funcionamiento de estas estaciones depende en gran medida de la seguridad y confiabilidad de las instalaciones para el suministro y distribución de la energía eléctrica la cual, en la práctica, es la única fuente energética de esta entidad. Este sistema se divide en dos grupos básicos: Sistema de electrificación de tracción y Sistema de electrificación para servicio auxiliares.

El sistema de electrificación para tracción comprende todas las instalaciones y equipos necesarios para el suministro de la energía requerida para el desplazamiento de los trenes. Como se ilustra en el lado izquierdo de la Figura Nº 3 el Metro compra su energía para

tracción a la empresa de suministro (C.A. La Electricidad de Caracas) en el nivel de tensión de 69Kv, la cual es reducida a 30 Kv por la C.A. Metro de Caracas en sus propias subestaciones para luego ser transmitida a lo largo de cada uno de los túneles, llegando a subestaciones eléctricas de reducción y rectificación para finalmente alimentar los trenes a una tensión de corriente directa de 750 Vcc.

El sistema de electrificación para servicios auxiliares abarca todo lo relacionado con el suministro eléctrico a los diferentes equipos que se encuentran en las estaciones de pasajeros, estructuras de ventilación, patios y talleres, plantas de refrigeración y edificios del centro de control de operaciones. Entre estos equipos se pueden nombrar los sistemas de climatización, ventiladores de emergencia, escaleras mecánicas, iluminación, bombas de agua, dispositivos electrónicos para el control de trenes, tal como se aprecia en la figura 4

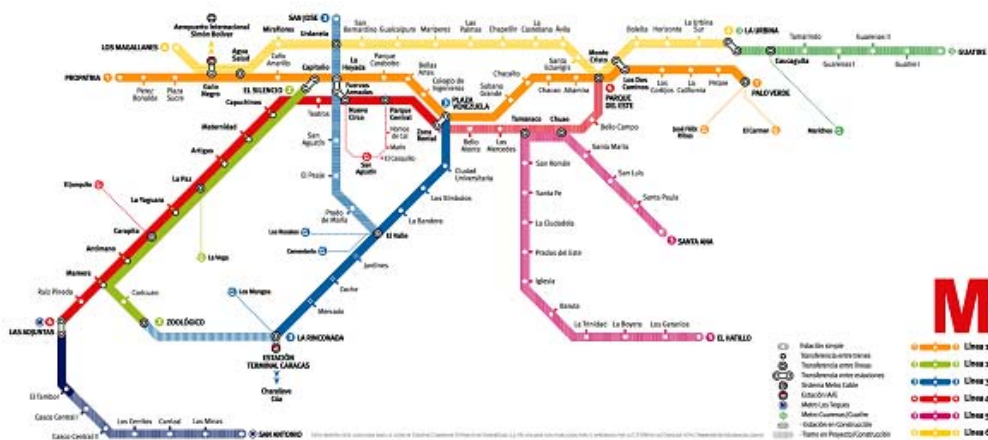


Figura N° 2. Líneas del Metro de Caracas actuales y proyectos a futuro o en construcción

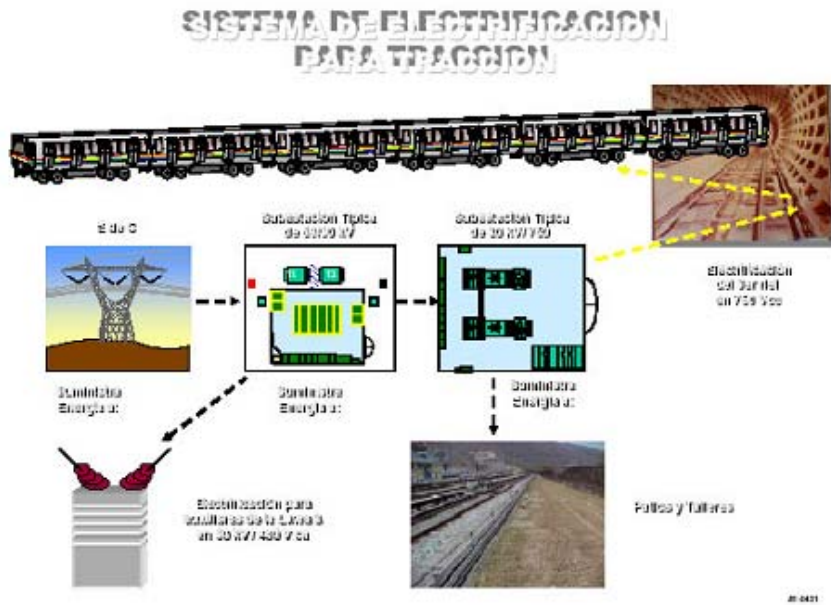


Figura N° 3. Red eléctrica para la tracción de trenes.

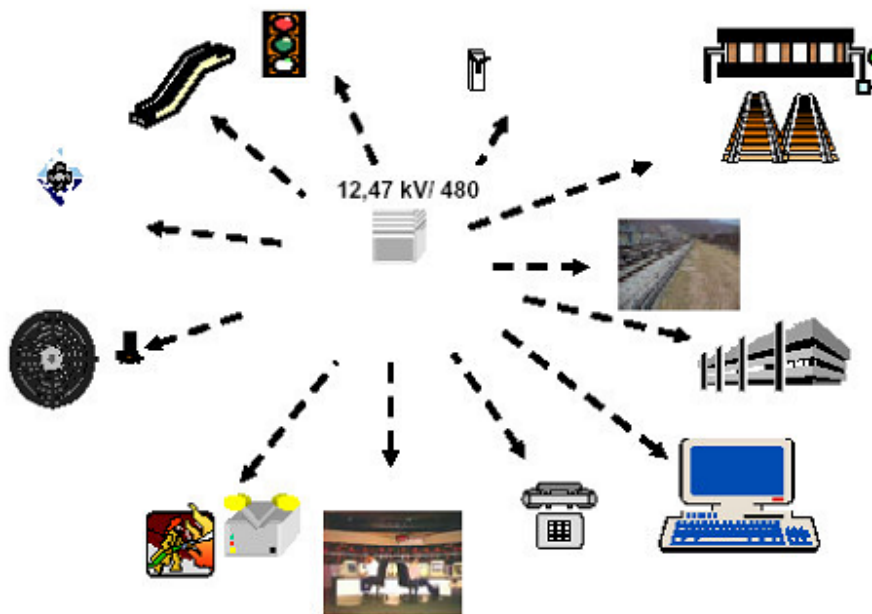


Figura N° 4. Cargas alimentadas por el sistema de auxiliares.

El Metro de Caracas cubre la gran Caracas o metrópoli de este a oeste, de norte a sur, con sus cuatros líneas (L1, L2, L3, L4), la primera línea uno (L1), recorre la capital de oeste a

este. En el lado oeste atiende al sector residencial de clase humilde, media, comercial, instituciones educativas, sectores de medianas producción de bienes y servicio, sector salud. En la parte central de la línea cubre zonas residencial clase media, comercio, ministerios, terminales de pasajero instituciones educativas, sectores de medianas producción y servicio, sector salud. En el lado este al sector comercial, residencial clase media alta, sector educativo privado, sectores de mediana producción y servicio. En la línea dos (L2), extendida del centro de la ciudad al sur oeste, atiende a sector residencial, comercial, producción de bienes y servicio, además es una línea de transferencia, de las líneas 1, 3 y 4. La línea 3 (L3), extendida del sur este de la ciudad, atiende al sector residencial, educativo, Terminal de pasajero, y sirve de enlace con la línea 1 (L1), 4(L4) y la estación de ferrocarril de la capital “Ezequiel Zamora”, atiende al hipódromo, centro de actividades culturales y entretenimiento (poliedro). La línea 4 (L4), atiende al sector comercial de la zona, residencial, de producción de bienes y servicio, ministerios, sirve de enlace a la línea 1 (L1), L(2),(L4).

El suministro de energía a las estaciones proviene de la red de 12,47 Kv perteneciente a la C.A. La Electricidad de Caracas (EDC) y consiste en dos circuitos alimentadores provenientes de una misma subestación y están identificados como. A la entrada de la acometida de dichos alimentadores a las estaciones se encuentran las protecciones respectivamente. Esta acometida suministra la energía eléctrica a todos los centros de potencia, pertenecientes a las estaciones, en donde se reduce la tensión de 12,47 Kv a 480 V, para luego ser distribuida a los equipos que se encuentran en la estación, algunos de los cuales necesitan de una tensión más baja (208/120V) para su funcionamiento adecuado.

En la Figura N° 5 se observa un diagrama unifilar de una estación de auxiliares típica que conforma el centro de distribución es el caso de la estación Chacao que es igual para las demás estaciones.

Cada Centro de Distribución (CDA ó CDB) está compuesto por dos circuitos ramales denominados Centros de Potencia CPA y CPB cuyas entradas son, tal como ya se mencionó, en 12,47 Kv y están enlazados en su lado de baja tensión con una barra común en 480 V. Los CPA se conectan a una de las llegadas en 12,47 Kv de la EDC y los CPB a la otra.

El esquema de distribución eléctrica en cada Centro de Distribución de las Estaciones es clasificado en la literatura como una distribución en RED tipo spot-network, donde la confiabilidad se garantiza mediante el acoplamiento de los transformadores de los Centros de Potencia A y B a su salida, verificando el sincronismo de la red, de forma tal que las magnitudes de la tensión en salida en 480 V en módulo y ángulo no sean superiores al 1%, y de esta manera mantener la continuidad del servicio constante a la salida. Ante la posible pérdida de uno de los grupos, el otro está en capacidad de asumir el 100% de la carga.

El Centro de Distribución CDA es independiente del Centro de Distribución CDB en cuanto a carga se refiere, esto significa que cada uno alimenta sectores bien diferenciados de carga dentro de la estación. El Centro de Distribución A está en el lado oeste a nivel mezzanina de la estación en el ambiente PE 58 y el CDB en lado este. Cada Centro de Potencia está constituido por una celda de alta tensión, el transformador y una celda de baja tensión BT,

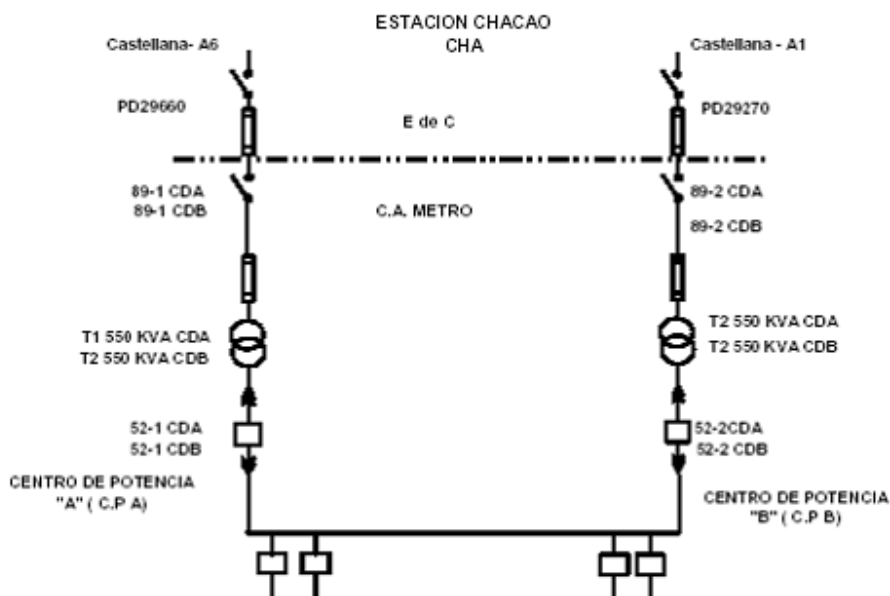


Figura N° 5. Diagrama unifilar de servicios auxiliares de la estación Chacao.

En cada estación de pasajero del metro de Caracas, específicamente las de carácter subterráneo, encontramos los siguientes componentes de requerimiento, de energía eléctrica, las escaleras mecánicas, sistema de alumbrado, aire acondicionado, bomba de

drenaje, aguas servidas, sistema contra incendio, área de boletos y torniquetes, comunicación y señalización de trenes, entre otros .

2.2.- Caracterización de las escaleras mecánicas objeto de estudio.

El sistema de las escaleras mecánicas está integrado por: las escaleras mecánicas; los sub- paneles de supervisión; los sub- paneles de parada de emergencia y de monitoreo y el junto al sub- panel de alarmas varias de los equipos electromecánicos.

Las escaleras mecánicas han sido concebidas principalmente para el servicio público, en el caso particular de la C.A Metro de Caracas, proporcionan confort al usuario, auxilian el control del flujo de pasajeros en la estación; son construidas bajo normas rígidas donde la seguridad de los usuarios es prioritaria.

Debido a las condiciones particulares de trabajo, se definen un tipo de escaleras llamado de uso pesado o Heavy Duty el cual es el adecuado en sistemas del Metro; en general, este tipo de escaleras mecánicas es usado en los casos de recorridos altos, y con emplazamiento interior y exterior (intemperie). La forma de construcción es compacta, los componentes están en lo posible premontados.

La utilización de componentes comúnmente están clasificados en: Mecánicos, Eléctricos, de Control y las Unidades de Señalización, aseguran su adaptación en diferentes disposiciones, es decir, hay combinaciones de mecanismos en los tres tipos de escaleras; todas estas poseen la característica de tener un Sistema de Lubricación Automático y un conjunto de Dispositivos de Seguridad distribuidos a lo largo de ellas y controlados por una tarjeta electrónica con una serie de relés. Conectados a una dicha tarjeta , según su composición física y funcional los componentes de las escaleras están clasificados en: mecánicos, eléctricos, de control, unidades de señalización.

Características Técnicas de las Escaleras Mecánicas “Schindler”:

3. Marca “Schindler”, de fabricación Austriaca.
4. Tipo de servicio: Intenso o pesado.

5. Tipo de escaleras: M.
6. Velocidad 36 m / min. O 0,6 m /seg. Y capacidad: 135 pas/min.
7. Capacidad teórica de Transporte: 9.000 personas / hora.
8. Capacidad real de Transporte: 7.100 personas / hora.
9. Angulo de Cobertura: 30 grados.
10. Vida Útil: 20años.
11. Ancho entre ejes de pasamanos: 1,31 m.
12. Ancho del peldaño: 1 m.
13. Condiciones de carga por peldaño: 150 Kg. (75 kg. Por c/pas).
14. Son Reversibles.

En las estaciones de pasajero del metro de Caracas se encuentran tres tipos de escaleras mecánicas, cuya clasificación va a depender del desnivel que atiende, y de la cantidad de motores de 11kW o de 15 kW que contienen. Por lo que se pueden clasificar en bajo(M.1), generalmente ubicadas en el nivel de anden, mediana están en las mezzaninas (M-2), ambas de tramo corto, poseen una sola unidad de tracción larga(M-2,M-3) todas estas para el caso de la marca Schindler, para el caso de las marca OTIS la clasificación o serie es HD-A, HD-B, HD-M, sin variador .para el caso de la Schindler existen sin variador o con variador, con velocidad desde 0,1m/s sin usuario, hasta 0,6 m/s, como valores nominales. Teniendo esta última un sistema de radial a la entrada de la escalera donde el usuario aborda la escalera, con el objeto de llevar la escalera a su velocidad nominal, de manera que el usuario no sienta impacto de aumento de velocidad de carga, de manera súbita

En los diferentes tramos de las líneas 1, 2 y 3 hay 26 estaciones, de las cuales en 25 se encuentran distribuidas 159 escaleras mecánicas. Los tipos de escaleras instaladas en dichos tramos son: M-1, M-2 y M-3: La ubicación en cada uno es la siguiente:

Las escaleras del tipo M1 y M2 son escaleras de tramos cortos, cuya principal característica consiste en que poseen una sola unidad de tracción localizada en el foso superior de la misma; detallando mejor:

EW-M1: Escaleras mecánicas, donde la máquina de tracción se encuentra ubicada dentro de la misma estructura de la escalera y el acceso a la misma es por la parte superior.

EW-M2: Escaleras mecánicas, donde la máquina de tracción se encuentra ubicada dentro de la misma estructura de la escalera y el acceso a la misma es por la parte superior, a través de una estructura anexa.

En las escaleras del tipo M3, es decir, las EW-M3: la maquinaria (dos unidades) de tracción se encuentra ubicada en una estructura anexa (jaula, la cual está atornillada debajo del extremo superior del armazón) y cuyo acceso es por la parte superior, son las utilizadas en tramos largos.

Partes principales de una escalera mecánica.

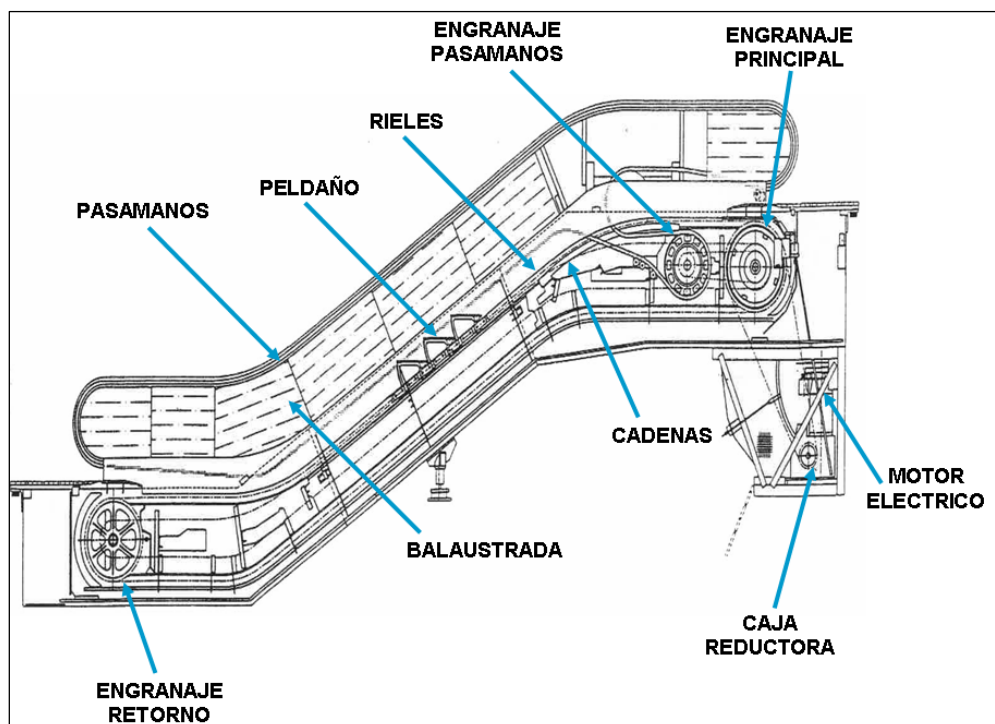


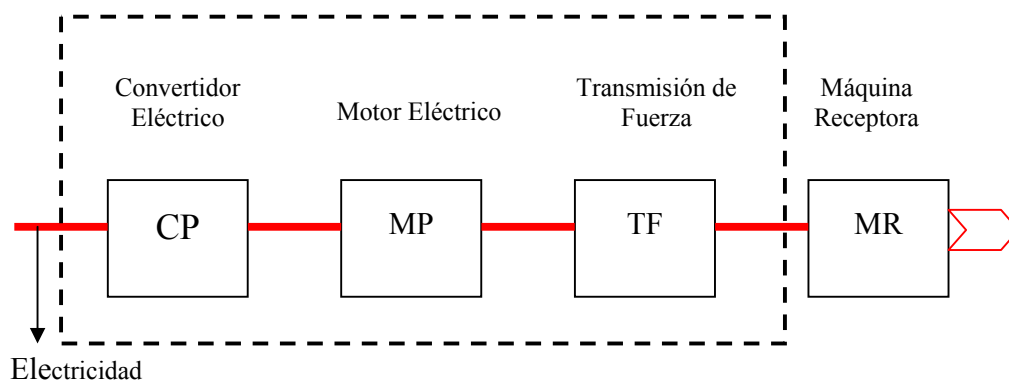
fig.6 Partes principales de una Escalera mecánica

En la figura 6 podemos observar las partes principales de una escalera mecánica

Sistema de Accionamiento que tiene como objetivo principal hacer funcionar las partes móviles de las escaleras mecánicas del Metro de Caracas, lo Cual esta Compuesto por tres subsistemas: Convertidor Eléctrico, Motor Eléctrico, Transmisión Mecánica.

El Convertidor eléctrico hace compatible al Motor Eléctrico y la fuente de Energía mediante acondicionamiento de la energía eléctrica en valore fija a variable, mediante Convertidores electrónicos e inversores electrónicos, actúa también las protecciones (seguridad ante errores o inconvenientes por ejemplo, sobrecarga) además realiza toma de decisiones. El motor eléctrico recibe potencia del Convertidor y la convierte en potencia mecánica que le da movimiento a la transmisión. Por su parte la Transmisión Mecánica conduce la potencia mecánica que fluye entre el motor primario y la máquina receptora hace compatible al motor eléctrico y la Máquina Receptora, transforma y conduce la potencia mecánica que fluye entre el motor primario y la máquina receptora. La máquina receptora realiza la función básica para la cual ha sido construido el equipo, en este caso hacer funcionar el sistema móvil de las escaleras mecánicas.

Accionamiento Electromecánico



(Datos sobre el reductor de velocidad) 1:24

Convertidor de frecuencia: De las 203 (64%) del total de la escaleras mecánicas de las líneas del Metro (320), la empresa de servicio técnico Schindler y el metro de caracas

existen 52(26%) escaleras, mecánicas modernizadas y nuevas, de doble tracción (dos motores de 11 kW, 15 kW), simple de 11 kW o de 15 kW con variadores de frecuencia, para regular la velocidad de las escaleras mecánicas con las siguientes características.

