



UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DEPARTAMENTO DE ELECTROENERGÉTICA

TRABAJO DE DIPLOMA

**BALANCE ELECTROENERGÉTICO EN LA EMPRESA MIXTA
CEMENTOS CIENFUEGOS S.A.**

AUTOR:

Israel Agüero Lobaina

TUTORES:

Dr.C. Ignacio Pérez Abril.

Dr.C. José Luis Romero Cabrera.

CONSULTANTE:

Ing. Celso Manes Ramos.

Santa Clara, Cuba, 2017.



**UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
DEPARTAMENTO DE ELECTROENERGÉTICA**

Trabajo de Diploma

**BALANCE ELECTROENERGÉTICO EN LA EMPRESA MIXTA
CEMENTOS CIENFUEGOS S.A.**

Autor: Israel Agüero Lobaina
Email: iaguero@uclv.cu

Tutores: Dr.C. Ignacio Pérez Abril
Email: iperez@uclv.edu.cu
Centro de procedencia: Universidad Central "Marta
Abreu" de las Villas.

Dr.C. José Luis Romero Cabrera.
Email: jrcabrera@cementoscfg.com
Centro de procedencia: Empresa Mixta Cementos
Cienfuegos S.A.

Consultante: Ing. Celso Manes Ramos.
Email: cmanes@cnci.co.cu
Centro de procedencia: Centro Nacional para la
Certificación Industrial, Cienfuegos.

Santa Clara, Cuba, 2017.



Hago constar que el presente trabajo fue realizado en la Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas como parte de la culminación de los estudios de la especialidad de Ingeniería. Eléctrica autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Tutor.

Firma del Jefe de Departamento.

Firma del Responsable de
Información Científico-Técnica.

PENSAMIENTO

"...emplearse en lo estéril cuando se puede hacer lo útil; ocuparse en lo fácil cuando se tienen bríos para intentar lo difícil, es despojar de su dignidad al talento. Todo el que deja de hacer lo que es capaz de hacer, peca."

José Martí

DEDICATORIA

*En primer lugar se lo dedico a mi mamá y mi papá que supieron
guiarme por un buen camino para poder ser hoy quien soy.
A mis hermanos Yosniel y Yunier por nunca dejar de confiar en mí y
en general a toda mi familia.
A mis amigos por apoyarme incondicionalmente.*

AGRADECIMIENTOS

A mi familia porque fueron ellos los que hicieron posible que llegara hasta este nivel.

A mis amigos por estar siempre en los momentos buenos y malos.

A mis tutores Ignacio Pérez Abril y José Luis Romero por su ayuda incondicional en la realización de este trabajo.

A los que de una forma u otra contribuyeron en la realización de mi Trabajo de Diploma.

"A todos ustedes muchas gracias."

TAREAS TÉCNICAS

1. Visita a la empresa mixta Cementos Cienfuegos.SA.
2. Búsqueda de bibliografía relacionada con el tema.
3. Confección del monolineal de la industria.
4. Utilización de los medios disponibles para la recopilación de datos.
5. Proposición de variantes para el logro de los objetivos.
6. Redacción del informe.

RESUMEN

En el presente trabajo se realiza la revisión de artículos científicos, libros y trabajos precedentes sobre cálculo de pérdidas eléctricas en circuitos industriales y se ejecuta el electrobalance en la Empresa Mixta Cementos Cienfuegos S.A. a partir de una actualización detallada del monolineal de la industria y la aplicación del software IPA y del Motor Calculator. Como resultado del electrobalance se obtuvieron, los parámetros eléctricos de operación de los motores, transformadores y conductores (pérdidas eléctricas, coeficiente de carga, corriente de carga, etc.) y las deficiencias técnicas.

Se proponen además a partir del estudio de flujo de potencia, un grupo de medidas dirigidas a disminuir las pérdidas eléctricas en los elementos conectados a la red de 6 kV así como la factibilidad económica de la implementación de estas medidas.