Transmisor de fuerza: elemento mecánico de interconexión entre el eje del motor y la maquina receptora, con una relación de 1:24, marca Flender, disposición de los ejes en forma perpendicular

Datos técnicos del variador de frecuencia

| | |
|--|--|
| Tensiones de red | 208–240 V; 380–500 V, 525–690 V -15% a +10% |
| Frecuencia de red | 45–66 Hz |
| Tensión de salida | 0–tensión de red |
| Intensidad de salida | I_H continuo sobrecarga: 1,5 x I_H (1 min./10 min.) |
| Intensidad de arranque | 2,0 x I_H |
| Frecuencia de salida | 0–320 Hz |
| Frecuencia de conmutación | 1–16 kHz |
| Temperatura ambiente de funcionamiento | -10 °C a +50 °C |
| Grado de protección | IP 54 |

2.3 Caracterización de las estaciones.

Estación de Pasajeros Altamira

Ubicada en la parte este de la ciudad en la línea 1, compuesta por 6 acceso, 1 andén central y 1 mezzanina, en la actualidad atiende una demanda de usuarios en promedio de 13000 diarios, contiene 8 escaleras mecánicas, denominadas E-1, E-2A, E-2B, E-5A, E-5B, E-6, E-15, E-16, 6 de estas colocadas entre los niveles de acceso y mezzanina, con doble motor de tracción, las restantes están entre los niveles de mezzanina y anden, cada una con una unidad de tracción . La escalera E-15 es objeto de medición para el estudio en esta estación.

Estación de Pasajeros Miranda

Ubicada en la parte este de la ciudad en la línea 1, compuesta por 5 acceso, 1 andén central y 1 mezzanina en la actualidad atiende una demanda promedio de usuarios diarias de 24000, contiene 7 escaleras mecánicas, denominadas E-1, E-2A, E-2B, E-4, E-15, E-16, E-17, con doble motor de tracción . 4 de estas colocadas entre los niveles de acceso y mezzanina, las restantes están entre los niveles de de mezzanina y anden con una unidad de tracción. La escalera E-15 es objeto de medición para el estudio, en esta estación

Estación de Pasajeros Los Cortijos

Ubicada en la parte este de la ciudad en la línea 1, compuesta por 6 acceso, 1 andén central y 1 mezzanina, en la actualidad atiende una demanda promedio de usuario de 48000, contiene 7 escaleras mecánicas, denominadas E-1,E-2, E-3, E-4A,E-4B E- 15, E-16, con doble motor de tracción 5 de estas colocadas entre los niveles de acceso y mezzanina, las restantes están entre los niveles de mezzanina y anden, con una unidad de tracción. La escalera E- 4B, de doble tracción 11*2Kw, 107 peldaño. La escalera E-16, con simple tracción de 15Kw y variador de frecuencia son objeto de medición para el estudio, en esta estación

Estación de Pasajeros Capuchino

Ubicada en la parte centro norte de la línea 2 con transferencia a la línea 4 de la ciudad, compuesta por 4 accesos, 2 andenes laterales y 1 mezzanina, en la actualidad atiende una

demanda de usuarios en promedio de 15000, contiene 8 escaleras mecánicas, denominadas E-1, E-2, E-3A, E-3B, con doble motor de tracción E-7, E-8, E-9, E-10, con simple motor de tracción, 4 de estas colocadas entre los niveles de accesos y mezzanina, las restantes están entre los niveles de mezzanina y anden.

La escalera E-3A, con características técnicas siguiente: tracción 15*2Kw, sin variador de frecuencia, 120 peldaño o escalones, la E-3B, de doble tracción 15*2Kw, con variador de frecuencia, 120 peldaño o escalones, E-7, tracción simple de 15Kw, sin variador de frecuencia, con 79 peldaño y E-8, tracción simple de 15 Kw, con variador de frecuencia, 79 peldaños, son objeto de medición para el estudio, en esta estación

Estación de pasajeros Mamera

Ubicada en la parte sur oeste de la línea 2 de la ciudad, compuesta por 2 acceso, 1 andén central y 1 mezzanina en la actualidad atiende una demanda promedio de usuarios de 10000, contiene 2 escaleras mecánicas, denominadas E-15, E-16. Las dos colocadas entre los niveles de mezzanina –anden, con una unidad de tracción. En esta estación la escalera E-15, con tracción de 11Kw, con 68 peldaño, es sometida a medición, para el estudio.

Es de hacer notar que todas las estaciones nombradas anteriormente, en todos sus niveles (acceso, mezzanina, andén) contienen escaleras fijas o de concreto.

2.4 Planificación del trabajo experimental.

Para desarrollar el trabajo de campo, fueron seleccionadas 8 escaleras ubicadas en 3 estaciones (Capuchinos, Cortijos y Mamera), que forman parte del total de las 52 escaleras a las cuales se les han instalado convertidores de frecuencia, para la racionalización de energía en estos equipos. Fue escogida una estación de alto tránsito de pasajeros (Capuchinos), otra de tránsito moderado (Cortijos) y una de poco tránsito (Mamera). En todas estas estaciones están instaladas escaleras semejantes.

Colocando el registrador de energía a la entrada del sistema eléctrico de alimentación eléctrica de la escalera mecánicas se miden los parámetros eléctricos (tensiones, corrientes, potencias factor de potencia y distorsión armónicas), esto se realiza extrayendo

del equipo antes mencionado las pinzas amperimétricas y voltimétricas, colocándolas en sus respectivas fases y tomar un registro de medidas por un tiempo de 24 horas, para luego retirar el equipo y procesar las medidas mediante software adecuado.

Cámara termográfica, cámara de infrarrojo, que dirige el láser, al lugar de interés, tomado una imagen térmica, que de acuerdo a código de colores, (gris, blanco, amarillo, rojo verde, azul,) que puede arrojar punto caliente, producto de una conexión floja o una sobrecarga, se toma decisión del equipo, que fue sometido a medida o inspección termográfica

Para el estudio en la estación Capuchinos, se seleccionaron (4) escaleras de las (9) que tiene esta estación, dos en nivel de andén, una con variador de frecuencia de 15kW, y la otra, de igual potencia pero sin variador de frecuencia, las otras dos restantes, en nivel de mezzanina a calle, con dos unidades de fracción de 15kW, una con variador de frecuencia y la otra sin variador de frecuencia.

2.5 – Características de los equipos de medición empleados.

En las mediciones eléctricas que realizan con un equipo eléctrico, se emplea un analizador de redes eléctricas trifásicas compuesto por tres pinzas amperimétricas y cuatro pinzas o puntas voltimétricas, módulos de memoria portátil, módulo de recepción de las medidas, en donde se obtienen los parámetros eléctricos, relacionado con el tema de estudio.

Característica del analizador de redes.

Tensión de alimentación 120volt, 60Hz

Características de las pinzas:

Gama de medición

De 0,1 a 1200.

Gama de frecuencia

De 30 Hz a 10kHz.

Relación:

1000A/1Vrms.

Precisión:

200...1000A <0,5% <0.5error de ángulo

50... 200A <0,75% <0,75° error de ángulos

10...50A <1,5 % <1.5° error de ángulos

Características de la cámara termográfica

Marca FLIR modelo PM 595

Conclusiones.

1.- Las escaleras seleccionadas para el muestreo corresponden a estaciones de alto flujo de usuarios, flujo medio y bajo flujo.

2.- El método de medición empleado garantiza el registro de las corrientes, tensiones, potencias y otras magnitudes eléctricas, con intervalos entre 1y 2 minutos, durante las 18 horas de trabajo diario de las escaleras, por lo que se garantiza una buena observación del comportamiento en el tiempo de las magnitudes estudiadas.

Capítulo III. Resultados y discusión

Introducción.

En este capítulo se exponen los principales resultados del trabajo referidos al comportamiento de las corrientes, tensiones y potencias de los accionamientos de las escaleras objeto de estudio. Se determina el tiempo promedio de trabajo de los variadores de frecuencia y se evalúa el impacto de los mismos desde el punto de vista energético y económico.

3.1- Comportamiento de las corrientes, tensiones y potencias en los accionamientos de las escaleras objeto de estudio.

3.1.1.- Escaleras de la estación Mamera.

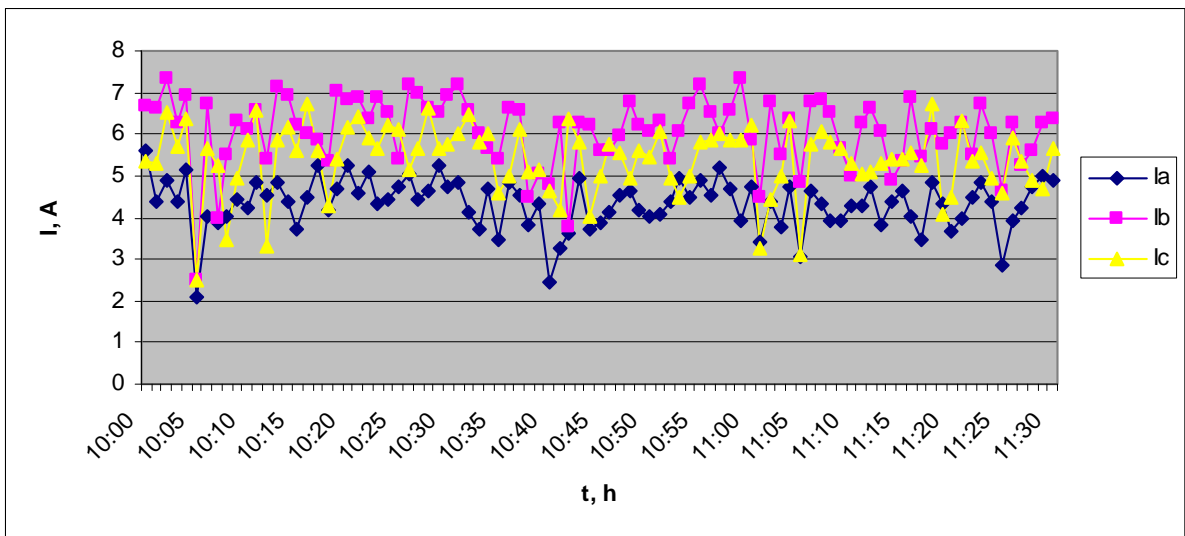


Fig. 1.3 Comportamiento de las corrientes en el accionamiento de la escalera E-15, en el horario de 10.00 a 11:30 am.

En el horario de la mañana, las corrientes de línea que demanda el motor oscilan entre 4 y 7 A (fig.1.3), observándose una cierta diferencia entre las mismas, motivada por la asimetría de las tensiones de fase (fig. 3.1 en ANEXO 1). En los horarios de la tarde y la noche estas corrientes se incrementan notablemente con un ligero incremento de la carga (fig. 1.1 y 2.1 en ANEXO 1.), esta última oscila alrededor de los 2,5 kW en el horario de la mañana y en

la tarde y la noche fluctúa mayormente entre los 3 los 3,5 kW, lo que representa aproximadamente el 32 % de la carga nominal del motor (ver fig. 2.3). Las tensiones todo el tiempo están por encima del valor nominal aunque no más allá de un 5 %, lo que es perfectamente tolerable.

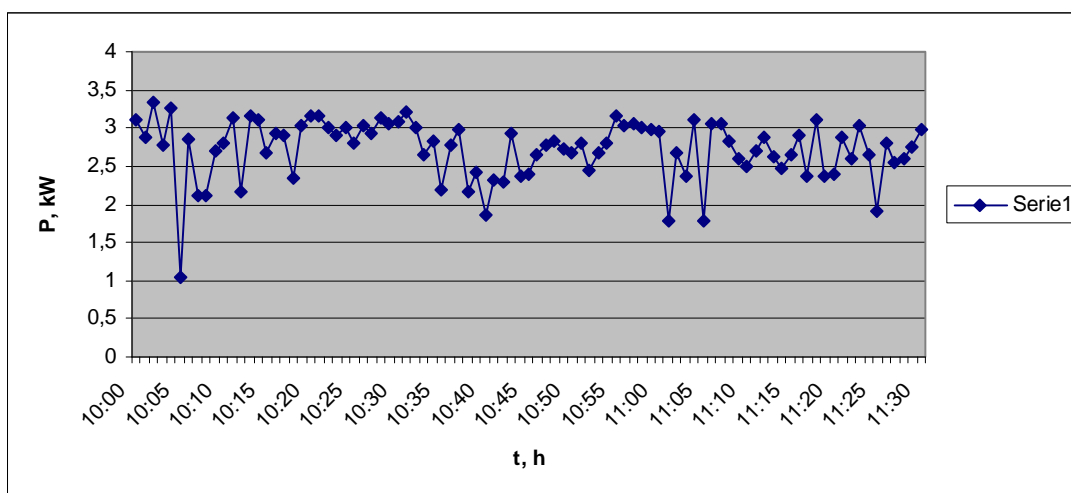


Fig. 2.3 Comportamiento de la carga en el horario de las 10:00 a las 11:30 am.

3.1.2.- Escaleras de la estación Cortijos.

Se observa que, en el horario de la mañana las corrientes oscilan alrededor de los 15 A (fig. 3.3) y que durante el resto del tiempo de trabajo de la escalera mantienen este mismo comportamiento, aunque la corriente de la fase A, siempre es inferior a las otras dos (fig. 1.2 y 2.2 en ANEXO 2), lo que está en correspondencia con el valor de la tensión de la fase B, que se queda aproximadamente en 2 V, por debajo de las otras dos tensiones de fase (fig. 4.3). Las tensiones siempre se encuentran por encima del valor nominal, alcanzándose valores de hasta un 8 %. Como se aprecia en la fig. 5.3, la carga de la escalera durante la mañana es baja y alcanza valores ocasionales entre los 5 y los 6 kW, aunque se observan picos que alcanzan hasta lo 10 kW. Ya en los horarios de la tarde y la noche, los niveles de carga oscilan entre los 7 y los 8 kW, lo que representa aproximadamente un 53 % de la carga nominal del motor. Durante el trabajo sin usuario de la escalera la potencia demandada por el accionamiento es de 2,81 kW, lo que representa el 19 % de la potencia nominal del motor.

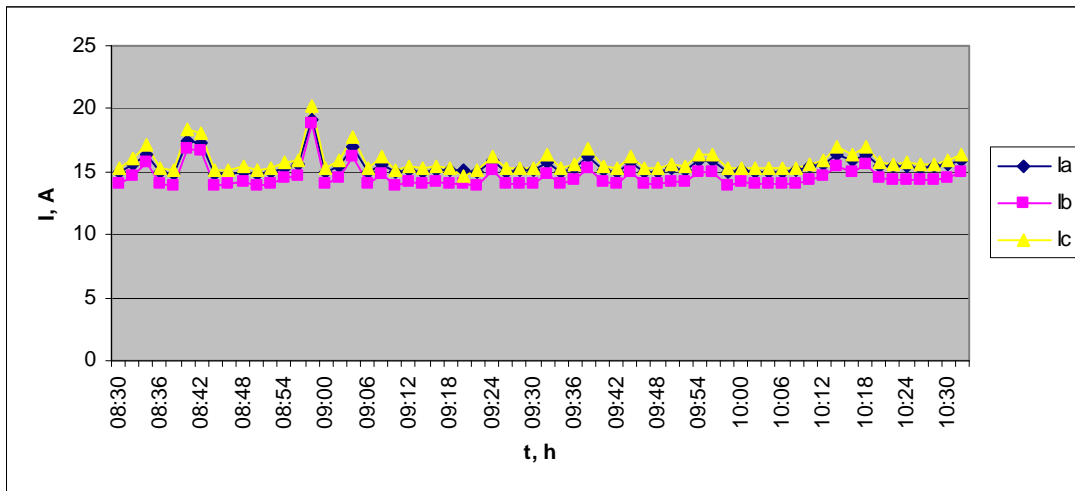


Fig. 3.3 Comportamiento de las corrientes en el accionamiento de la escalera EM-16, funcionando con el variador desconectado, en el horario de 8:30 a 10:30 am.

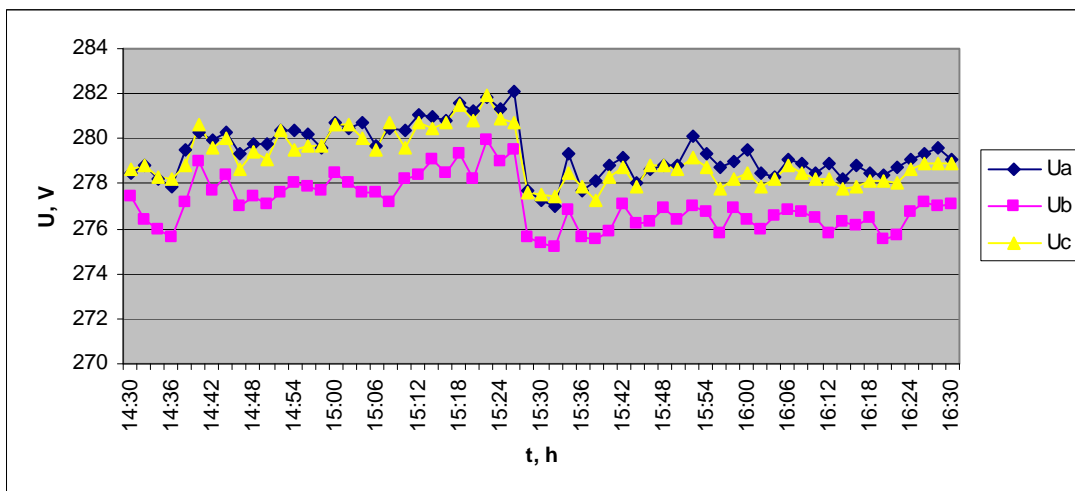


Fig. 4.3 Comportamiento de las tensiones en el accionamiento de la escalera EM-16, funcionando con el variador desconectado, en el horario de las 14:30 a las 16:30.

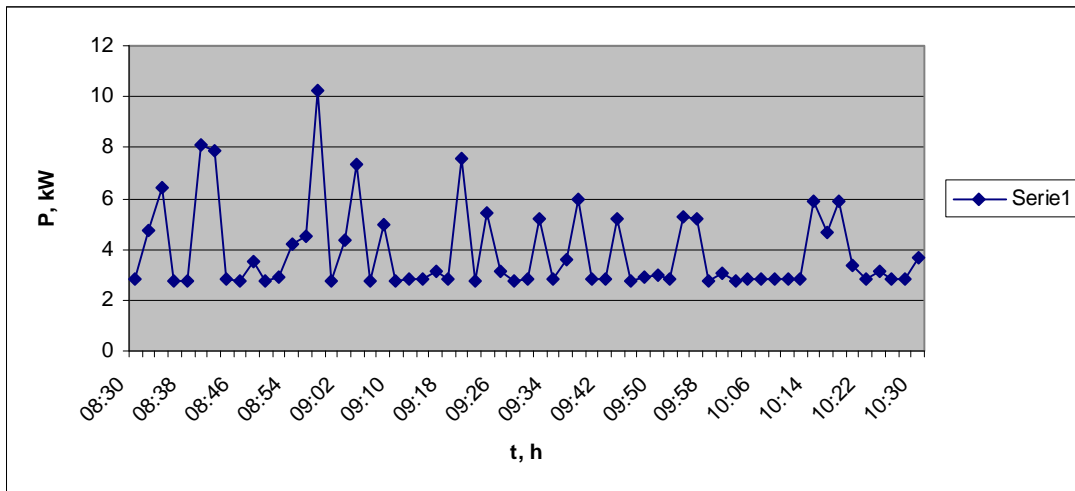


Fig. 5.3 Comportamiento de las potencias en el accionamiento de la escalera EM-16, funcionando con el variador desconectado, en el horario de las 8:30 a las 10:30 am.

Cuando la escalera EM-16 funciona con el variador de frecuencia conectado, las corrientes en las fases A y B, disminuyen a 2,2 y 1,2 A respectivamente, mientras que la corriente en la fase C se mantiene alrededor de los 8 A, (ver en ANEXO 2, fig. 5.2; 6.2 y 7.2.) Al comparar el comportamiento de las corrientes que se muestra en las figuras 9.3 y 16.3 se observa un comportamiento análogo de las corrientes esté o no conectado el variador de frecuencia, cuando hay presencia de usuarios en la escalera.

Como se aprecia en la fig. 6.3 y 7.3 las tensiones de fase superan los 310 V en la mañana y la tarde lo que representa un 19 % por encima de la tensión nominal del motor, valor inadmisibles según las normas tanto para el variador como para el propio motor.

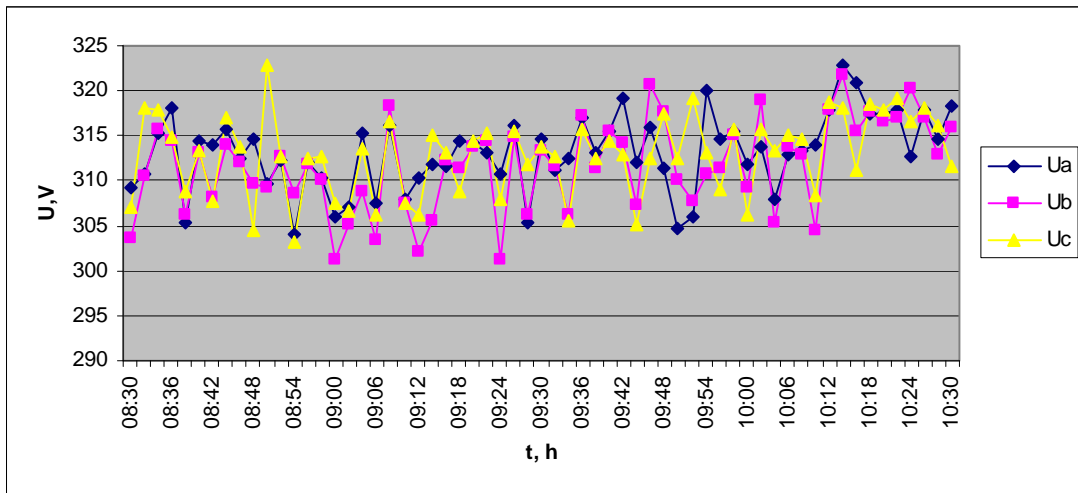


Fig. 6.3 Comportamiento de las tensiones en el accionamiento de la escalera EM-16, funcionando con variador en el horario de las 8:30 a las 10:30 am.

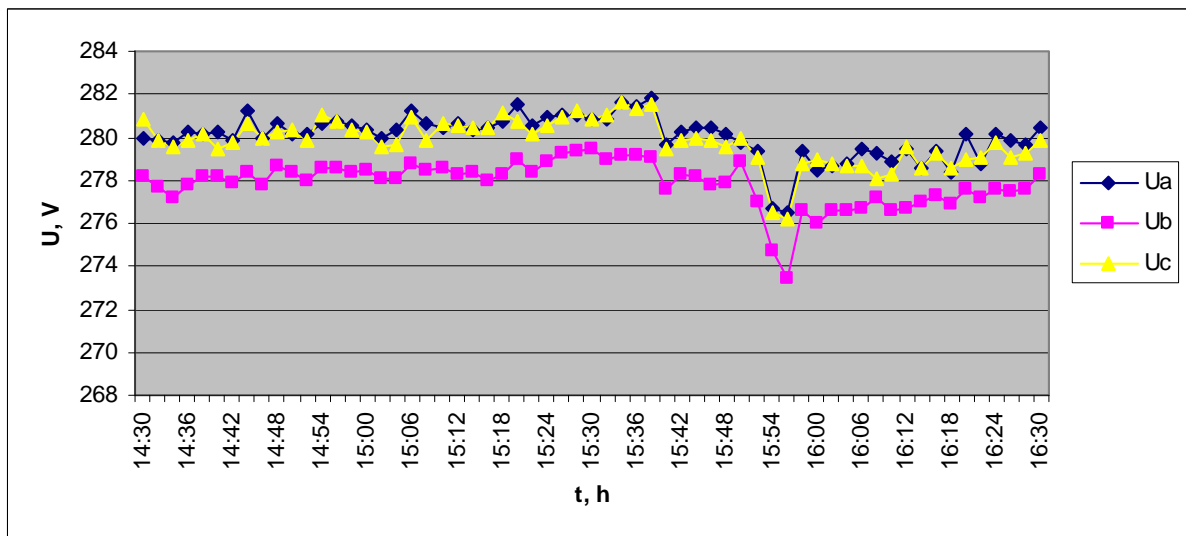


Fig. 7.3 Comportamiento de las tensiones en el accionamiento de la escalera EM-16, funcionando con variador en el horario de las 14:30 a las 16:30.

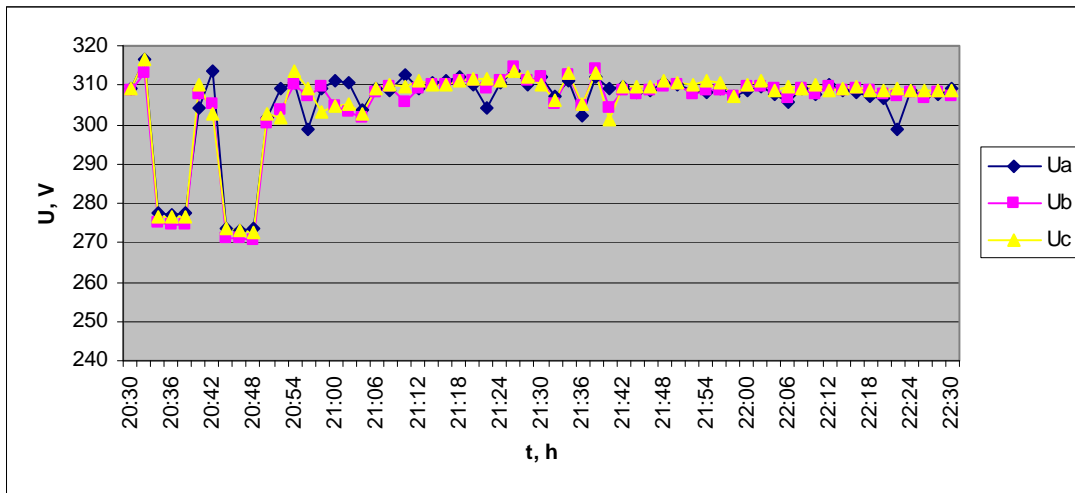


Fig. 8.3 Comportamiento de las tensiones en el accionamiento de la escalera EM-16, funcionando con variador en el horario de las 20:30 a las 22:30.

Como se aprecia en la fig. 9.3, la carga en el horario de la mañana es baja y se incrementa en el horario de la tarde, donde oscila entre 7,2 y 8 kW, para un % de la potencia nominal del motor. En el horario de la noche la escalera funciona prácticamente sin carga (ver fig. 10.3).

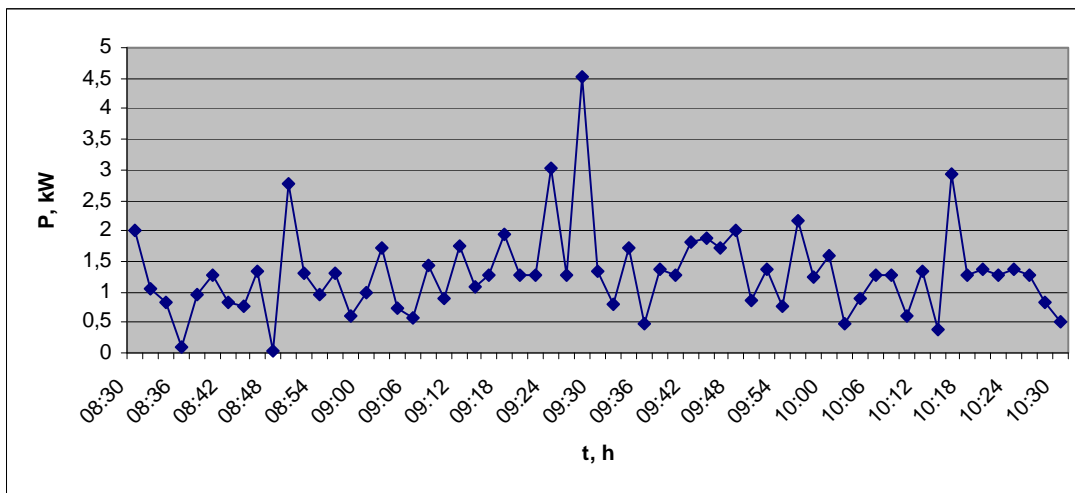


Fig. 9.3 Comportamiento de la carga en el accionamiento de la escalera EM-16, funcionando con variador en el horario de las 8:30 a las 10:30 am.

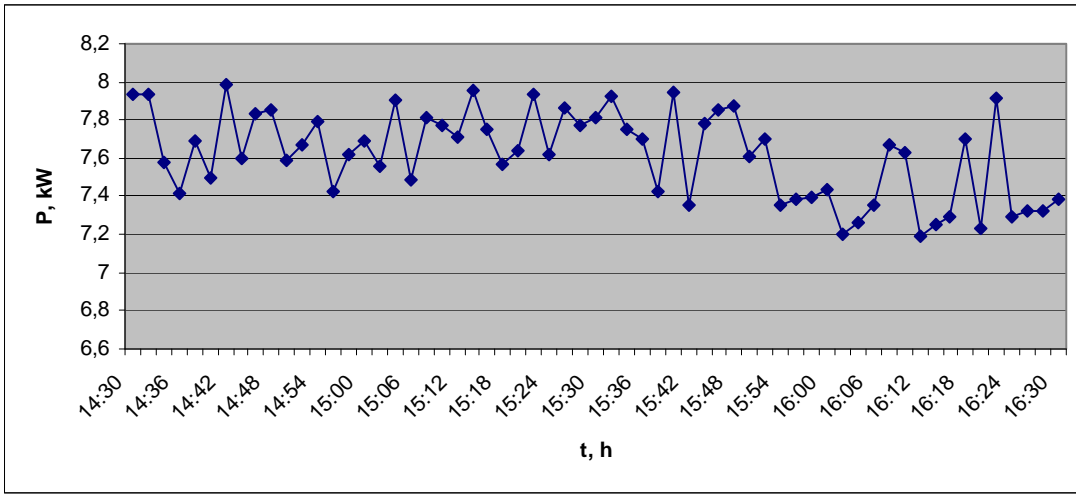


Fig. 10.3 Comportamiento de la carga en el accionamiento de la escalera EM-16, funcionando con variador en el horario de las 14:30 a las 16:30.

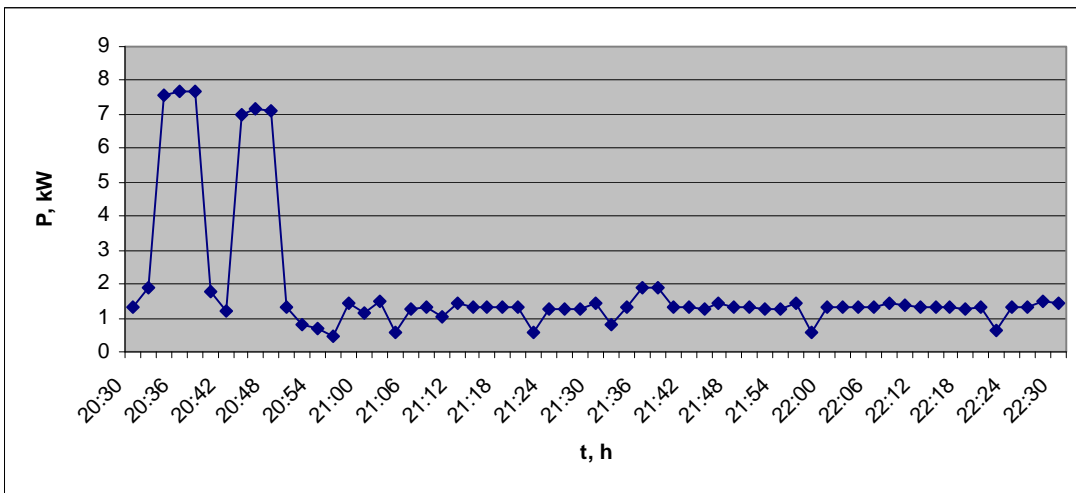


Fig. 11.3 Comportamiento de la carga en el accionamiento de la escalera EM-16, funcionando con variador en el horario de las 14:30 a las 16:30.

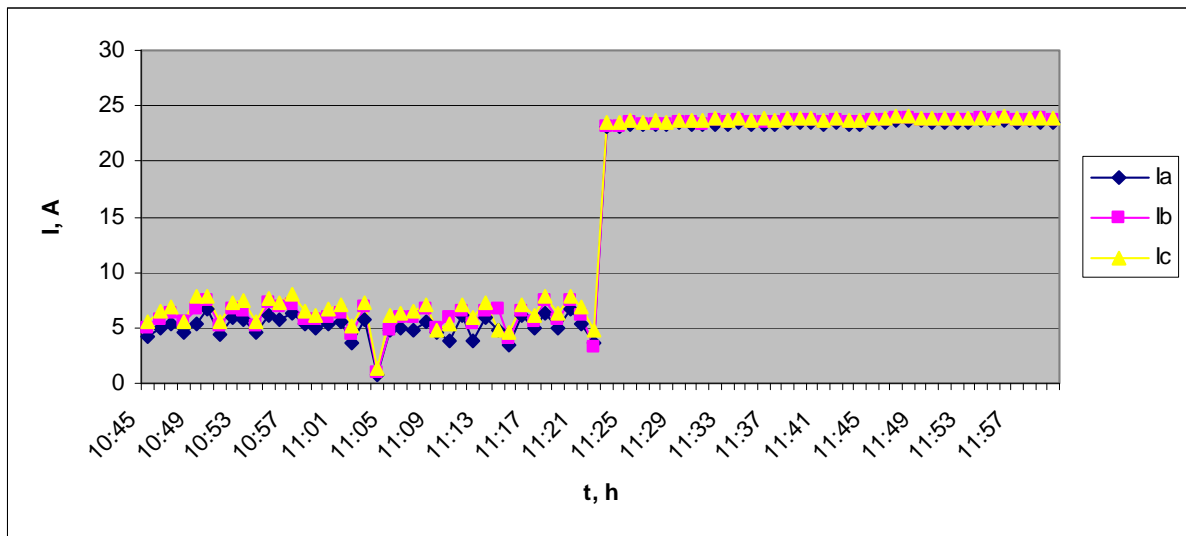


Fig. 12.3 Comportamiento de las corrientes en el accionamiento de la escalera 4B, funcionando con el variador, en el horario de 10:45 a 12:00 m.

La carga en esta escalera mantiene el mismo comportamiento durante el todo el día, (fig. 13.3) ; aunque se incrementa ligeramente en la mañana y la noche con respecto a la tarde. El valor medio es de 3,4 kW y el máximo de 4,5 kW, lo que indica que los motores en esta escalera funcionan aproximadamente al % de sus potencias nominales. Los niveles de carga son mayores a los de la escalera E-16, en la mañana y la noche, mientras que en la tarde se invierte esta relación, pues la mayor parte de los usuarios que se desmontan de los trenes utilizan la escalera E-16, que comunica el andén con la mezzanina, mientras que ya en la mezzanina, el flujo de usuarios se comparte entre la escalera fija y la E-4B.

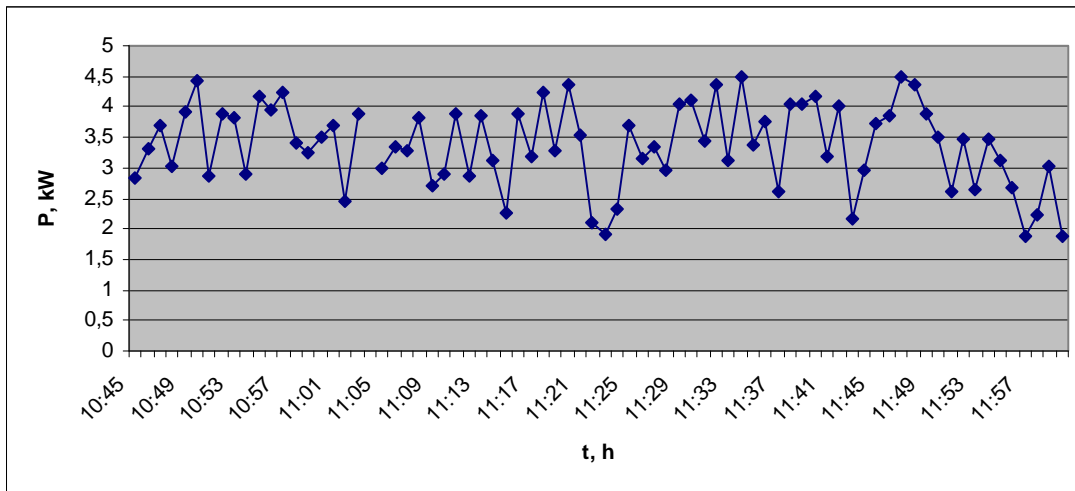


Fig. 13.3 Comportamiento de la carga en el accionamiento de la escalera 4B, en el horario de las 10:45 a las 12:00 m.

3.1.3.- Escaleras de la estación Altamira.

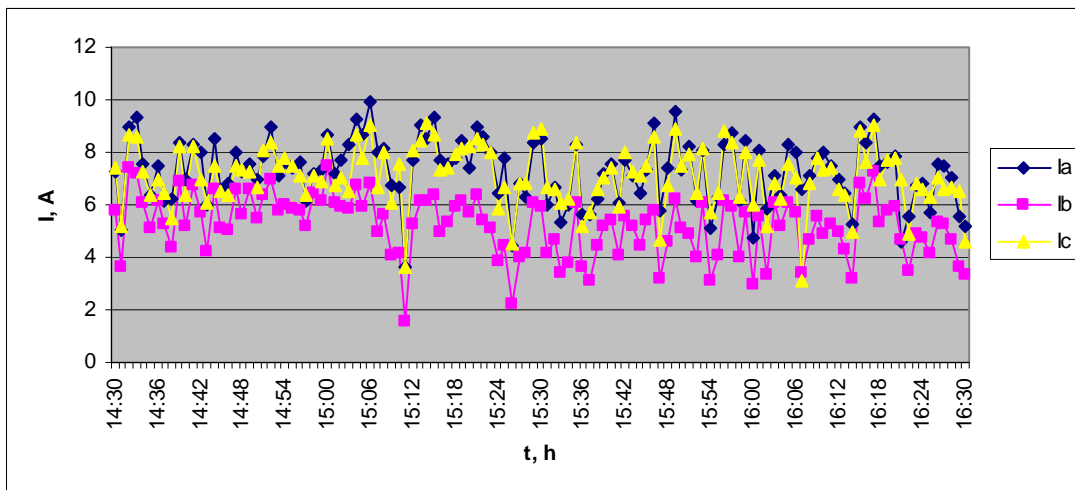


Fig. 14.3 Comportamiento de las corrientes en el accionamiento de la escalera 2B, en el horario de las 14:30 a las 16:30.

La escalera E-2B de la estación de Altamira es semejante a la E-4B de Cortijos, y el comportamiento de las corrientes, tensiones y potencias también se asemejan, sólo que en esta última el nivel de carga es algo mayor, fundamentalmente en la noche (ver fig. 16.3 y fig. 3.3, 4.4 en ANEXO 3).

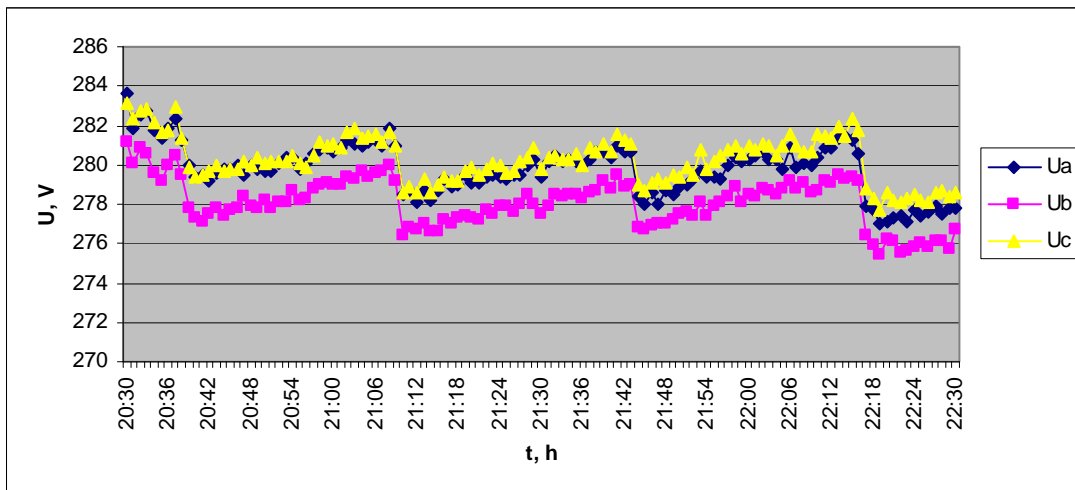


Fig. 15.3 Comportamiento de las tensiones en el accionamiento de la escalera 2B, en el horario de las 20:30 a las 22:30.

La carga media oscila entre los 4 y los 5 kW durante la mañana y la tarde y tiende hacia los 5 kW en el horario de la noche, de modo que el nivel de carga de los motores no sobrepasa el 23 % de la potencia nominal.

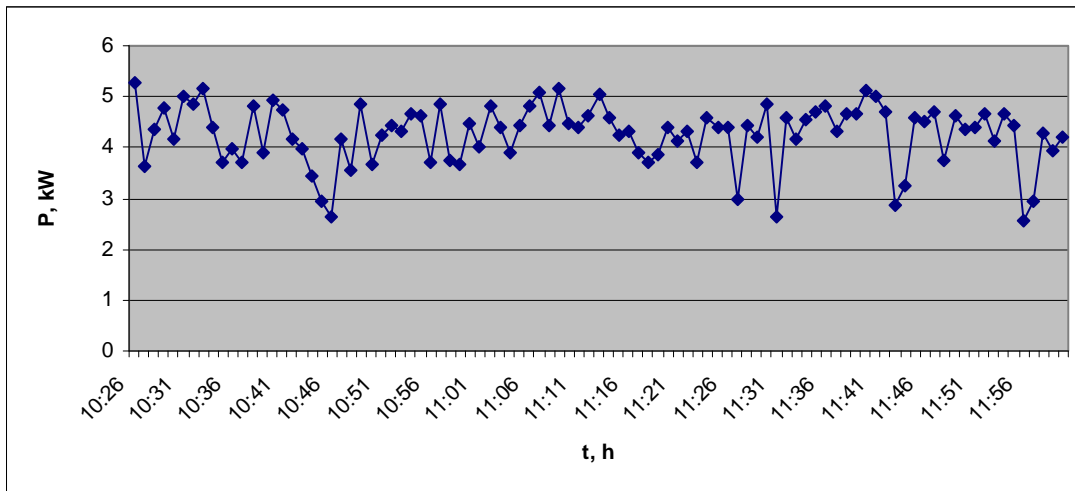


Fig. 16.3 Comportamiento de la carga en el accionamiento de la escalera 2B, en el horario de las 10:30 a las 12:00 m.

3.1.4.- Escaleras de la estación Miranda.

El comportamiento de las corrientes y tensiones (figuras 17.3 y 18.3) y de las potencias (fig. 19.3; y fig. 2.4 y 3.4 en ANEXO 4) en el accionamiento de la escalera E-15 de Miranda, reflejan que en esta escalera hay un bajo nivel de usuario, prácticamente durante todo el día y sólo se observan valores relativamente altos en el horario de la mañana, cuando se alcanzan valores de potencia entre los 6 y los 7 kW, de modo que el motor en determinados instantes logra trabajar aproximadamente al 64 % de potencia nominal, mientras que la mayor parte del tiempo trabaja prácticamente en vacío.

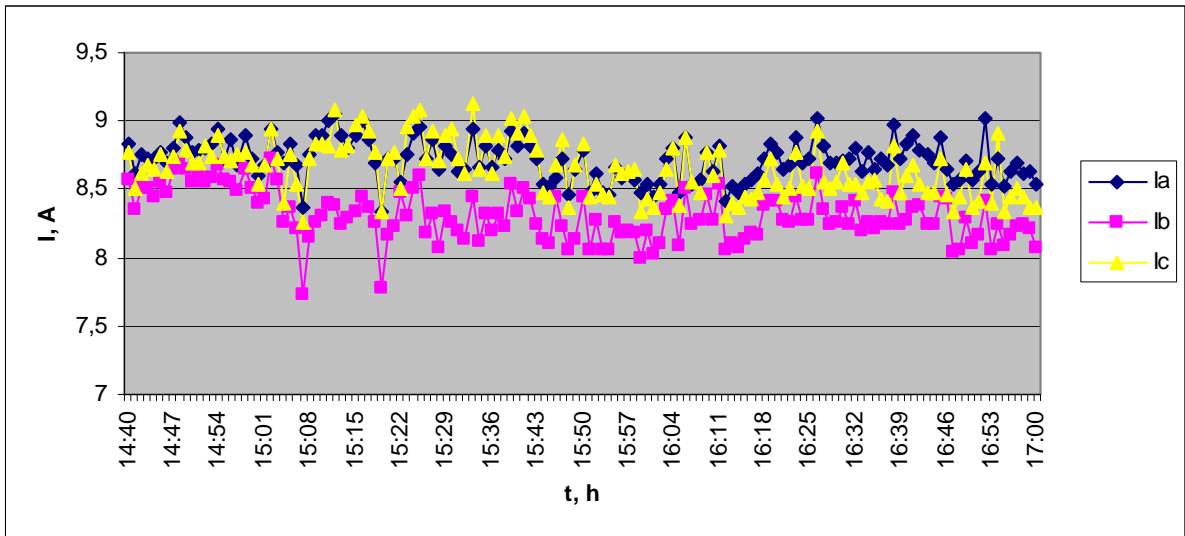


Fig. 17.3 Comportamiento de las corrientes en el accionamiento de la escalera 15, en el horario de las 14:30 a las 17:00.