Palabras claves: electrobalance y pérdidas eléctricas.

ÍNDICE

| | |
|---|------|
| PENSAMIENTO | IV |
| DEDICATORIA..... | V |
| AGRADECIMIENTOS | VI |
| TAREAS TÉCNICAS..... | VII |
| RESUMEN..... | VIII |
| ÍNDICE..... | IX |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| Capítulo 1 Fundamento teórico sobre el cálculo de pérdidas eléctricas y factor de potencia..... | 7 |
| 1.1 Generalidades sobre el cálculo de pérdidas | 7 |
| 1.1.1 Pérdidas de potencia en los transformadores..... | 7 |
| 1.1.2 Pérdidas de potencia en conductores | 11 |
| 1.1.3 Pérdidas de potencia en los motores | 12 |
| 1.1.4 Pérdidas de potencia referidas..... | 20 |
| 1.2 Generalidades sobre el factor de potencia..... | 21 |
| 1.2.1 Inconvenientes de un bajo factor de potencia | 22 |
| 1.2.2 Métodos de corrección del factor de potencia..... | 25 |
| CAPÍTULO 2 Descripción de la empresa y procedimiento a utilizar..... | 31 |
| 2.1 Descripción de la empresa..... | 31 |
| 2.1.1 Descripción del sistema eléctrico de la empresa | 31 |
| 2.2 Fundamentación de la investigación | 37 |
| 2.3 Procedimiento para la ejecución del balance electroenergético..... | 39 |
| 2.4 Descripción de los programas a utilizar..... | 40 |
| 2.5 Confección del monolineal. | 43 |
| CAPÍTULO 3 Análisis de los resultados y propuestas de mejora..... | 49 |
| 3.1 Comportamiento actual | 49 |
| 3.2 Propuestas de modificación y factibilidad económica | 58 |

| | |
|----------------------------------|----|
| CONCLUSIONES..... | 63 |
| RECOMENDACIONES | 65 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 67 |
| BIBLIOGRAFÍA | 68 |
| ANEXOS..... | 71 |

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

El ahorro de energía se ha convertido en los últimos tiempos en una prioridad a nivel mundial, lo que se traduce en un mejor aprovechamiento de los recursos disponibles, ya sea para la generación de energía eléctrica como para la distribución de la misma. Para hacer un uso eficiente de la energía, es preciso mantener un control estricto sobre la forma en que se materializa su consumo, mediante la determinación de datos fundamentales, como son: el consumo de energía de los distintos receptores eléctricos, la magnitud de las pérdidas de energía en las cargas y en los elementos componentes del sistema de suministro industrial, el factor de potencia en los puntos de interés y en general, un gran cúmulo de información, que conforma el cuadro electroenergético de una instalación dada y permite evaluar la eficiencia con que se utiliza la energía eléctrica en la misma.

En cualquier comercio, industria o institución, uno de los sistemas bases y de los más importantes es el sistema eléctrico, por lo cual es fundamental que sea confiable y se garantice su disponibilidad en todo momento, siendo objetivo primordial el manejo racional y consiente de la energía eléctrica que se utiliza para llevar a cabo sus procesos. Llevando cada proceso a utilizar la mínima cantidad de energía posible para desarrollarlo de manera óptima.

El sector industrial debería estar entonces, en la capacidad de medir y cuantificar de manera precisa, cuáles y cuantos son los consumos generados por los procesos, para de esta manera tener controlado el gasto que el consumo de energía trae con su utilización. Para esto es necesario como primer paso hacia el logro de una cultura de ahorro energético industrial, la identificación de los posibles puntos de “fuga” de energía, puntos donde el consumo es desmedido para la labor que realiza. La teoría simple y obvia de “apagar para ahorrar”, también aplica en este ambiente; aquellos procesos mal trabajado que operan inoficiosamente, son tan frecuentes que su impacto en el consumo total llega a ser de gran importancia. De allí la importancia de hacer un seguimiento a estos, tener cuantificado su consumo y generar de esta manera una conciencia y una plan de acciones correctivas que las mantengan controladas.