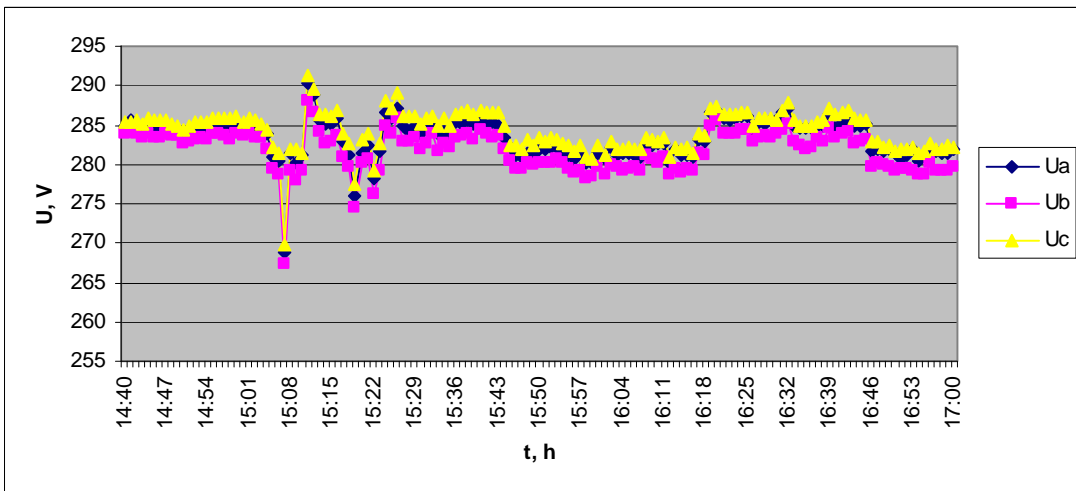


Fig. 18.3 Comportamiento de las tensiones en el accionamiento de la escalera E-15, en el horario de las 14:40 a las 17:00

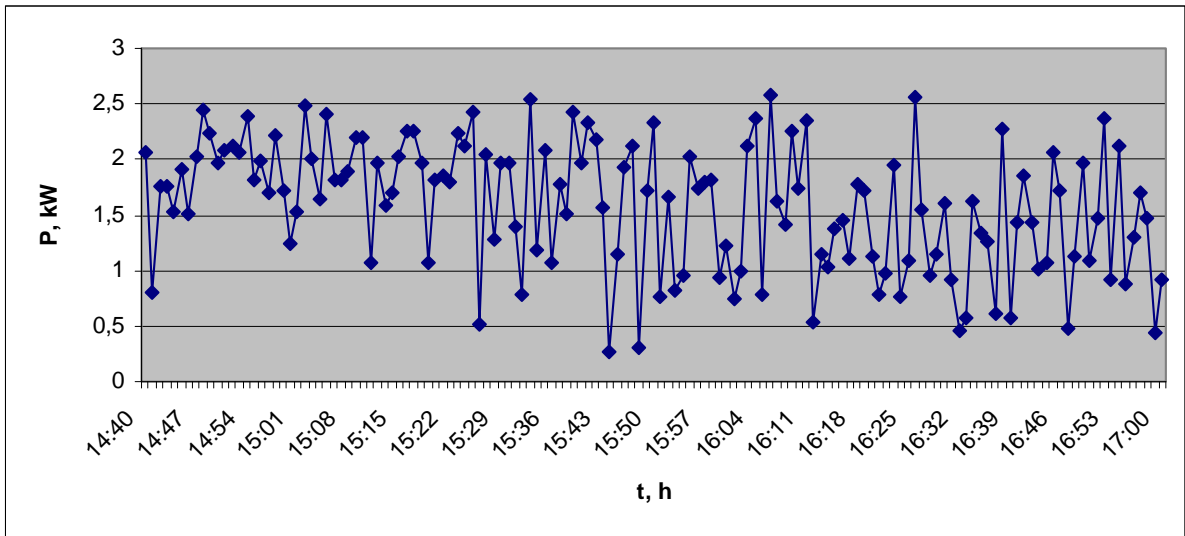


Fig. 19.3 Comportamiento de la carga en el accionamiento de la escalera 15, en el horario de las 14:40 a las 17:00.

3.1.5.- Escaleras de la Estación Capuchinos

En las figuras 20.3 y 21.3 se observa cómo se reducen las corrientes en el accionamiento del motor, de un valor medio de 8 A aproximadamente 2 A, cuando actúa el variador de frecuencia, en los momentos en que no hay usuarios presentes. A partir de las 21:30 se observa que las corrientes en el motor aumentan bruscamente hasta alcanzar los 25 A de forma sostenida, esto se debe a que en ese instante, dado un aumento de la carga han comenzado a trabajar los dos motores del accionamiento, sin embargo la demanda no ha llegado a los 15 kW (ver fig. 4.5, ANEXO 2)

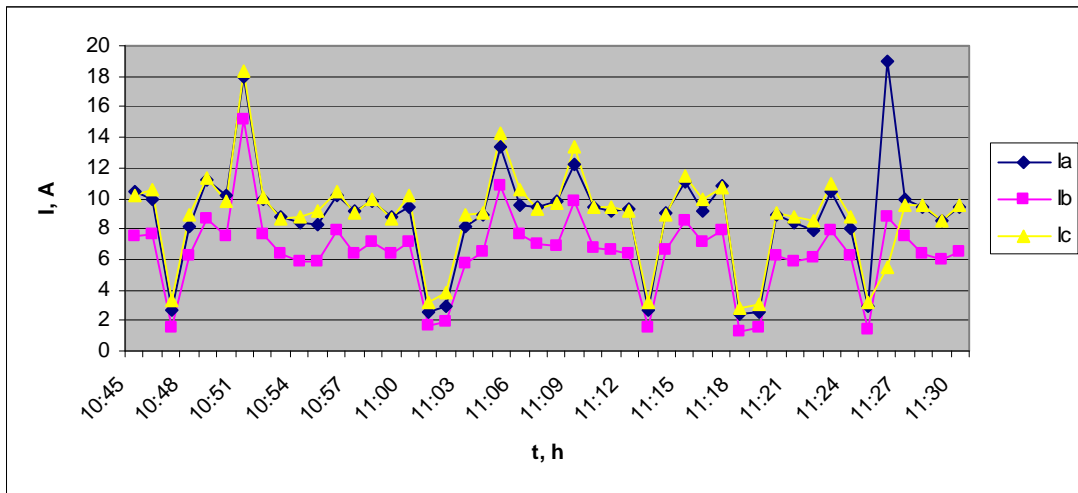


Fig. 20.3 Comportamiento de las corrientes en el accionamiento de la escalera E-3A, con el variador desconectado, en el horario de las 10:45 a las 11:30 am.

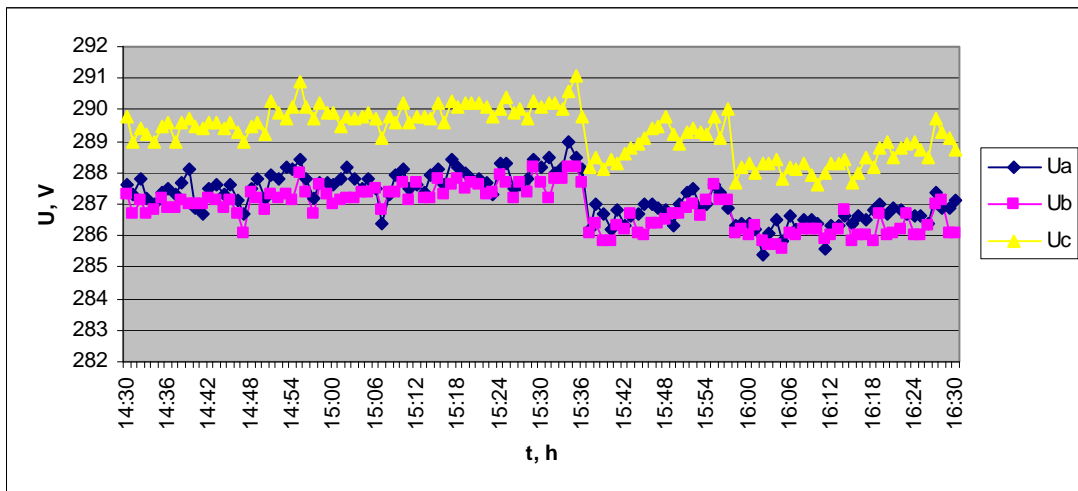


Fig. 21.3 Comportamiento de las tensiones en el accionamiento de la escalera 3A, en el horario de las 14:30 a las 16:30.

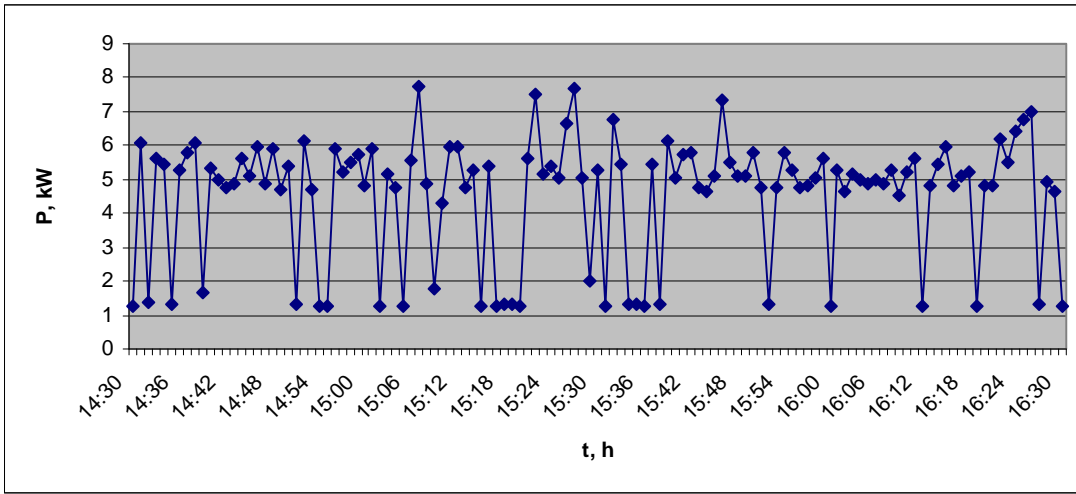


Fig. 22.3 Comportamiento de la potencia en el accionamiento de la escalera 3A, en el horario de las 14:30 a las 16:30.

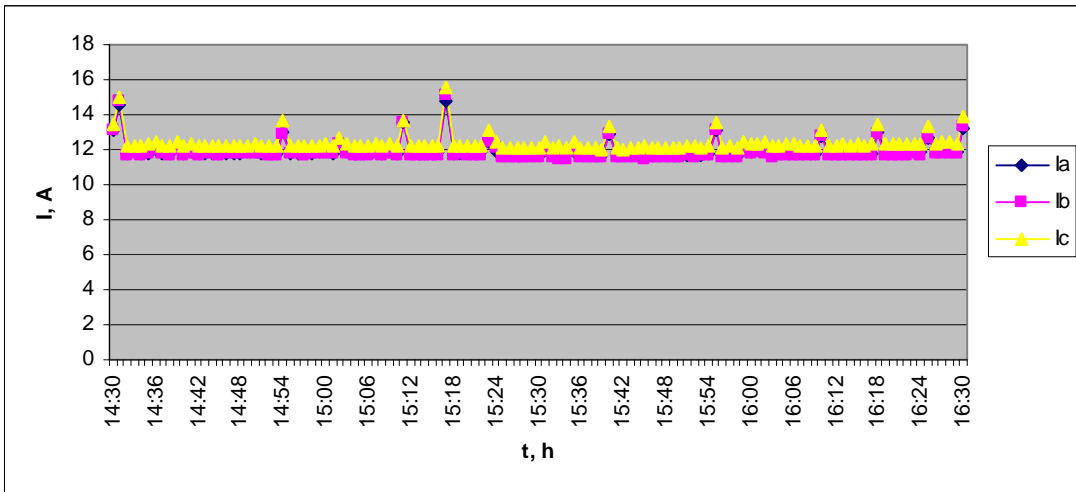


Fig. 23.3 Comportamiento de las corrientes en el accionamiento de la escalera EM-7, en el horario de las 14:30 a las 16:30.

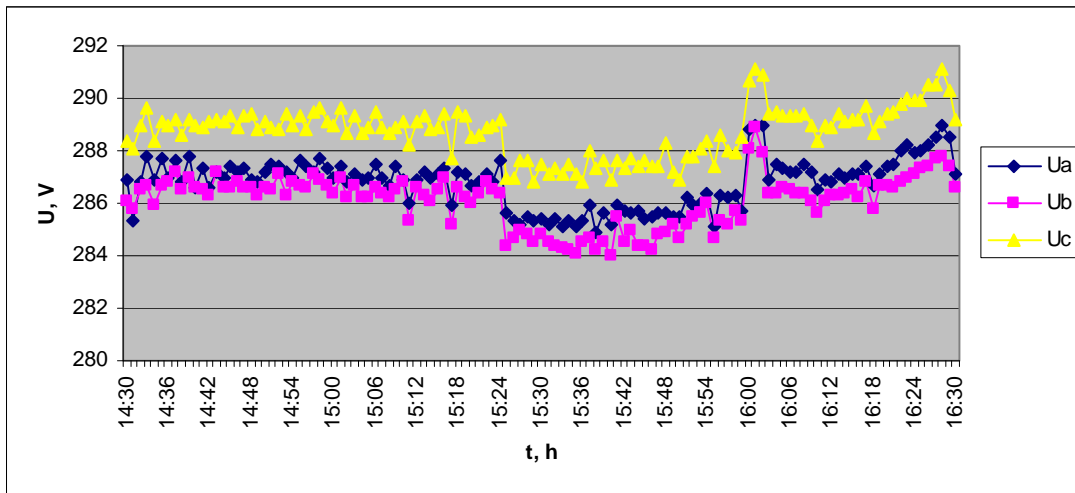


Fig. 24.3 Comportamiento de las tensiones en el accionamiento de la escalera EM-7, en el horario de las 14:30 a las 16:30.

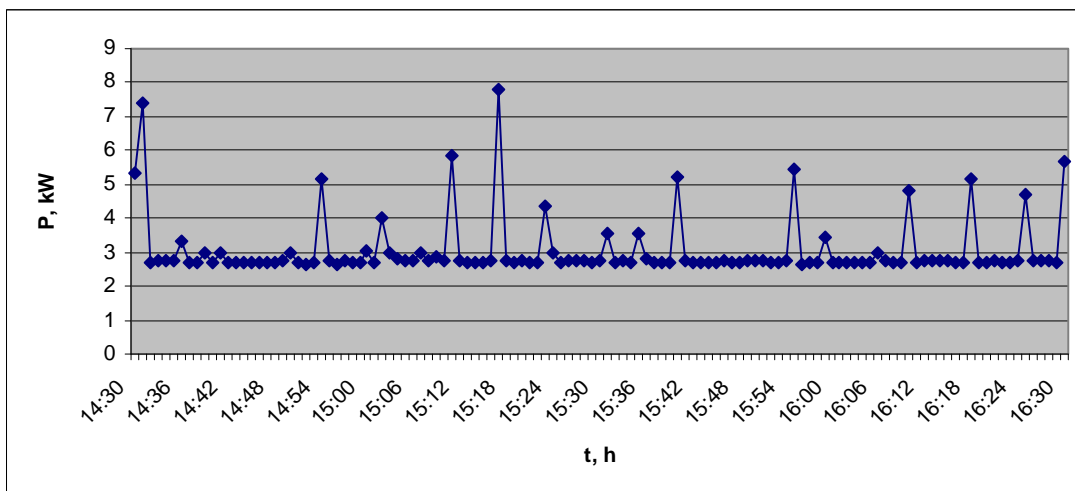


Fig. 25.3 Comportamiento de la carga en el accionamiento de la escalera EM-7, en el horario de las 14:30 a las 16:30..

3.2 Evaluación de la efectividad de los variadores de frecuencia.

Como se observa en las tablas 1.3 y 2.3, las escaleras de las estaciones Capuchinos y Cortijos, ubicadas entre los andenes y las mezanines, permanecen funcionando sin usuarios

durante un tiempo significativo, que es aprovechado por los variadores de frecuencia para disminuir la velocidad de las escaleras y con ello disminuir también el consumo de energía eléctrica.

Tabla 1.3 Comportamiento con carga de las escaleras simples de 15 kW.

| Escalera | Ubic | Pelda | Pm, kW | Desv | Pmax, kW | Pmin, kW | T trabajo, h | T, trabajo, % |
|----------|---------|-------|--------|-------|----------|----------|--------------|---------------|
| EM-7 | Cap (A) | 79 | 4,279 | 1,137 | 6,45 | 2,68 | 10,8 | 60 |
| EM-8 | Cap (A) | 79 | 3,27 | 1,23 | 7,56 | 0,92 | 10,28 | 57 |
| EM-16 | Cor (A) | 74 | 3,12 | 2,33 | 12,21 | 1,01 | 11,9 | 66 |

Tabla 2.3 Comportamiento sin carga y con variador de frecuencia de las escaleras simples de 15 kW.

| Escalera | Ubic | Pm, kW | Desv | Pmax, kW | Pmin, kW | T trabajo, h | T, trabajo, % |
|----------|---------|--------|------|----------|----------|--------------|---------------|
| EM-8 | Cap (A) | 0,90 | 0,04 | 0,98 | 0,67 | 7,72 | 43 |
| EM-16 | Cor (A) | 0,86 | 0,02 | 0,92 | 0,67 | 6,1 | 34 |

Como se observa en la tabla 3.3, en el caso en que la escaleras de las estaciones de Capuchinos y Cortijos ubicadas entre los andenes y las mezanines, funcionan sin la

operación del variador de frecuencia, cuando no hay usuarios sobre las mismas, entonces la demanda promedio de potencia del accionamiento es de 2,70 kW y se diferencia aproximadamente en 1,8 kW respecto al caso en que actúa el variador y he aquí la esencia del ahorro energético que puede lograrse con la presencia de este dispositivo.

Tabla 3.3 Comportamiento de las escaleras simples de 15 kW, sin variadores de frecuencia trabajando sin carga.

| Escalera | Ubic | Pm, kW | Desv | Pmax, kW | Pmin, kW | T trabajo, h | T, trabajo, % |
|----------|---------|--------|-------|----------|----------|--------------|---------------|
| EM-7 | Cap (A) | 2,70 | 0,037 | 2,83 | 2,60 | 7,2 | 40 |

En el caso de las escaleras duplex de 15 kW, de la propia estación Capuchinos y que se encuentran ubicadas entre la mezanina y el acceso hacia la calle, se observa que tienen un mayor tiempo de trabajo con usuarios, durante la jornada diaria de funcionamiento del Metro, con respecto a las simples que están ubicadas entre el andén y la mezanina (ver tab.4.3). Esto se explica porque estas escaleras tienen casi el doble de longitud con respecto a las del andén y al salir de los trenes una parte de los usuarios utilizan las escaleras mecánicas pero otra parte utiliza las fijas para llegar hasta la mezanine, sin embargo, para acceder hacia la calle o viceversa, la mayoría de los usuarios utilizan estas escaleras mecánicas duplex. Aún así, las mismas muestran un tiempo determinado en que funcionan sin usuarios y que actúa el variador de frecuencia, lográndose un determinado ahorro de energía.

Dentro de la propia estación, la posición de la escalera también es un factor que determina el tiempo en que esta trabaja sin usuarios, pues como se observa en la tab. 4.3, la escalera EM-3B, permanece todo el tiempo con presencia de usuarios, al menos durante el período en que se realizó la observación.

Tabla 4.3 Comportamiento de las escaleras duplex de 15 kW, trabajando con carga.

| Escalera | Ubic | Pelda | Pm, kW | Desv | Pmax, kW | Pmin, kW | T trabajo, h | T, trabajo, % |
|----------|---------|-------|--------|------|----------|----------|--------------|---------------|
| EM-3A | Cap (M) | 120 | 5,43 | 1,19 | 12,19 | 1,26 | 15,48 | 86 |
| EM-3B | Cap (M) | 120 | 4,30 | 0,45 | 4,97 | 2,03 | 18 | 100 |

En la tabla 5.3 puede observarse que en el caso de las escaleras duplex, cuando funcionan sin presencia de usuarios y funciona el variador de frecuencia, entonces la demanda media de potencia es aproximadamente el doble que la de una escalera simple de 15 kW. La diferencia observada entre la potencia media demandada por el accionamiento sin presencia de usuarios, cuando funciona y cuando no funciona el variador de frecuencia, es de 1,41 kW.

Tabla 5.3 Comportamiento de las escaleras duplex de 15 kW, con variadores de frecuencia, trabajando sin carga.

| Escalera | Ubic | Pm, kW | Desv | Pmax, kW | Pmin, kW | T trabajo, h | T, trabajo, % |
|----------|---------|--------|------|----------|----------|--------------|---------------|
| EM-3A | Cap (M) | 1,39 | 0,27 | 2,53 | 1,12 | 2,55 | 14 |

En el caso de las escaleras simples de 11 kW, se observa también que puede existir un tiempo significativo de trabajo sin la presencia de usuarios y que permite el trabajo

ahorrador del variador, no obstante este tiempo está en función de la ubicación de la estación, pues como se observa en la tabla 6.3, la escalera EM-15 de la estación Miranda, en la línea 1, está casi todo el tiempo con la presencia de usuarios, mientras que otra escalera similar, la EM-15, de la estación Mamera ubicada en la línea 2 permanece un tiempo grande sin la presencia de usuarios. En esta estación la mayor parte de los usuarios hacen transferencia para continuar viaje hacia Los Teques y no utilizan la escalera mecánica. Los que salen hacia la calle en esa estación, o entran, utilizan también las escaleras fijas.

Tabla 6.3 Comportamiento de las escaleras simples de 11 kW, trabajando con carga.

| Escalera | Ubic | Pelda | Pm, kW | Desv | Pmax, kW | Pmin, kW | T trabajo, h | T, trabajo, % |
|----------|---------|-------|--------|------|----------|----------|--------------|---------------|
| EM-15 | Mam (A) | 68 | 3,13 | 0,12 | 3,38 | 2,27 | 10,36 | 57 |
| EM-15 | Mir (A) | 66 | 2,35 | 0,82 | 6,73 | 0,91 | 17 | 94 |

La demanda media del accionamiento de las escaleras simples de 11 kW observada durante el trabajo sin la presencia de usuarios, con variador de frecuencia y sin variador, es de 1,88 kW (ver tablas 7.3 y 8.3).

Tabla 7.3 Comportamiento sin carga y con variador de frecuencia de las escaleras simples de 11 kW.

| Escalera | Ubic | Pm, kW | Desv | Pmax, kW | Pmin, kW | T trabajo, h | T, trabajo, % |
|----------|---------|--------|------|----------|----------|--------------|---------------|
| EM-15 | Mir (A) | 0,69 | 0,14 | 0,90 | 0,40 | 1,0 | 6 |

Tabla 8.3 Comportamiento sin carga y sin variador de frecuencia de las escaleras simples de 11 kW.

| Escalera | Ubic | Pm, kW | Desv | Pmax, kW | Pmin, kW | T trabajo, h | T, trabajo, % |
|----------|---------|--------|------|----------|----------|--------------|---------------|
| EM-15 | Mam (A) | 2,57 | 0,29 | 2,91 | 1,57 | 7,76 | 43 |

Como se aprecia en las tablas 9.3 y 9.4, las escaleras duplex de 11 kW, ubicadas entre los andenes y las mezanines presentan un comportamiento similar al de las duplex de 15 kW, en lo que se refiere al tiempo de trabajo sin la presencia de usuarios. Nuevamente la ubicación de la estación influye en este tiempo, pues como se observa en la escalera EM-4B de Cortijos el variador tiene más chance de operar que en la EM-2B de Miranda y esto se debe a que Los Cortijos está ubicada en una zona de no muy alto flujo de usuarios, y es una de las últimas estaciones de la parte Este de la línea 1.

Tabla 9.3 Comportamiento de las escaleras duplex de 11 kW, trabajando con carga.

| Escalera | Ubic | Pelda | Pm, kW | Desv | Pmax, kW | Pmin, kW | T trabajo, h | T, trabajo, % |
|----------|---------|-------|--------|------|----------|----------|--------------|---------------|
| EM-2B | Alt (M) | 106 | 4,31 | 0,72 | 5,51 | 2,04 | 17,5 | 97 |
| EM-4B | Cor (M) | 107 | 3,38 | 0,65 | 4,55 | 2 | 16 | 89 |

La potencia media demandada por el accionamiento de una escalera duplex de 11 kW, cuando funciona sin la presencia de usuarios y actúa el variador de frecuencia, es aproximadamente el doble de la potencia demandada por una escalera simple de 11 kW, trabajando en igual condición (ver tab. 10.3)Tabla 10.3 Comportamiento de las escaleras duplex de 11 kW, trabajando sin carga, con variador de frecuencia.

| Escalera | Ubic | Pelda | Pm, kW | Desv | Pmax, kW | Pmin, kW | T trabajo, h | T, trabajo, % |
|----------|---------|-------|--------|------|----------|----------|--------------|---------------|
| EM-2B | Alt (M) | 106 | 1,53 | 0,42 | 1,94 | 0,65 | 0,5 | 3 |
| EM-4B | Cor (M) | 107 | 1,40 | 0,38 | 1,98 | 0,56 | 2 | 11 |

Haciendo un resumen sobre el trabajo de los variadores de frecuencia en las diferentes escaleras estudiadas, se observa una mayor efectividad de los mismos, desde el punto de vista del ahorro energético, en las escaleras simples de 15 kW con respecto a las duplex y con ubicación andén mezanina (ver tablas 11.3 y 11.4)

Tabla 11.3 Estimado del ahorro de energía, que se puede lograr con el uso de los variadores de frecuencia, en las escaleras simples de 15 kW.

| Escalera | Ubic | Dif demanda con variad y sin variad, kW. | Ahorro diario, kWh | Ahorro mensual, kWh | Ahorro anual MWh |
|----------|---------|--|--------------------|---------------------|------------------|
| EM-8 | Cap (A) | 1,80 | 13,90 | 417,0 | 5,0 |
| EM-16 | Cor (A) | 1,84 | 11,22 | 336,7 | 4,0 |

Tabla 12.3 Estimado del ahorro de energía, que se puede lograr con el uso de los variadores de frecuencia, en las escaleras duplex de 15 kW.

| Escalera | Ubic | Dif demanda con variad y sin variad, kW. | Ahorro diario, kWh | Ahorro mensual, kWh | Ahorro anual MWh |
|----------|---------|--|--------------------|---------------------|------------------|
| EM-3A | Cap (M) | 1,31 | 3,34 | 100 | 1,20 |
| | | | | | |

En el caso de las escaleras de 11 kW, el variador de frecuencia también muestra su efectividad, aunque en un menor grado respecto a las escaleras de 15 kW (ver tablas 13.3 y 14.3).

Tabla 13.3 Estimado del ahorro de energía, que se puede lograr con el uso de los variadores de frecuencia, en las escaleras simples de 11 kW.

| Escalera | Ubic | Dif demanda con variad y sin variad, kW. | Ahorro diario, kWh | Ahorro mensual, kWh | Ahorro anual MWh |
|----------|---------|--|--------------------|---------------------|------------------|
| EM-15 | Mir (A) | 1,98 | 1,98 | 59,4 | 0,71 |

Tabla 14.4 Estimado del ahorro de energía, que se puede lograr con el uso de los variadores de frecuencia, en las escaleras duplex de 11 kW.

| Escalera | Ubicación | Dif demanda con variad y sin variad, kW. | Ahorro diario, kWh | Ahorro mensual, kWh | Ahorro anual MWh |
|----------|-----------|--|--------------------|---------------------|------------------|
| EM-2B | Alt (M) | 1,07 | 0,53 | 16,00 | 0,19 |
| EM-4B | Cor (M) | 1,20 | 2,40 | 72,00 | 0,86 |

3.3 Valoración económica

Valor del variador de frecuencia

Mayo 2004

Motor 11kW 2560 euro variador 5200 euro

Motor 15 kW 3500 euro, variador 7100 euro

Motor 18.5kW 6000 euro , variador 9200 euro

Reductor 4500 euro

Precio del euro al 2004 mayo , para la compra 2285.40816000, para la venta 2291.13600000.

valor de variador de frecuencia de 11kW 11913907.2Bs

valor del variador de frecuencia de 15 kW 16267065.6Bs

cargo por energia de acuerdo a gaceta oficial $37,05 \text{ Bs. kW/h} * 5,86\text{h} * 30 = 6513,39$ al mes, al año (12 meses) $= 6513,39 * 12 = 78160,68 \text{Bs}$

1,763 kW

Conclusiones

1. En la mayoría de las escaleras estudiadas se observa asimetría en las tensiones de alimentación a los accionamientos, motores subcargados y un bajo factor de potencia. Estos elementos constituyen fuentes de reservas energéticas en estas instalaciones.
2. En la mayor parte de las escaleras estudiadas, fundamentalmente en las de bajo y medio flujo de usuarios, el impacto energético de los variadores de frecuencia es significativo, lográndose ahorros mensuales en determinados casos en el orden de los 400 kWh. Se observa un mayor impacto en las escaleras simples de 15 kW, aunque en general la magnitud de dicho impacto depende también de la ubicación de la estación y de la posición de la escalera dentro de la estación.
3. Dado el bajo costo de la energía eléctrica, según la tarifa aplicada, la introducción de los variadores de frecuencia no resulta económica para la Compañía Metro de Caracas, sin embargo se logra un ahorro significativo de energía y un importante impacto ambiental, pues los variadores instalados actualmente evitan que se emitan a la atmósfera un gran volumen de CO₂.

Recomendaciones

1.- Dar continuidad al estudio, ampliando el tamaño de la muestra y alargando el período de medición en cada escalera hasta una semana.

2.- Pasar a una segunda etapa del trabajo donde se incluya el estudio de la calidad de la energía y el mejoramiento de la eficiencia de los accionamientos, explotando las reservas energéticas expuestas en este trabajo.

Bibliografia.

1. Abrahamsen F. Energy optimal control of induction motor drives. Doctoral thesis. Aalborg, Denmark. February 2000. pp 224.
2. Abrahamsen J., Pedersen J., Blaabjerg. State of the art of optimal efficiency control of low cost induction motor drives. PEMC – 96. Vol. 2. Budapest, Hungary. September 2 – 4. 1996. pp 163 – 170.
3. Appelbaum J., Khan I., Fuchs E. Optimization of three phase induction motor design part II: The efficiency and cost of an optimal design. Transaction on Energy conversion. Vol. 2. No. 3. September 1997.
4. Atia Y. A. Enhanced efficiency pumping system operating with photovoltaic source. Doctoral thesis. Cairo University. Nov 11. 2000.
5. Blanuja B., Vukosani S. Losses minimization algorithm in vector control of asynchronous drives. II International Symposium on Power Electronics. Novi Said. October 31 – 2 November. 2001.
6. Bodson J. Digital control improves variable speed drives. EPE Journal. Vol. 2. No. 4. December 1992. pp 243 – 248.
7. Bose B. K., Pestel N., Kaushik R. A neuro-fuzzy based on line efficiency optimisation control of a stator flux oriented direct vector controlled induction motor drive. IEEE vol 44. no.2. April 1997.
8. Bose K, Power Electronics and AC Drives , Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1986.
9. Britz M., Degner W. Lorenz D. Analysis and design of current regulators using complex vectors; in Conf. Record. IEEE-IAS Annual meeting, 1997, pp 1504-1511.

10. Cerovski Z., Javurek J. Converter control of asynchronous motor drive with minimum current consumption. EPE European Power Electronic Conference. Groendheim, Norway. Vol 3. p807-812. 2-10 september. 1997.
11. Cerruto E, Consoli A, Testa A. Fuzzy adaptive vector of induction motor drives. IEEE Transaction on Power Electronics. Vol 12. No.6 Nov 1999.
12. Chapman S. Máquinas Eléctricas. Editorial McGraw Hill. New York. 2003
13. Choi B. J., Kwak S. W., Kim B. K. Design and stability of single input fuzzy logic controller. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B: Cybernetics, Vol 30, No. 2. Abril 2000. pp 303 – 309
14. Costa Branco P. J. Learning from examples using Fuzzy Logic in modelling and control of an electro-hydraulic actuator. Tesis Doctoral. Instituto Superior Técnico de Lisboa. Julio 1998.
15. Costa Branco, P.J., Dente, J.A., "The application of fuzzy logic in automatic modeling electromechanical systems," *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 95, No. 3, pp. 273-293, 1998.
16. Costa Branco, P.J., Dente, J.A., "An experiment in automatic modeling an electrical drive system using fuzzy logic," *IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics - Part C: Applications and Reviews*, Vol. 28, No. 1., May, 1998.
17. Costa Branco P. J., Dente J. "New approaches on structure identification of fuzzy models: case study in an electromechanical system," in *Fuzzy Logic, Neural Networks, and Evolutionary Computation (LNCS/Lecture Notes in Artificial Intelligence)*, T. Furuhashi and Y. Uchikawa, Eds. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1996, pp. 104-143.
18. Costa Branco P. J. Dente A. Control of an electro-hydraulic system using

- neuro-fuzzy model and real time learning approaches. IEEE. Trans. On Systems, Man and Cybernetics, vol 28, no.2 Mayo 1998.
22. Costa Branco, P.J., Dente, J.A., "Noise effects in fuzzy modelling systems," in Mastorakis, ed., *Computational Intelligence and Applications*, World Scientific and Engineering Society Press, Danvers, USA, pp. 103-108, 1999.
23. Costa Montiel A., Galan N., Ciumbulea G., López X. M. Cálculo de los parámetros del motor de inducción a partir de datos de catálogo. 2004.
24. Cleland J., Turner W. Fuzzy logic control of electric motors and drives: feasibility study.- Project Summary. EPA. Abril 1996. 6 pag.
25. Cleland J. Turner W. McComick V.. Efficiency optimisation control of AC induction motors initial laboratory results. Project. EPA. Mayo 1997.
26. Da Souza G., Bose B., Cleland J. Fuzzy logic based on line efficiency optimization control of an direct vector controlled induction motor drive. IEEE Transaction on Industrial Electronics. Vol.42. No.2. Abril 1995.
27. Díaz A. Selección del diámetro óptimo de tuberías para fluidos newtonianos viscosos (2da parte) flujo por bombeo. Revista Tecnología Química 1999. pp 18 – 27.
28. Díaz H., Borjas R. y Sangárdia A. Diseño y ensayo de un controlador dfuso para un motor de inducción trifásico. Revista Facultad de Ingeniería. U.I.A. Chile. Vol. 4. 1997.
29. Eid Bayoumi Ehab Hassan. Integradet IGBT PWM converter/inverter system feeding three phase induction motors. Doctoral Thesis. Cairo University. 10 November 2001.

30. Elburuk M., and Zinger D. Fuzzy implementation of direct self control of induction motors. IEEE Trans. On Industrial Applications. Vol.30. No.3. Mayo/Junio 1994. pp 729-735. 1994.
31. El-Sousy F. M. Microcomputer-based field orientation control of induction machine drive system utilizing optimal control technique. Doctoral thesis. Cairo University. May 13. 2000.
32. Famouri P, Cathey J. J., "Loss Minimization Control Induction Motor Drive," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 27, No. 1, January/February 1991.
33. Fitzgerald A., Kingsley Ch., Umans S., Electric Machinery. Editorial McGraw Hill. New York. 2000.
34. García G., Mendes J., Stephan L., Watanabe E., An efficient controller for an adjustable speed induction motor drive. IEEE Transaction on Industrial Electronics. Vol. 41. No. 5. Pp 533 – 539. October 1994.
35. Harnerfors L., Hans P. Robust current control of ac machines using the internal model control method. IEEE IAS. 1999 pp 303 – 309.
36. Harris C., Moore C.G. and M. Brown, *Intelligent Control: Aspects of Fuzzy Logic and Neural Networks*, Vol. 6, Series on Robotics and Automated Systems. World Scientific Press, 1993.
39. Higashi M., Klir G. Identification of fuzzy relational systems. IEEE Trans on Systems Man and Cybernetics. Vol SMC-14. No. 2. pp 349-355. 1993.
40. Hsu J., Kueck J., Olszewski M., Casada D., Otaduy J. Tolberg L. Comparasion of induction motor field efficiency evaluation methods. IEEE Trans. On Ind. Applications. Vol. 34. No.1. Jan. / Feb. 1998. pp

117-125. 1998.

42. Jansen R, Lorenz R., Novotny D. Observer-based direct field orientation: analysis and comparison of alternative methods. IEEE Trans on Ind. Application. Vol.30. No.4. July/August 1994. pp 945-953. 1994.
43. Jinhwan Jung, Kwanghee Nam. A dynamic decoupling control scheme for high speed operation of induction motors. IEEE Transactions on Industrial Electronics. Vol 46. No.1. February 1999. pag100-110
44. Jung J., Lim S. Nam K. A PI type decoupling control scheme for high speed operation of induction motors; in Proc. IEEE PESC-97. pp 1082-1085. 1997.
45. Kioskeridis I, Margaris N., "Loss Minimization in Scalar Controlled Induction Motor Drives with Search Controllers," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 11, No. March 1996, pp. 213-219.
46. Kirschen S., Novotny D. W., Suwanwisoot W., "Minimizing Induction Motor Losses by Excitation Control Variable frequency Drives," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-20, No. 5, September/October 1984, pag. 1244-1251.
47. Kostenko M., Piotrovski L., Máquinas Eléctricas. Tomo II. Editorial Mir. Moscú 1976.
48. Kusko A., Galler D., Control means for minimization of losses in ac and dc motor drives. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol 19, No. 4. pp 561 – 570. July – august 1983.

49. Kwong W.A., Passino K.M., "Dynamically focused fuzzy learning control", *IEEE Trans. On Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 26, No. 1, pp. 53-74, Feb. 1996.
50. Lascu C., Boldea I., Blaabjerg. The torque vector controlled (TVC) universal AC drive. Implementation aspects. *IEEE Transaction on Power Electronics*. Vol IA 20. No. 3. 2000.
51. Lee J. On methods for improving performance of PI – type fuzzy logic controllers. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. Vol 1. No.4. 2000. pp 298–301.
52. Lei S., Langari R. Synthesis and approximation of fuzzy logic controllers for nonlinear system. *International Journal of Fuzzy Logic*. Vol. 5. No. 2. Junio 2003. pp 98 –104.
53. Leonhard, W., *Control of Electrical Drives*, 2nd edition, Springer-Verlag
Berlin Heidelberg, 1996.
54. Levi E., Sokola M., Vukosavic N. A method for magnetizing identification in rotor flux oriented induction machines. *IEEE Transaction on Energy conversion*. Vol. 15. No. 3. June 2000.
55. Li N., Li Y. S., Xi Y. G., Ge S. S., Stability análisis of T-S fuzzy system based on observers. *International Journal of Fuzzy Systems*. Vol. 5. No.1. Marzo 2003. pp 22 – 30.
56. Low T., Lee T., Lim H. "A methodology for neural network training for control of drives with nonlinearities," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 40, n. 2, Abril 1993. Low t., Lee t., 17 Lim H. "A methodology for neural network training for control of drives with nonlinearities," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 40, n. 2, Abril 1993.

57. Mestizo C. J. Evaluación energética sobre el empleo del variador de frecuencia como método de regulación de flujo en bombas centrífugas accionadas por motor eléctrico de corriente alterna. Centro Azucar. 1994.
58. Moblad L., Ostergaard J. control of cement kiln by fuzzy logic. Editions approximate reasoning in decision analysis. Amsterdam. Holland. pp 389 – 400. 1982.
59. Moreira C., Lipo T. A., Blasko V., “Simple Efficiency Maximizer for an Adjustable Frequency Induction Motor Drive,” IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.No. 5, September/October 1991, pp. 940-945.
60. Moreno Eguilaz J. M. Aportaciones a la optimización de energía en accionamientos eléctricos para motores de inducción mediante lógica difusa. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. España. Junio de 2000.
61. Nordin B., Novotny D. W., Zinger D. S, “The Influence of Rotor Parameters Deviations in Feedforward Field Orientation Drive Systems,” IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-21, No. 4, July/August 1985.
62. Nuez Amador M. V. Simulación y control del motor de inducción por Campo Orientado. Tesis Doctoral. La Habana, 1998. pp 11 – 15.
63. Ramírez J. Control óptimo U/f para motores de inducción. Revista Energía y Computación. Vol. IX. No. 2. Octubre 2000. pp 20 – 25.
64. Ramírez J. Contribución a la commande optimale des machines asynchrones. Tesis de Doctorado. Institut National Polytechnique de Grenoble. Francia 1998. pp 17 – 25
65. Romero Rueda I. Estudio del motor de inducción de rotor de jaula de ardilla sujeto a la Teoría del Campo Orientado. Tesis de Maestría. ISMM. Junio del 2000.

66. Rojas Purón L., Morera Hernández M. Supervisor gráfico de accionamiento eléctrico asistido por MATLAB. Taller Nacional de NTIC aplicadas a la Ingeniería Eléctrica. ISPJAE. Ciudad de la Habana. Junio del 2003.
67. Rojas Purón L., Morera Hernández M. Optimización de eficiencia de accionamiento eléctrico para transporte de pulpa. SIE-2001. Universidad Central de Las Villas. Santa Clara. Julio 2001.
68. Rojas Purón L., García Renté M., Izquierdo R., Pérez Barreto R. Matriz GEM: una llave de optimización de accionamientos de bombas para pulpa laterítica. FIE 2002. Santiago de Cuba. Junio 2002.
69. Rojas Purón L., Morera Hernández M. Control de eficiencia de accionamiento de bomba centrífuga usando lógica difusa. SIE-2003. Universidad Central de Las Villas. Santa Clara. Nov. 2003. .
70. Schafers E., Krebs V. Stability analysis and controller design for dynamic fuzzy systems based on a new inference approach. International Journal of Fuzzy Systems. Vol. 5. No.1 Marzo 2003.
71. Seleme S., Canudas de Witt C. Minimum energy operation conditions motors under torque regulation. Workshop on motion control for intelligent automation. Perugia, Italy 1992. pp 127 – 133.
72. Slaets B., Van Roy P., Belmans R. Energy efficiency of induction machines. ICEM-2000. 28 – 30 August 2000. Expoo. Finland.
73. Smith C., Corripio A. Principles and practice of automatic process control. New York. John Wiley & Sons, Inc. 1997.
74. Spiegel R., Turner M., McCormick V. Fuzzy logic based controllers for efficiency optimization of inverter fed induction motor drives. IEEE Transaction on Power Electroncis Vol. 137. No. 3. August 2003. pp 387 – 401.

75. Sugeno M., Tanaka K. "Successive identification of a fuzzy model and its applications to prediction of a complex system," *Fuzzy Set Syst.*, vol. 42, pp. 315-334, 1991.
76. Sugeno M., Yasukawa T. "A fuzzy-logic-based approach to qualitative modeling," *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, vol. 1, pp. 7-31, February 1993. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol 28, Part - C, No. 2, Mayo 1998.
77. Sudkamp, T., Hammell II, R. J.; "Interpolation, completion, and learning fuzzy rules". *IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics*, vol. 24, N°. 2, pp. 332-342, Feb. 1994.
78. Park H., Sul S. Anovel technique for optimal efficiency control of a current source inverter fed induction motor. *IEEE Transaction on Power Electronics*. Vol 3. No. 2. April 1998. pp 192 – 198.
79. Pedrycs W. A identification of fuzzy relational systems. *Fuzzy sets and systems*. Vol.13. pp-153-167. 1984.
80. Petterson S., Lennarsotson B. An LMI approach for stability analysis of nonlinear systems. *SIAM-2000*.
84. Postwaiter B. Empirical comparation of methods of fuzzy relational identification. *IEE Proc.-D*. vol. 138, pp 199-206. 1998.
85. Takagi T. Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE. Trans. on systems Man and Cybernetics*. Vol. SMC-15. No.1 pp 116-132. 1998.
86. Turino I. M., y otros. Evaluación de sistemas de bombeo por métodos computacionales. *Memorias del 1er Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*. Madrid. 1993.
87. Vas P. *Electrical machines and drives*. Clarendar Press. Oxford. 1992.

pp 808.