El continuo crecimiento de plantas industriales por el aumento en su producción se realiza en forma paralela al aumento de potencia instalada en los equipos, principalmente en motores. Un sistema eléctrico industrial moderno requiere tener buenas características técnicas de funcionamiento: seguridad, confiabilidad, regulación de tensión y calidad de la energía eléctrica.

Tal situación requiere la realización de estudios eléctricos en sistemas industriales, tanto en la etapa de planificación, como en la de operación, ampliación y mantenimiento. Un aspecto que interesa, es el dimensionamiento del equipamiento de gran consumo eléctrico (transformadores, motores).

El presente trabajo se desarrolla en la Empresa Mixta Cementos Cienfuegos S.A. Ubicada en el municipio Cienfuegos, esta instalación industrial, asume el 70% de la producción de cemento nacional. Por la importancia estratégica de sus producciones para el país, es necesario introducir modificaciones en su sistema de gestión con el objetivo de garantizar la competitividad de sus productos a partir de la disminución de los costos de sus consumos energéticos. En este sentido una de las acciones más eficaces para minimizar costos está relacionada con la detección y eliminación de pérdidas en sus sistemas eléctricos instalados.

Situación problémica.

A partir de la inversión realizada para la rehabilitación general de sus instalaciones, fueron introducidos nuevos elementos en su sistema eléctrico, manteniendo gran cantidad de equipos antiguos en operación, sin haberse realizado hasta el momento un balance electroenergético, a partir del estudio de flujo de potencia para facilitar la disminución de pérdidas eléctricas y el uso eficiente de la energía eléctrica en la empresa Cementos Cienfuegos S.A. Además, la empresa no cuenta con un monolineal actualizado que facilite la operación segura de la instalación eléctrica, motivando a la gerencia de la empresa, a través del Departamento Eléctrico de la misma, a solicitar dichos estudios a la universidad.

Problema científico a resolver.

Tomando lo anterior en consideración, se realizará un estudio de flujo de potencia mediante el uso del software IPA, actualizando detalladamente el monolineal de la

planta con el fin de obtener el estado de carga de los elementos principales del sistema eléctrico para posteriormente evaluar el rendimiento al cual está sometido dichos equipos.

A partir de estos antecedentes cabe entonces el planteamiento de la Interrogante Científica siguiente:

¿Cómo contribuir a la disminución de pérdidas eléctricas y al uso eficiente de la energía eléctrica, en la empresa Cementos Cienfuegos S.A. a partir del balance electroenergético?

Para dar respuesta a esta interrogante en el presente trabajo se planteó como **objetivo general** el siguiente:

Realizar el balance electroenergético a partir de estudio de flujo de potencia en los circuitos eléctricos en Cementos Cienfuegos S.A. para facilitar la disminución de pérdidas eléctricas y al uso eficiente de la energía eléctrica, en la empresa.

Para llevar a cabo este objetivo es necesario dar cumplimiento a los siguientes **objetivos específicos**:

1. Determinar los fundamentos teóricos acerca de los estudios de pérdidas en circuitos eléctricos.
2. Recopilar los datos necesarios a introducir en el software Industrial Power Analyzer (IPA).
3. Determinar indicadores del comportamiento energético.
4. Proponer mejoras al sistema eléctrico de la empresa Cementos Cienfuegos S.A. y su factibilidad económica.

Justificación

La realización de un balance electroenergético en la empresa Cementos Cienfuegos S.A sustentada sobre la base de los principales consumidores eléctricos para la determinación de las pérdidas totales y sus alternativas para solucionar el uso irracional de la energía en el sistema eléctrico. A partir del electrobalance se analiza

cómo se está utilizando la energía y se elaboran medidas de ahorro con el objetivo de incrementar la eficiencia del uso de la energía en la empresa. De esta forma se podría incidir de manera provechosa en el costo de la energía por producción (índice de consumo) de la fábrica y contribuir con su rentabilidad.