88. Vas P. Artificial intelligent based applications of fuzzy, neuro fuzzy and genetic algoritms on electrical machines. Oxford University Press. 1999.
89. Vas P. Sensorless vector and DTC. Oxford University Press. 2001.

Anexo 1 Estación Mamera

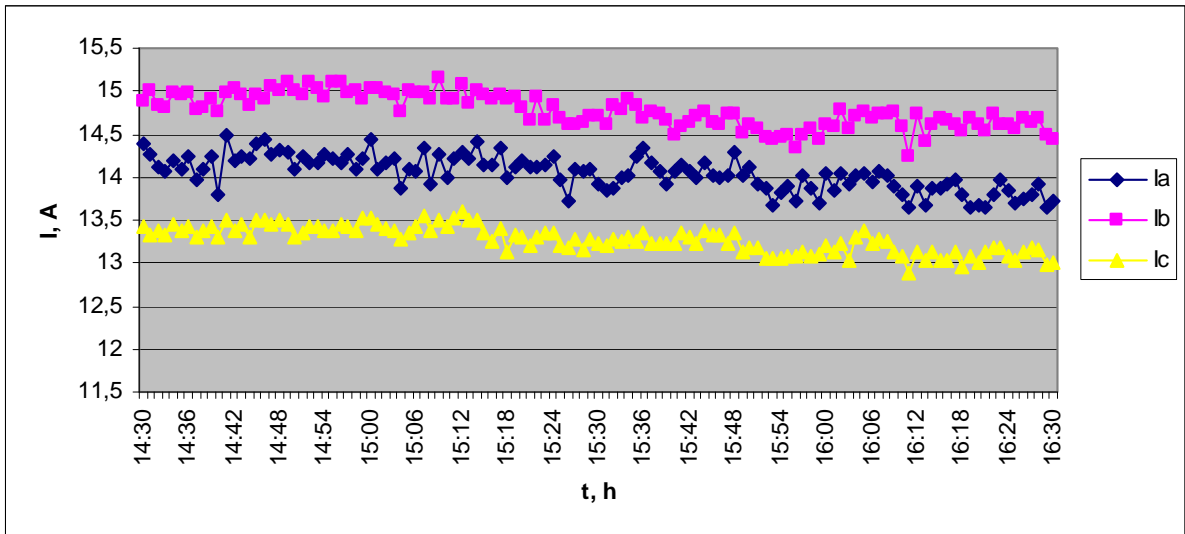


Fig. 1.1 Comportamiento de las corrientes en el accionamiento de la escalera 15, el horario de 14:30 a 16:30 pm

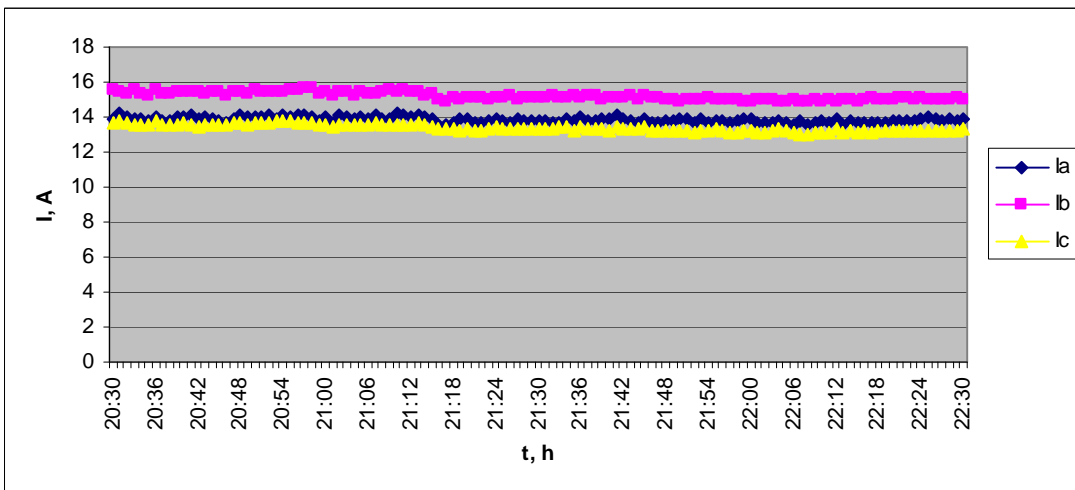


fig. 2.1 Comportamiento de las corrientes en el accionamiento de la escalera 15, en el horario de 20:30 a 22:30 pm

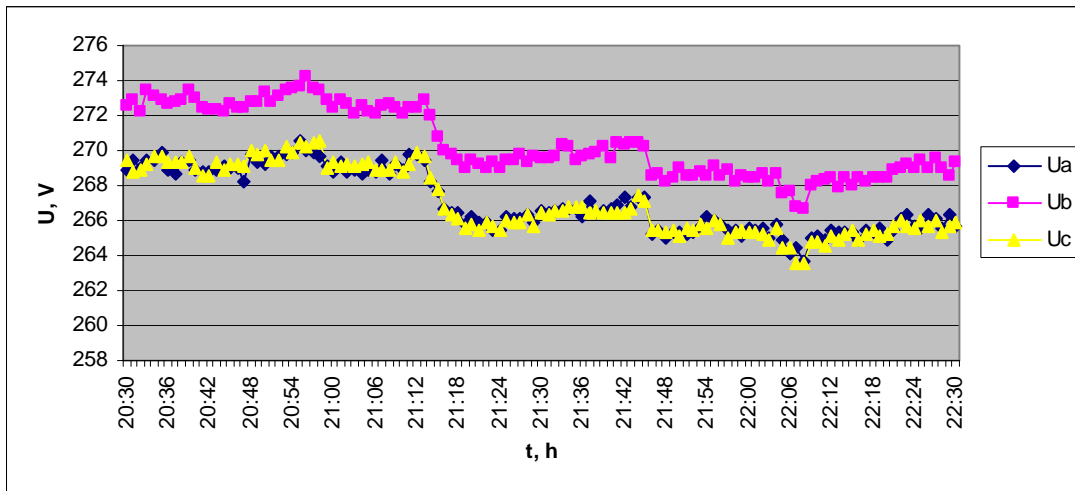


Fig.3.1 Comportamiento de las tensiones en el horario de 20:30 a las 22:30 pm.

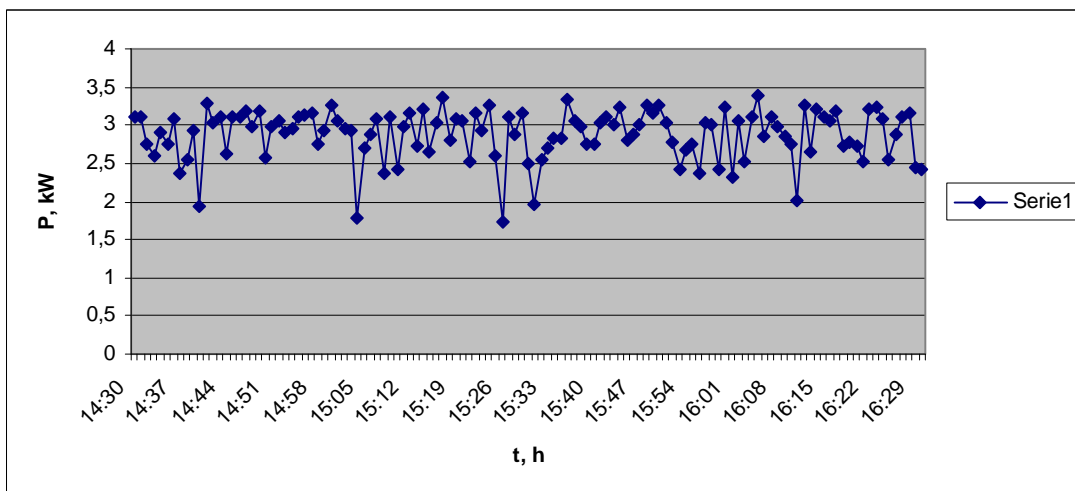


Fig. 4.1 Comportamiento de la carga en el horario de las 14:30 a las 16:30 pm.

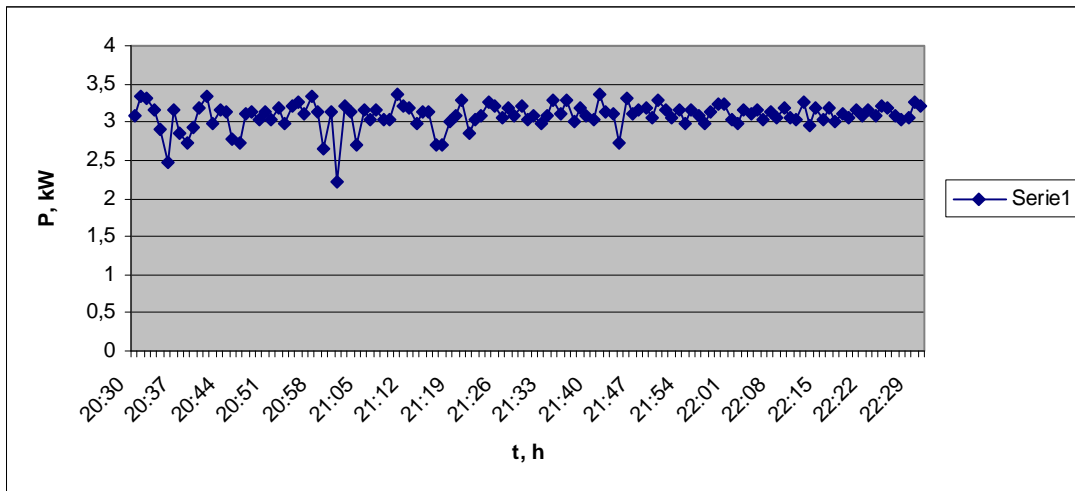


Fig. 5.1 Comportamiento de la carga en el horario de las 20:30 a las 22:30 pm.

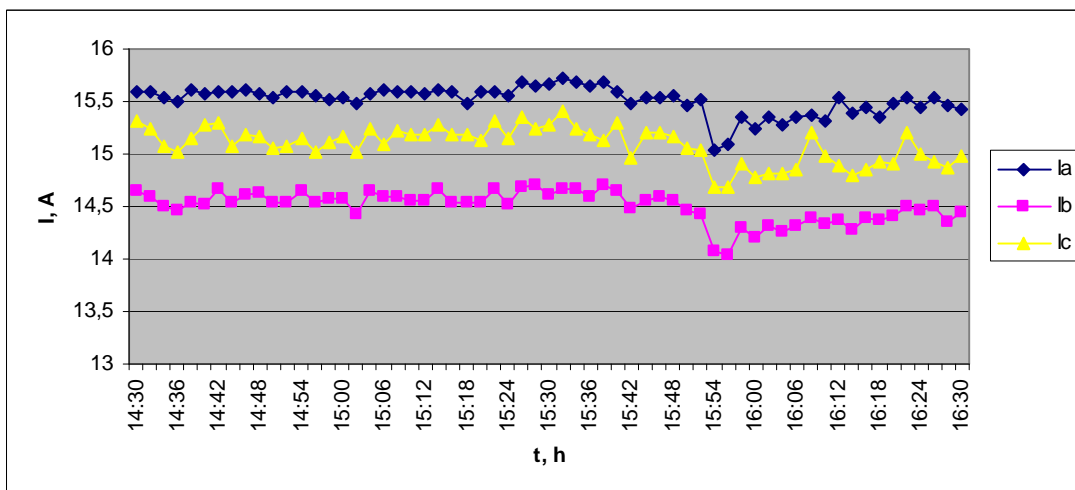


Fig. 6.1 Comportamiento de las corrientes en el accionamiento de la escalera EM-16, funcionando con el variador, en el horario de las 14:30 a las 16:30.

Anexo 2. Estación Cortijos

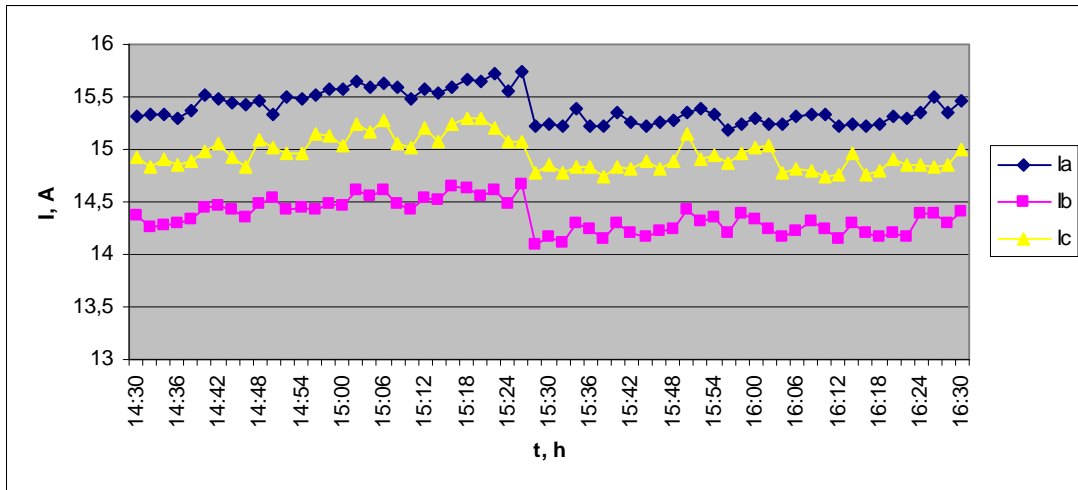


Fig. 1.2 Comportamiento de las corrientes en el accionamiento de la escalera EM-16, funcionando con el variador desconectado, en el horario de las 14:30 a las 16:30 pm.

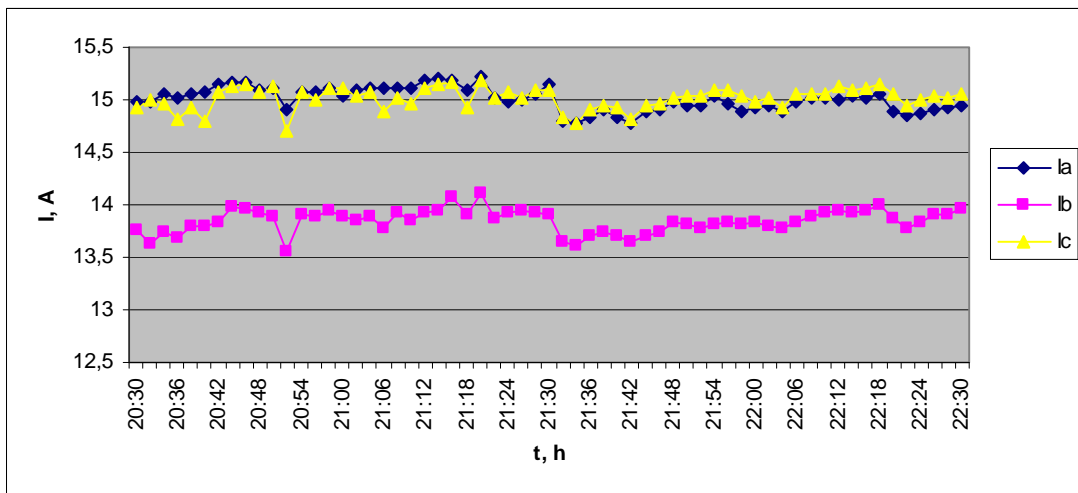


Fig. 2.2 Comportamiento de las corrientes en el accionamiento de la escalera EM-16, funcionando con el variador desconectado, en el horario de las 20:30 a las 22:30.

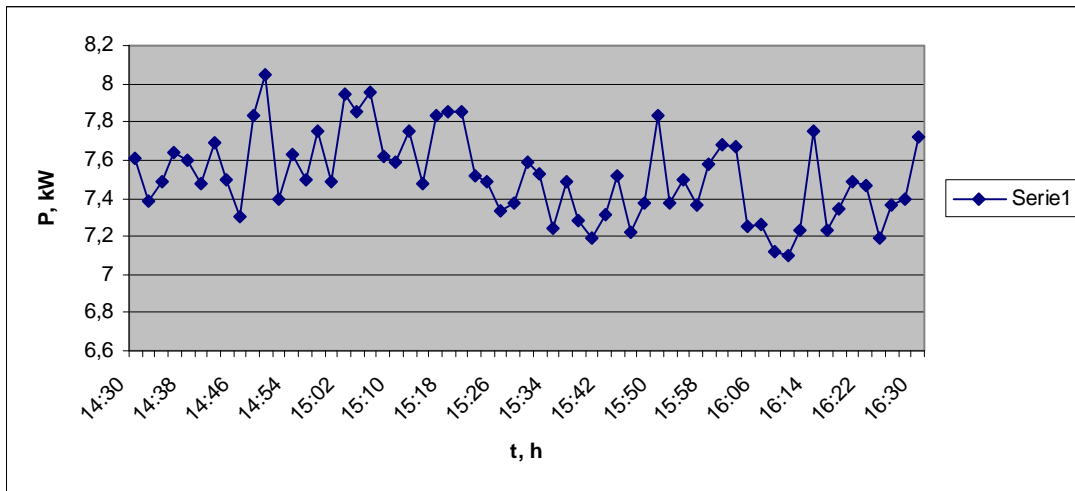


Fig. 3.2 Comportamiento de las potencias en el accionamiento de la escalera EM-16, funcionando con el variador desconectado, en el horario de las 14:30 a las 16:30.

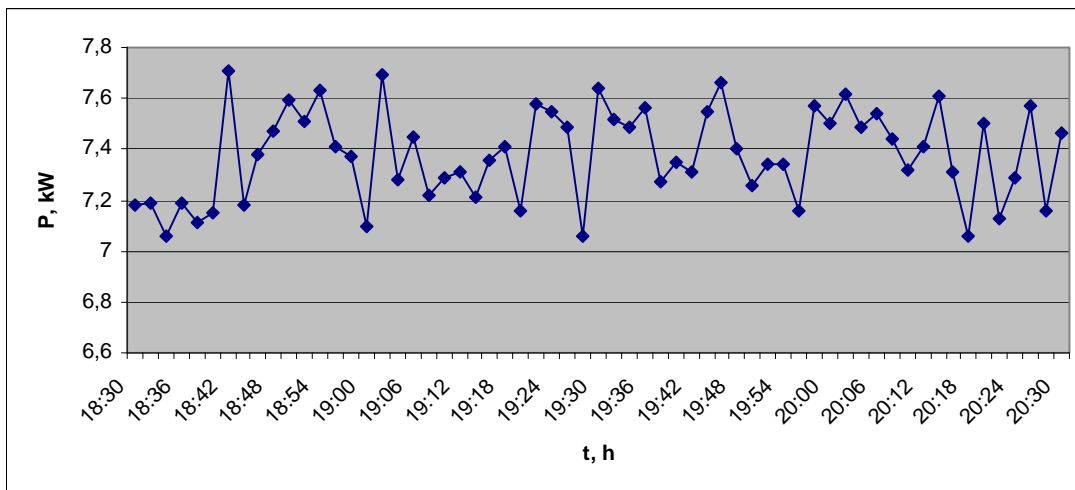


Fig. 4.2 Comportamiento de las potencias en el accionamiento de la escalera EM-16, funcionando con el variador desconectado, en el horario de las 18:30 a las 20:30.

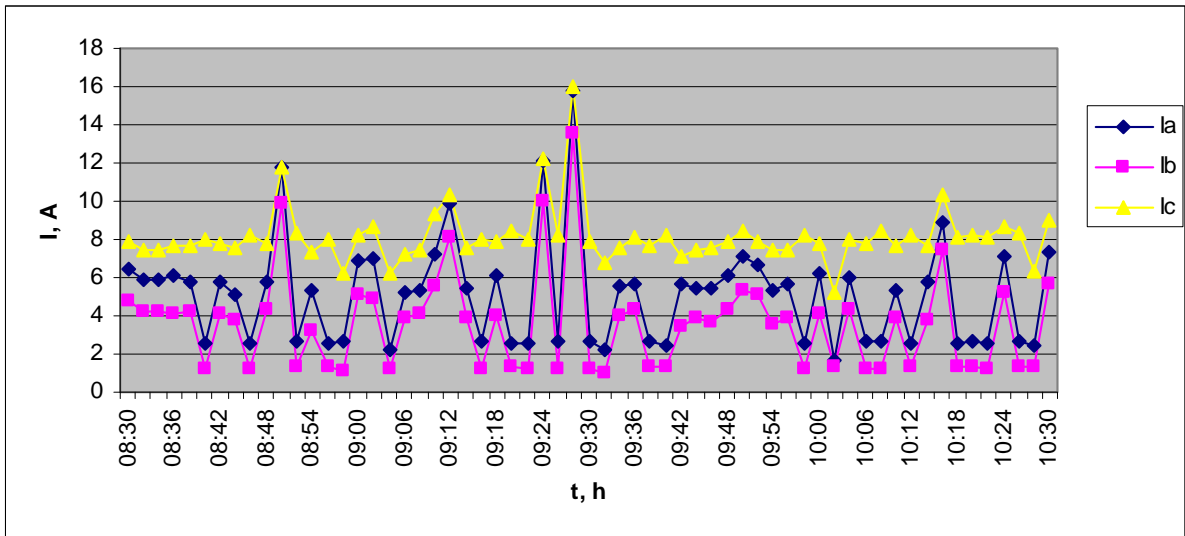


Fig. 5.2 Comportamiento de las corrientes en el accionamiento de la escalera EM-16, funcionando con el variador, en el horario de 8:30 a 10:30 am.

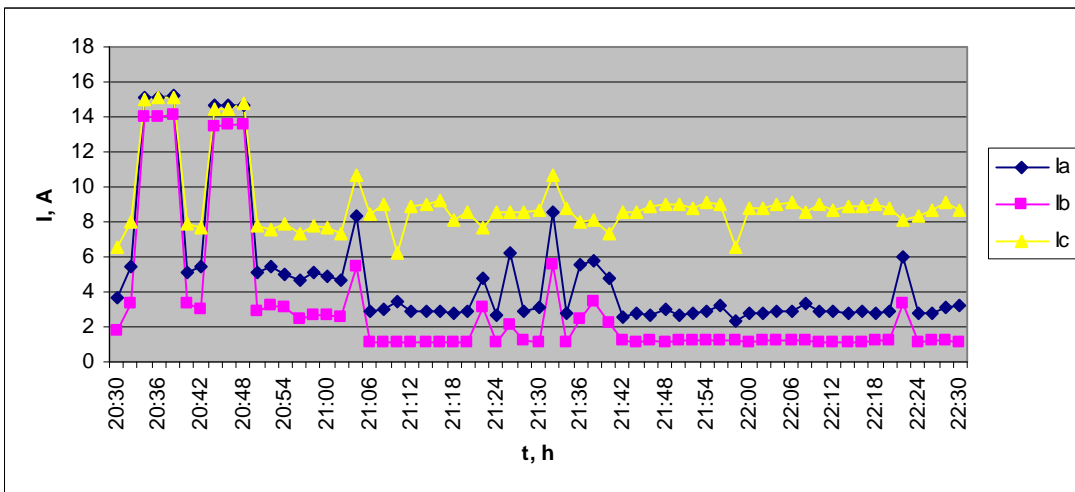


Fig. 6.2 Comportamiento de las corrientes en el accionamiento de la escalera EM-16, funcionando con el variador, en el horario de las 20:30 a las 22:30.

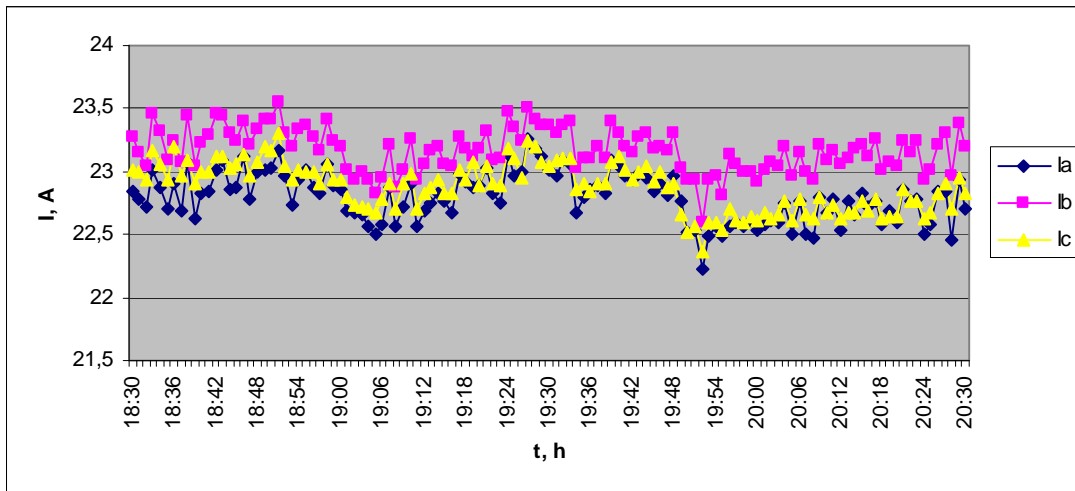


Fig. 7.2 Comportamiento de las corrientes en el accionamiento de la escalera 4B, funcionando con el variador, en el horario de las 18:30 a las 20:30.

Las tensiones en la escalera E-4B, aunque siempre se encuentran por encima del valor nominal del motor no llegan a sobrepasar el % de dicho valor.

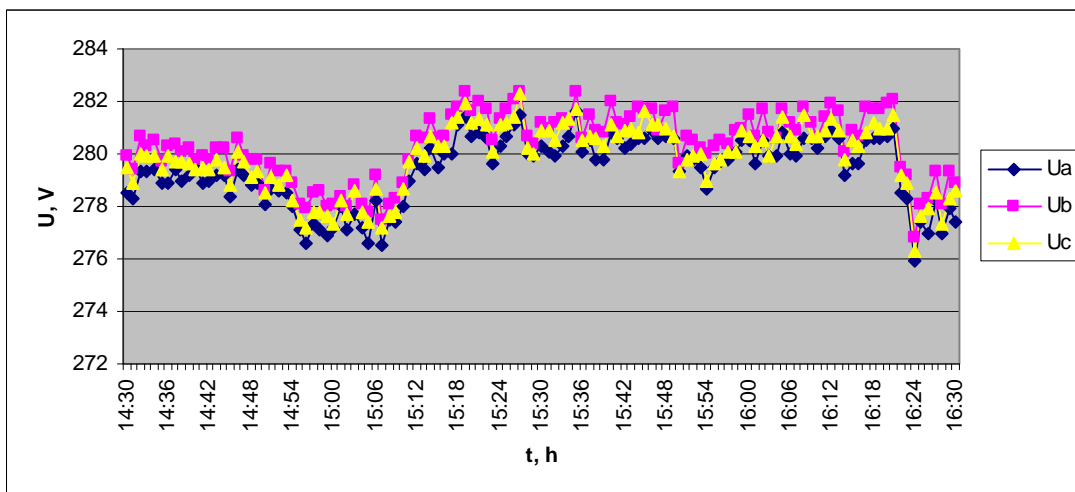


Fig. 8.2 Comportamiento de las tensiones en el accionamiento de la escalera 4B, en el horario de las 14:30 a las 16:30.

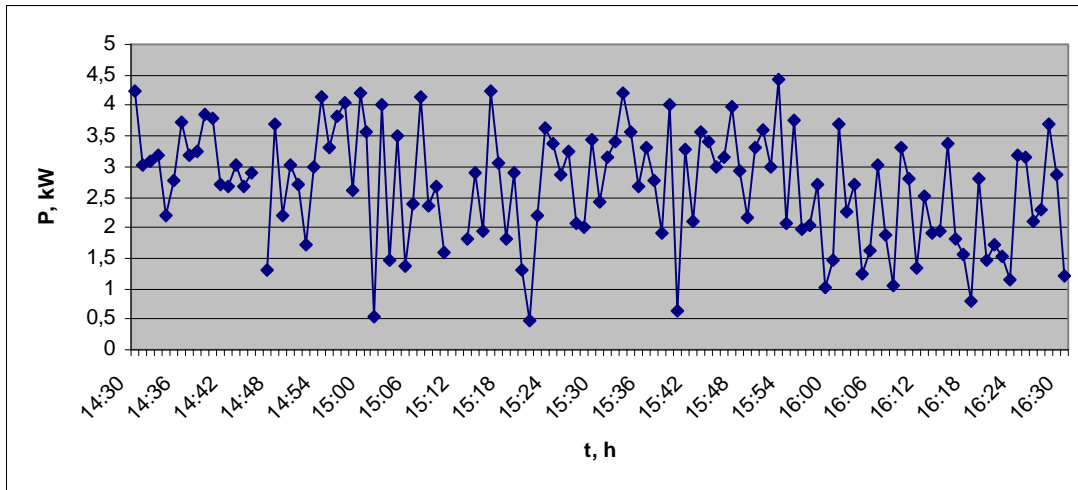


Fig. 9.2 Comportamiento de la carga en el accionamiento de la escalera 4B, en el horario de las 14:30 a las 16:30.

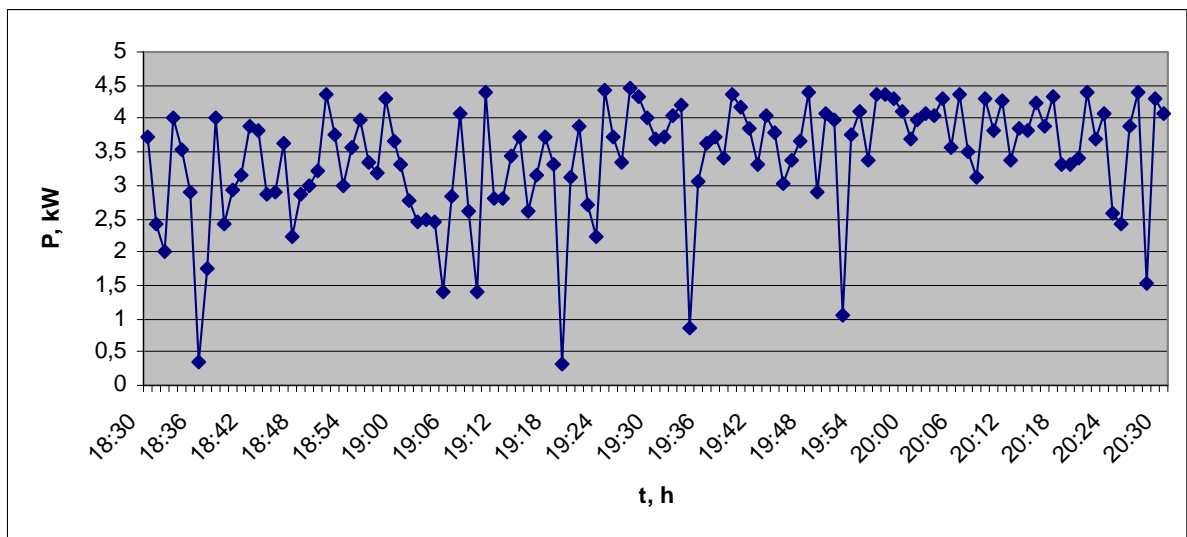


Fig. 10.2 Comportamiento de la carga en el accionamiento de la escalera 4B, en el horario de las 18:30 a las 20:30.

ANEXO 3. Estación Altamira

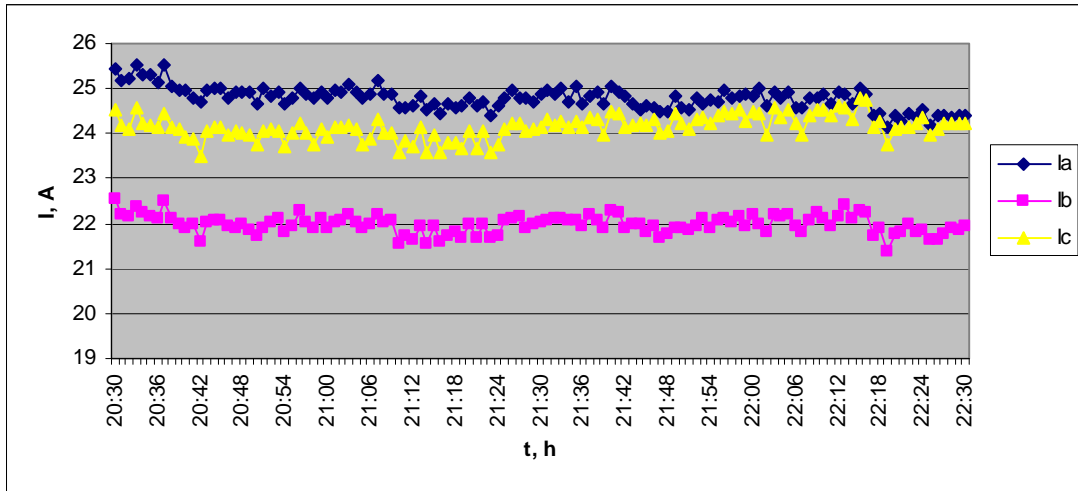


Fig. 1.3 Comportamiento de las corrientes en el accionamiento de la escalera 2B, en el horario de las 20:30 a las 22:30. Las tensiones en esta escalera se caracterizan por subidas y caídas en forma de diente de sierra (ver fig. 32.3 y 33.3).

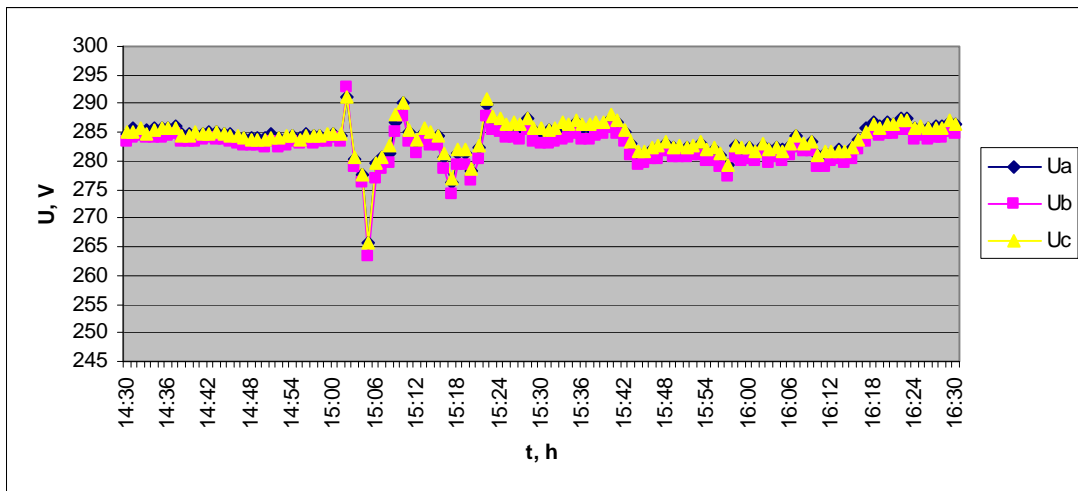


Fig. 2.3 Comportamiento de las tensiones en el accionamiento de la escalera 2B, en el horario de las 14:30 a las 16:30.

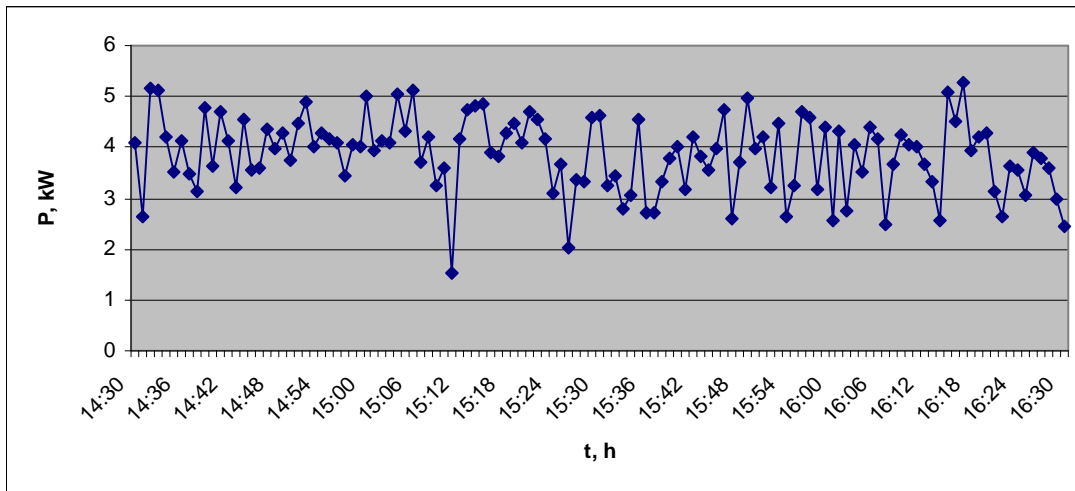


Fig. 3.3 Comportamiento de la carga en el accionamiento de la escalera 2B, en el horario de las 14:30 a las 16:30.

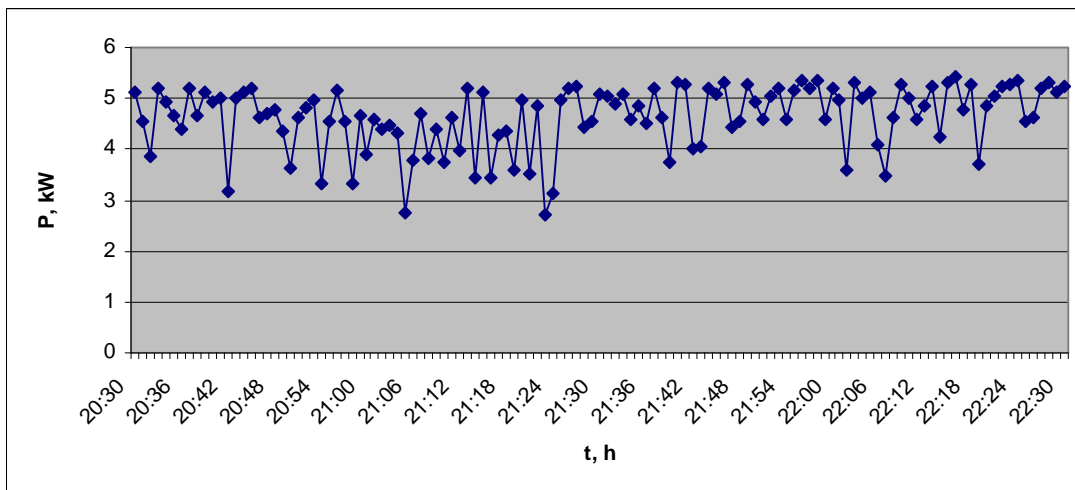


Fig. 4.3 Comportamiento de la carga en el accionamiento de la escalera 2B, en el horario de las 20:30 a las 22:30.

ANEXO 4. Estación Miranda

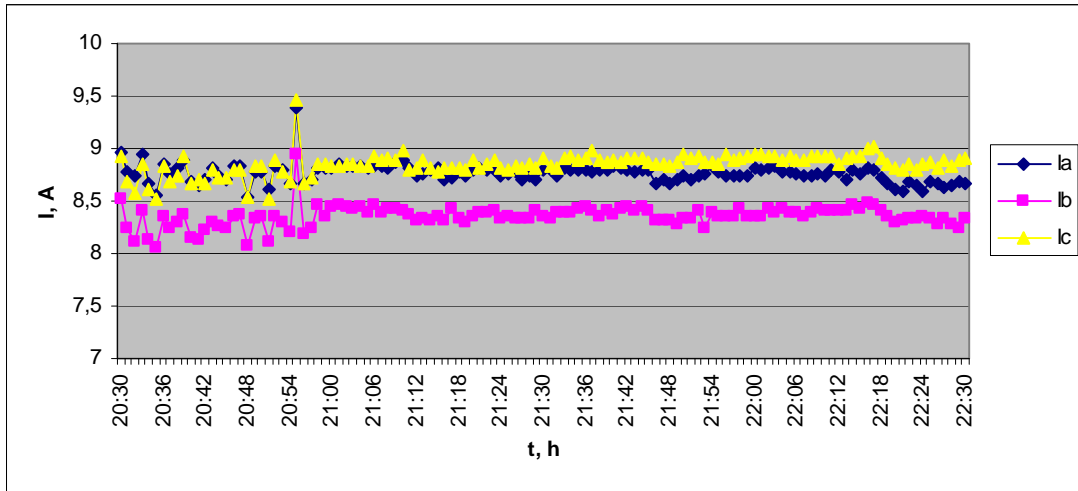


Fig. 1.4 Comportamiento de las corrientes en el accionamiento de la escalera 15, en el horario de las 20:30 a las 22:30.

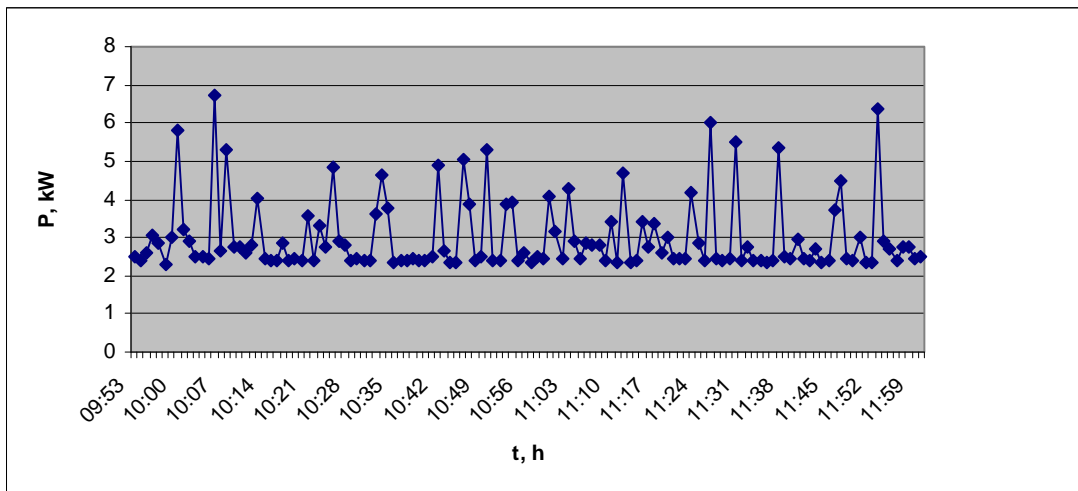


Fig. 2.4 Comportamiento de la carga en el accionamiento de la escalera 15, en el horario de las 9:50 a las 12:00 m.

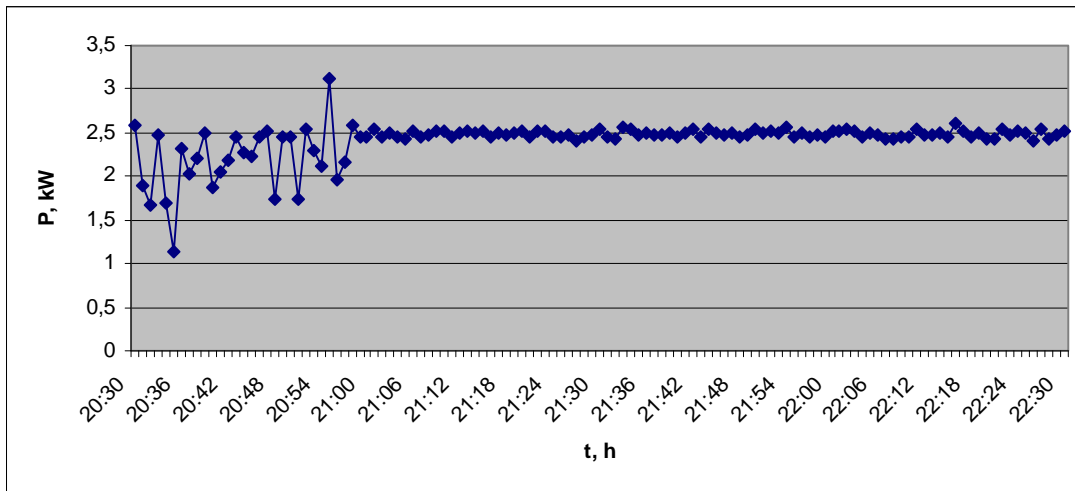


Fig. 3.4 Comportamiento de la carga en el accionamiento de la escalera 15, en el horario de las 20:30 a las 22:30.