Viabilidad

El estudio es viable pues es un tema de suma importancia para la empresa. Además se cuenta con los recursos necesarios, tales como instrumentos de medición, entre otros que pudieran ser empleados para la realización del trabajo, existe un personal calificado en disposición de proporcionar toda la información necesaria y también se cuenta con parte de la documentación de algunos equipos que puede ser usada como fuente para la obtención de datos.

Limitaciones y alcance

El estudio está previsto para todos los transformadores existentes, así como los motores de 6 kV y los accionamientos principales.

Organización del informe

La tesis se estructura en tres capítulos, conclusiones, recomendaciones y anexos.

En el Capítulo 1 se desarrolla el marco teórico de la investigación, en el cual se realiza una revisión de artículos científicos, libros y trabajos precedentes, para evaluar los elementos teóricos del tema, mostrar su actualidad y visualizar el manejo del tema por otros profesionales y especialistas; cada punto ha sido desarrollado en conformidad con el método científico. Además hace referencia a los efectos de un bajo factor de potencia y a los métodos para mejorarlo.

En el Capítulo 2 se hace una descripción del circuito que se va a analizar en cuanto a la configuración de la red. Se describen los programas que se usa para los cálculos. Especifica el procedimiento y aplicaciones informáticas que serán utilizadas para el cálculo y finalmente se definen las condiciones de operación de la planta que establecen las condiciones extremas de operación del sistema eléctrico para la creación de los escenarios.

En el Capítulo 3 se desarrolla la metodología y se interpretan los resultados en relación con el cumplimiento de los objetivos propuestos, analizándose las posibles acciones de mejoras y su factibilidad económica.

CAPÍTULO 1

Capítulo 1 Fundamento teórico sobre el cálculo de pérdidas eléctricas y factor de potencia

En este capítulo se abordan los temas fundamentales sobre el cálculo de pérdidas eléctricas en transformadores motores y conductores. Se abordan aspectos básicos sobre el factor de potencia con sus inconvenientes y métodos de corrección.

1.1 Generalidades sobre el cálculo de pérdidas

La energía eléctrica consumida por el sector industrial representa en condiciones normales de trabajo un porcentaje muy significativo de la producción energética de las plantas generadoras del Sistema Electroenergético Nacional (SEN). Un porcentaje determinado de la potencia eléctrica activa y reactiva consumida por la industria se convierte en pérdidas en los diferentes elementos del sistema de suministro: plantas, transformadores, conductores y motores.

1.1.1 Pérdidas de potencia en los transformadores

Las pérdidas de potencia de un transformador se dividen en:[1]

- ✓ Pérdidas sin carga (ΔP_{sc}), compuestas principalmente por pérdidas de núcleo, pérdidas de cobre debidas a la corriente de excitación y pérdidas por histéresis y corrientes parásitas.
- ✓ Pérdidas de cortocircuito (ΔP_{cc}), debidas a las pérdidas de cobre en ambos devanados por la circulación de la corriente de carga, pérdidas por corrientes parásitas en los conductores y pérdidas adicionales en la estructura del transformador.
- ✓ Pérdidas de potencia reactiva sin carga (ΔQ_{sc}), debidas a la magnetización del núcleo del transformador.
- ✓ Pérdidas reactivas de cortocircuito (ΔQ_{cc}), asociadas al flujo disperso de ambos devanados.

Desde todos los puntos de vista, las pérdidas sin carga pueden considerarse constantes para un voltaje dado, mientras que las pérdidas de cortocircuito varían

cuadráticamente con la corriente de carga. Las pérdidas de potencia reactiva sin carga y en cortocircuito pueden determinarse:[2]

$$\Delta Q_{sc} = \sqrt{(\%I_{sc} \cdot S_n / 100)^2 - \Delta P_{sc}^2} \approx \%I_{sc} \cdot S_n / 100 \quad (1.1)$$

$$\Delta Q_{cc} = \sqrt{(\%V_{cc} \cdot S_n / 100)^2 - \Delta P_{cc}^2} \approx \%V_{cc} \cdot S_n / 100 = \%Z \cdot S_n / 100 \quad (1.2)$$

Dónde:

ΔQ_{sc} : Pérdidas de potencia reactiva sin carga.