ANEXO 5. Estación Capuchino

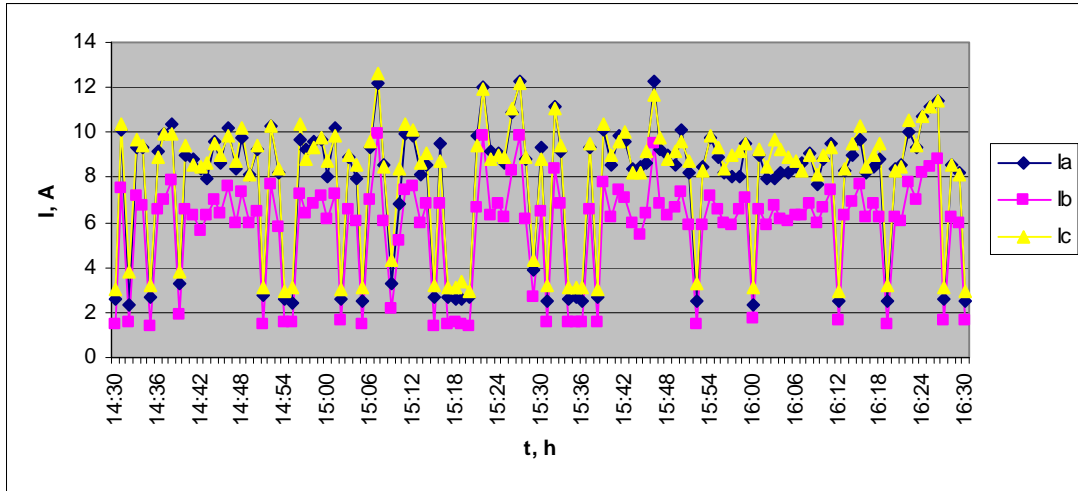
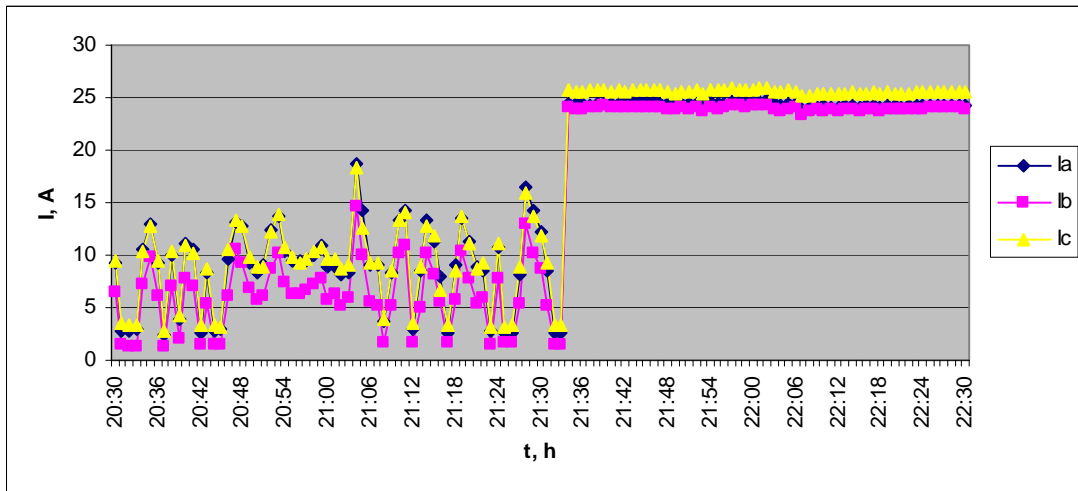


Fig. 1.5 Comportamiento de las corrientes en el accionamiento de la escalera 3A, en el horario de las 14:30 a las 16:30.



Fig

2.5 Comportamiento de las corrientes en el accionamiento de la escalera 3A, en el horario de las 20:30 a las 22:30.

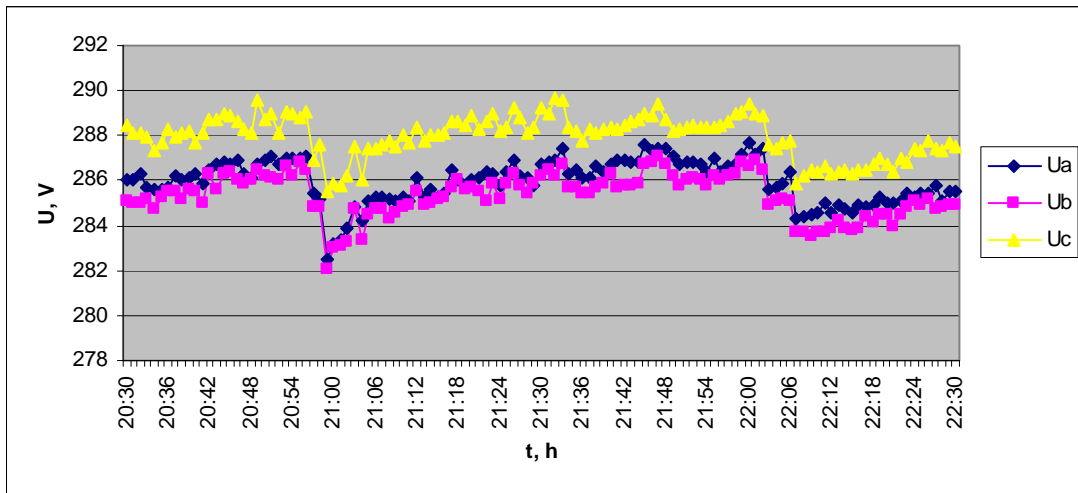


Fig. 3.5 Comportamiento de las tensiones en el accionamiento de la escalera 3A, en el horario de las 20:30 a las 22:30.

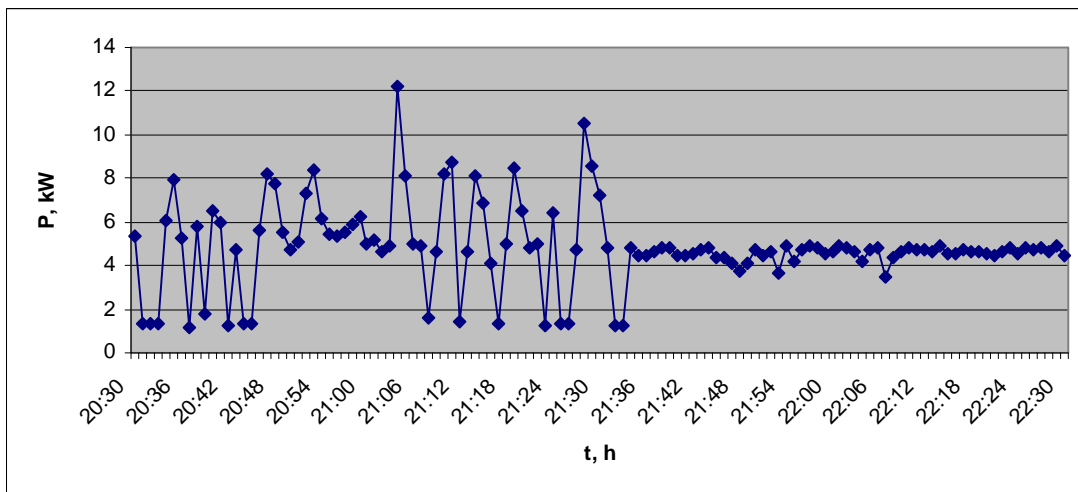


Fig. 4.5 Comportamiento de la potencia en el accionamiento de la escalera 3A, en el horario de las 20:30 a las 22:30.

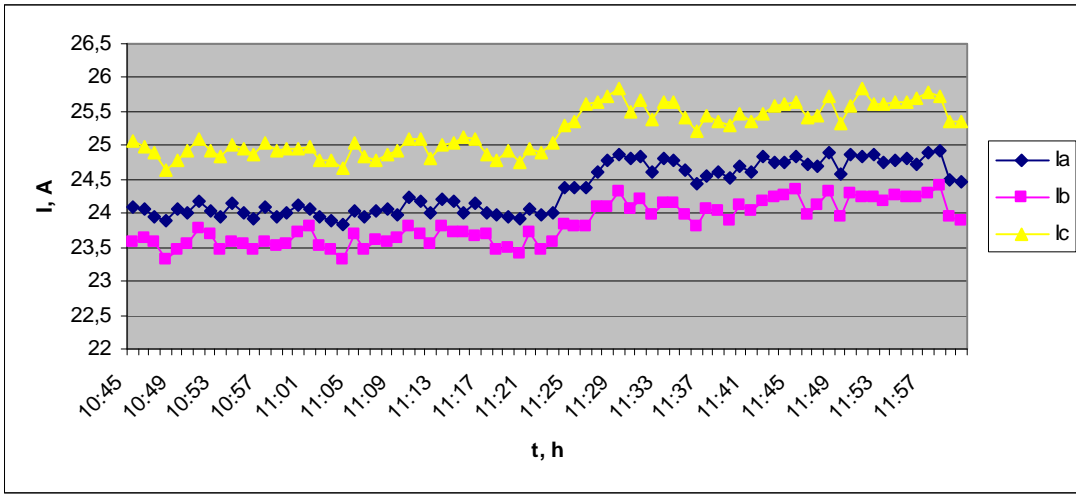


Fig. 5.5 Comportamiento de las corrientes en el accionamiento de la escalera 3B, en el horario de las 10:45 a las 12:00 m.

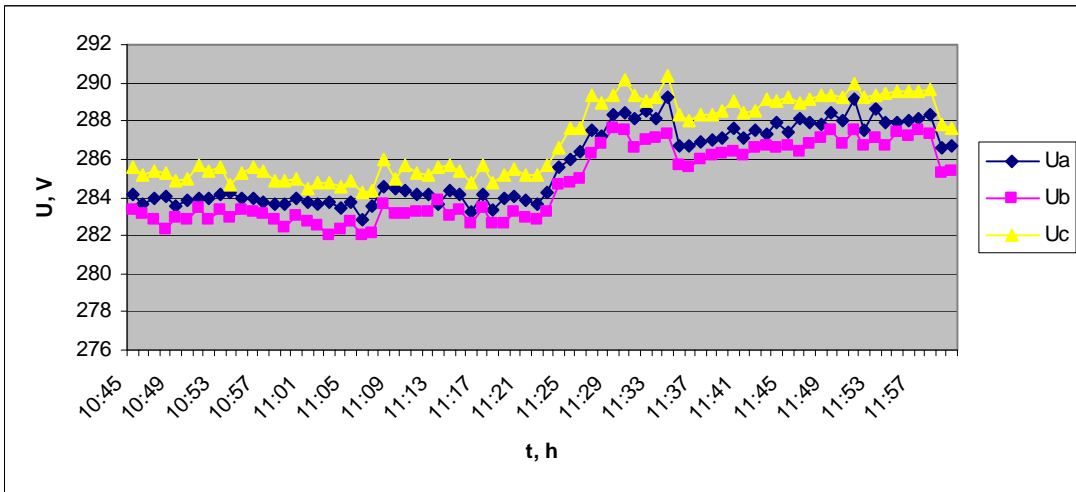


Fig. 6.5 Comportamiento de las tensiones en el accionamiento de la escalera 3B, en el horario de las 10:45 a las 12:00 m.

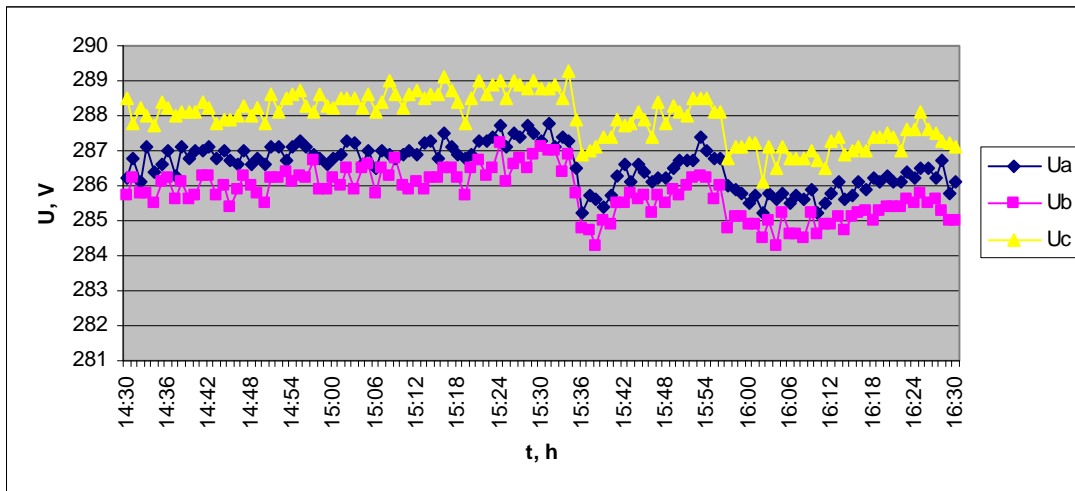


Fig. 7.5 Comportamiento de las tensiones en el accionamiento de la escalera 3B, en el horario de las 14:30 a las 16:30.

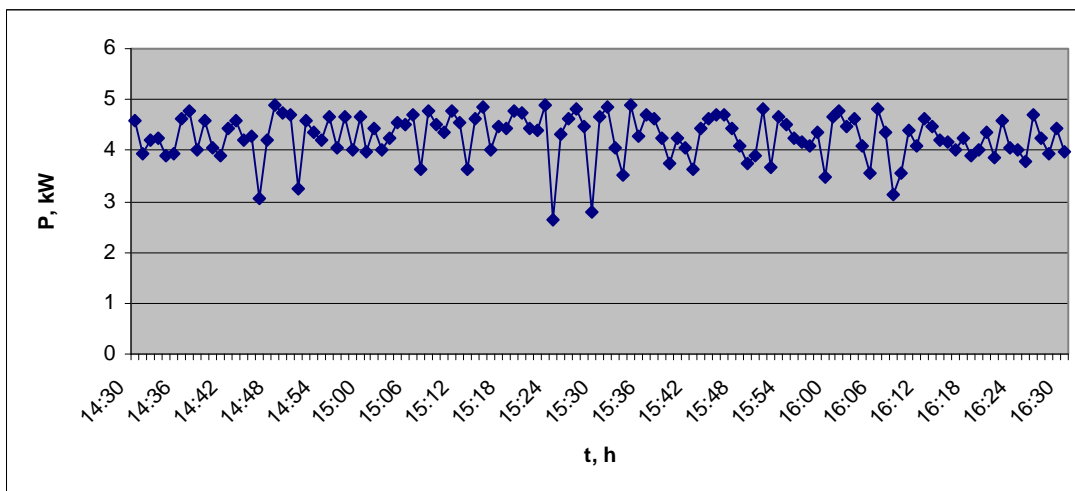


Fig. 8.5 Comportamiento de la potencia en el horario de las 14: 30 a las 16:30.

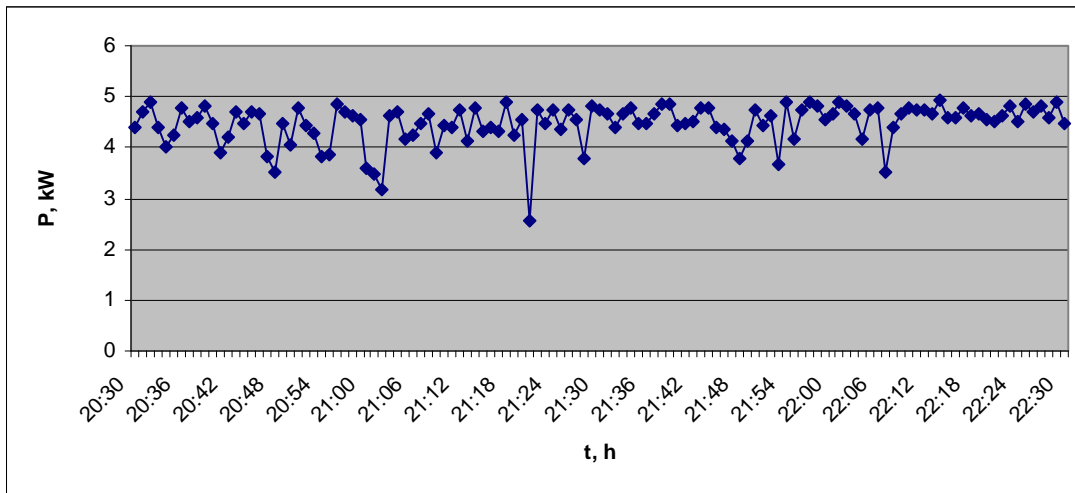


Fig. 9.5 Comportamiento de la potencia en el accionamiento de la escalera 3B, en el horario de las 20:30 a las 22:30.

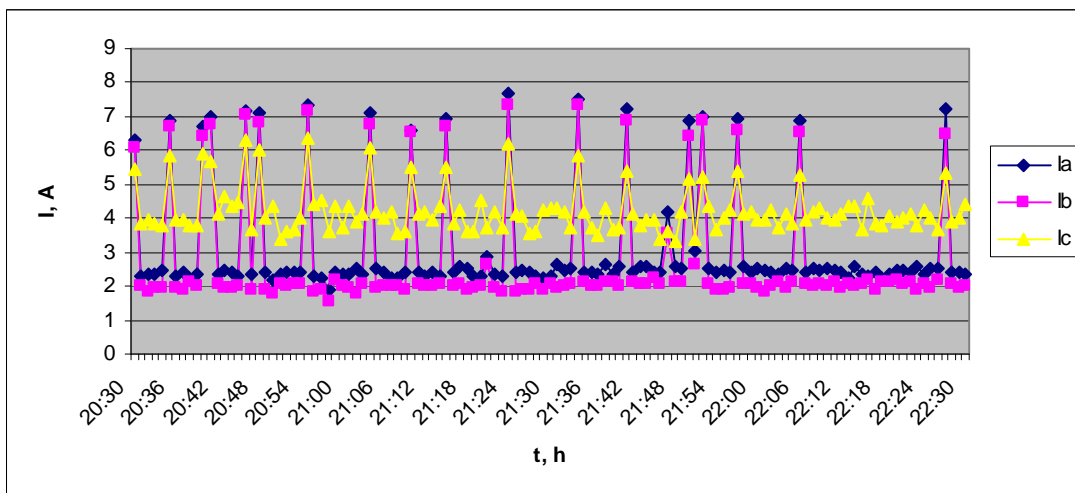


Fig. 10.5 Comportamiento de las corrientes en el accionamiento de la escalera EM-8, en el horario de las 20:30 a las 22:30.

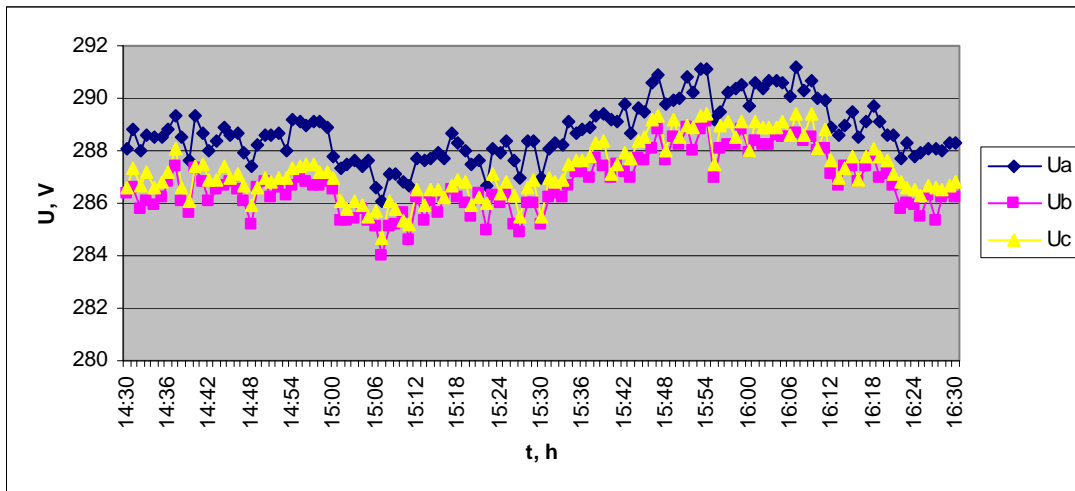


Fig. 11.5 Comportamiento de las tensiones en el accionamiento de la escalera EM-8, en el horario de las 14:30 a las 16:30.

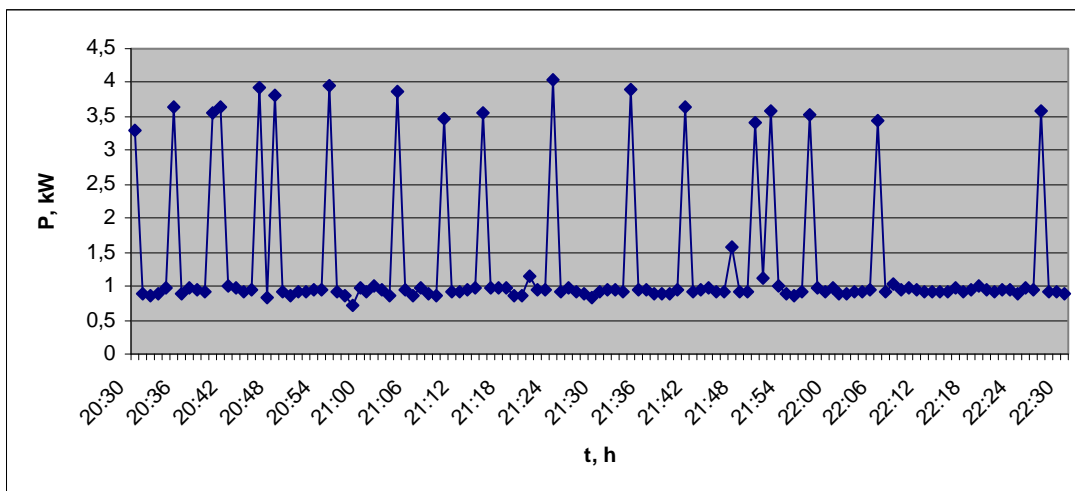


Fig. 12.5 Comportamiento de la potencia en el accionamiento de la escalera EM-8, en el horario de la 20:30 a las 22:30.