ΔQ_{cc} : Pérdidas de potencia reactiva en cortocircuito.

S_n : Potencia aparente nominal.

Las pérdidas activas y reactivas varían cuadráticamente con el coeficiente de carga del transformador:

$$k_c = S / S_n = I / I_n \quad (1.3)$$

$$\Delta P(k_c) = \Delta P_{sc} + k_c^2 \cdot \Delta P_{cc} \quad (1.4)$$

$$\Delta Q(k_c) = \Delta Q_{sc} + k_c^2 \cdot \Delta Q_{cc} \quad (1.5)$$

Dónde:

k_c : coeficiente de carga del transformador.

ΔP_{sc} : Pérdidas de potencia activa sin carga.

ΔP_{cc} : Pérdidas de potencia activa en cortocircuito.

I_n : corriente nominal.

I : corriente de carga.

Pérdidas en transformadores de tres devanados:

En determinados casos, puede ser económica la utilización de transformadores de tres devanados para alimentar cargas a diferentes niveles de voltaje. La expresión empleada para el cálculo de las pérdidas referidas en estos transformadores es:[3]

$$\Delta P' = \Delta P_{sc}' + k_{c_1}^2 \Delta P_{cc_1}' + k_{c_2}^2 \Delta P_{cc_2}' + k_{c_3}^2 \Delta P_{cc_3}' \quad (1.6)$$

Donde los subíndices 1, 2 y 3 identifican los devanados de alto, medio y bajo voltaje respectivamente.

Los coeficientes de carga respectivos se definen como la relación de la carga en cada devanado con respecto a la capacidad nominal del devanado primario del transformador, verificándose en la práctica que la carga del primario se divide aritméticamente entre los dos devanados restantes, o sea:

$$kc_1 = kc_2 + kc_3 \quad (1.7)$$

Considerando que usualmente los catálogos ofrecen los datos de estos transformadores entre pares de devanados, puede verse que si:

$$\Delta P_{cc_{12}}' = \Delta P_{cc_1}' + \Delta P_{cc_2}' \quad (1.8)$$

$$\Delta P_{cc_{23}}' = \Delta P_{cc_2}' + \Delta P_{cc_3}' \quad (1.9)$$

$$\Delta P_{cc_{31}}' = \Delta P_{cc_3}' + \Delta P_{cc_1}' \quad (1.10)$$

Entonces pueden obtenerse las pérdidas por devanado mediante las expresiones:

$$\Delta P_{cc_1}' = \frac{1}{2}(\Delta P_{cc_{12}}' + \Delta P_{cc_{31}}' - \Delta P_{cc_{23}}') \quad (1.11)$$

$$\Delta P_{cc_2}' = \frac{1}{2}(\Delta P_{cc_{23}}' + \Delta P_{cc_{12}}' - \Delta P_{cc_{31}}') \quad (1.12)$$

$$\Delta P_{cc_3}' = \frac{1}{2}(\Delta P_{cc_{31}}' + \Delta P_{cc_{23}}' - \Delta P_{cc_{12}}') \quad (1.13)$$

Pérdidas en autotransformadores:

En el caso de los autotransformadores, de acuerdo a la práctica usual de realizar las pruebas de cortocircuito en los devanados de alto (1) y medio voltaje (2), las pérdidas de cortocircuito ($\Delta P_{cc_{12}}'$) quedan referidas a la potencia nominal del transformador (S_n), mientras que ($\Delta P_{cc_{31}}'$) y ($\Delta P_{cc_{23}}'$) quedan referidas a la llamada potencia ($Stipo$) que se define como:[1]

$$Stipo = \alpha \cdot S_n \quad \text{con} \quad \alpha = \frac{V_1 - V_2}{V_3} \quad (1.14)$$

Las pérdidas en cada devanado se encuentran a partir de:

$$\Delta P_{cc_1}' = \frac{1}{2}(\Delta P_{cc_{12}}' + \Delta P_{cc_{31}}' / \alpha^2 - \Delta P_{cc_{23}}' / \alpha^2) \quad (1.15)$$

$$\Delta P_{cc_2}' = \frac{1}{2}(\Delta P_{cc_{23}}' / \alpha^2 + \Delta P_{cc_{12}}' - \Delta P_{cc_{31}}' / \alpha^2) \quad (1.16)$$

$$\Delta P_{cc_3}' = \frac{1}{2}(\Delta P_{cc_{31}}' / \alpha^2 + \Delta P_{cc_{23}}' / \alpha^2 - \Delta P_{cc_{12}}') \quad (1.17)$$

Pérdidas con cargas variables:

Las pérdidas de energía activa y reactiva en un transformador ante un gráfico de carga variable en el tiempo se determinan como la suma de las pérdidas de potencia activa y reactiva en cada estado de carga, es decir:[2]

$$\Delta E_a = \sum_{i=1}^n (\Delta P_{sc} + k c_i^2 \cdot \Delta P_{cc}) \Delta t_i \quad (1.18)$$

$$\Delta E_r = \sum_{i=1}^n (\Delta Q_{sc} + K c_i^2 \cdot \Delta Q_{cc}) \Delta t_i \quad (1.19)$$

Dónde:

ΔE_a : Pérdidas de energía activa.

ΔE_r : Pérdidas de energía reactiva.

Δt_i : Variación del tiempo.

Otra forma de calcular dichas pérdidas es:

$$\Delta E_a = T \left[\Delta P_{sc} + \left(\frac{1}{T} \sum_{i=1}^n S_i^2 \Delta t_i \right) \cdot \frac{\Delta P_{cc}}{S_n^2} \right] \quad (1.20)$$

$$\Delta E_r = T \left[\Delta Q_{sc} + \left(\frac{1}{T} \sum_{i=1}^n S_i^2 \Delta t_i \right) \cdot \frac{\Delta Q_{cc}}{S_n^2} \right] \quad (1.21)$$

Y siendo el término destacado en el paréntesis central el cuadrado de la potencia aparente medio cuadrática del diagrama de carga considerado (S_{MC}), entonces pueden calcularse las pérdidas de energía referidas como:[4]

$$\Delta E_a = T \left[\Delta P_{sc} + \left(\frac{S_{mc}}{S_n} \right)^2 \Delta P_{cc} \right] = T \left[\Delta P_{sc} + k c_{MC}^2 \Delta P_{cc} \right] \quad (1.22)$$

$$\Delta Er = T \left[\Delta Q_{SC} + \left(\frac{S_{MC}}{S_n} \right)^2 \Delta Q_{CC} \right] = T \left[\Delta Q_{SC} + k_{c_{MC}}^2 \Delta Q_{CC} \right] \quad (1.23)$$

Dónde:

S_{MC} : Potencia aparente medio cuadrática.

T: Tiempo.

1.1.2 Pérdidas de potencia en conductores

Las pérdidas de potencia en una línea aérea, cable o barras de distribución se divide en:[1]

- ✓ Pérdidas por efecto Joule debidas al paso de la corriente de carga por la resistencia serie de los conductores.
- ✓ Pérdidas de potencia reactiva producidas por la corriente de carga en la reactancia serie de la línea.
- ✓ Pérdidas de potencia activa en las conductancias paralelo de la línea.
- ✓ Potencia reactiva generada por el efecto capacitivo de la línea.

Las pérdidas sin carga son despreciables por el bajo valor de la conductancia paralelo, mientras que el reactivo generado por la línea depende de forma cuadrática con el voltaje, pero para el caso de sistemas industriales es muy pequeño por la longitud reducida de los alimentadores.

Por su parte, las pérdidas debidas a la corriente de carga dependen cuadráticamente de esta, de forma tal que:[5]

$$\Delta P = 3I^2 R = \frac{P^2 + Q^2}{V^2} R \quad (1.24)$$

$$\Delta Q = 3I^2 X = \frac{P^2 + Q^2}{V^2} X \quad (1.25)$$

Dónde:

ΔP : Pérdidas de potencia activa.

ΔQ : Pérdidas de potencia reactiva.

R: Resistencia de la línea.

X: Impedancia de la línea.

V: Voltaje de línea.

Pérdidas con cargas variables:

Las pérdidas de energía activa y reactiva ante un gráfico de carga variable en el tiempo se determinan como la suma de las pérdidas de potencia activa y reactiva en cada estado de carga, es decir:[5]

$$\Delta E_a = \sum_{i=1}^n (3I_i^2 R) \Delta t_i = \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} R \right) \Delta t_i \quad (1.26)$$

$$\Delta E_r = \sum_{i=1}^n (3I_i^2 X) \Delta t_i = \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} X \right) \Delta t_i \quad (1.27)$$

Utilizando los valores medio cuadráticos de la corriente (I_{MC}), la potencia activa (P_{MC}) y reactiva (Q_{MC}) considerando el voltaje constante, puede plantearse:

$$\Delta E_a = 3T \cdot I_{MC}^2 R = T \frac{P_{MC}^2 + Q_{MC}^2}{V^2} R \quad (1.28)$$

$$\Delta E_r = 3T \cdot I_{MC}^2 X = T \frac{P_{MC}^2 + Q_{MC}^2}{V^2} X \quad (1.29)$$

1.1.3 Pérdidas de potencia en los motores

En el caso de los motores es preciso destacar que la potencia de salida de estos equipos es mecánica. Las pérdidas en este caso son:[1]

- ✓ Pérdidas de cobre en el estator y el rotor por efecto de las corrientes de carga que circulan por ambos devanados. Se agrupan en las pérdidas con carga (ΔP_{cc}).
- ✓ Pérdidas de potencia reactiva en ambos devanados por la presencia de las reactancias de dispersión de los mismos. Se agrupan en las pérdidas con carga (ΔQ_{cc}).

- ✓ Pérdidas de fricción, batimiento y núcleo, así como pérdidas adicionales que se reflejan en la resistencia paralelo del circuito equivalente. Se agrupan en las pérdidas sin carga (ΔP_{sc}).
- ✓ Pérdidas de potencia reactiva debidas a la corriente de magnetización del núcleo ferromagnético de la máquina. Se agrupan en las pérdidas sin carga (ΔQ_{sc}).

El hecho de que estos receptores operan generalmente fuera de su estado de carga nominal e incluso con régimen de operación variable en el tiempo, complica la determinación de las pérdidas para un estado de carga determinado.

Para evaluar con exactitud el comportamiento energético de un motor en sus condiciones reales de trabajo, es preciso contar con un conjunto de instrumentos y facilidades de medición que no son comúnmente disponibles en la industria. Además, es preciso que las pruebas necesarias afecten lo menos posible la continuidad del proceso productivo.

Varios métodos simplificados se emplean para estimar el estado de carga de un motor en operación con mínimos recursos de medición, entre ellos se destacan:

- ✓ Las curvas de comportamiento del fabricante.

Estas comprenden entre otras, las características de eficiencia, factor de potencia, corriente y velocidad contra carga del motor en condiciones de voltaje nominal como se muestra en la figura 1.1.[6]

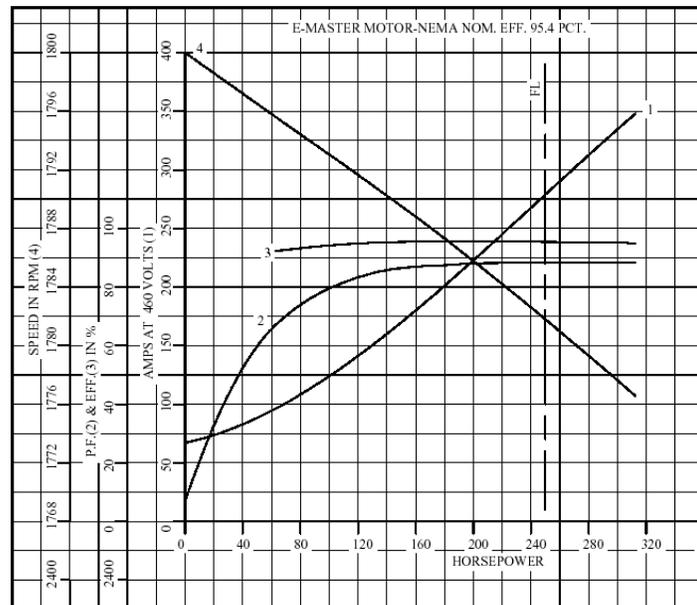


Figura 1.1 Curvas de un motor de 250 HP, 460 V y 1780 RPM modelo P44G6500.

Contando con estas curvas, es posible estimar con facilidad el comportamiento del motor para una carga dada cuando el voltaje de suministro coincide con el de chapa y cumple los requerimientos de calidad necesarios. Sin embargo, en muchas ocasiones las curvas que se suministran son el resultado de cálculos basados en los datos de diseño del motor y no se cumplen exactamente para los motores producidos.

✓ Las tablas de comportamiento del fabricante.

Por otra parte, los fabricantes acostumbran ofrecer los datos de comportamiento típicos de los motores para determinados por cientos de carga característicos (0, 25, 50, 75, 100, 125%, etc.) [6, 7]. Estos datos se obtienen en pruebas experimentales a muestras de los motores fabricados, por lo que constituyen una buena aproximación para el comportamiento de dichos motores.

El método para estimar el estado de carga del motor se basa en emplear las tablas de comportamiento de los motores e interpolar linealmente entre los valores tabulados para reconstruir aproximadamente las curvas de comportamiento del motor.

Suponiendo que la variable medida es la corriente I y este valor se encuentra entre los puntos I_A, I_B, entonces los valores de kc, la velocidad (rpm), la eficiencia (η) y factor de potencia (cosφ) se estiman por las expresiones:[6]

$$kc \approx kc_A + \frac{kc_B - kc_A}{I_B - I_A} (I - I_A) \quad (1.30)$$

$$rpm \approx rpm_A + \frac{rpm_B - rpm_A}{I_B - I_A} (I - I_A) \quad (1.31)$$

$$\eta \approx \eta_A + \frac{\eta_B - \eta_A}{I_B - I_A} (I - I_A) \quad (1.32)$$

$$\cos \phi \approx \cos \phi_A + \frac{\cos \phi_B - \cos \phi_A}{I_B - I_A} (I - I_A) \quad (1.33)$$

La estimación de las características de operación mediante curvas o tablas puede ser inexacta cuando el motor opera en condiciones de voltaje diferente al nominal o están presentes fenómenos de desbalance y/o armónicos, en cuyo caso pueden emplearse las correcciones mostradas en la tabla 1.1.[8]

Tabla 1.1 Variación aproximada de varios parámetros del motor de inducción con respecto al voltaje.

| Parámetro | V = 90% | Función | V =110% |
|--------------------------|--------------|------------------|--------------------|
| Par de arranque y máximo | -19% | V ² | +21% |
| Deslizamiento | +23% | 1/V ² | -17% |
| Eficiencia | | | |
| 100% carga | -2 ptos | | Pequeño incremento |
| 75% carga | No cambia | | No cambia |
| 50% carga | +1 a +2 ptos | | -1 a -2 ptos |
| Factor de potencia | | | |
| 100% carga | +1 pto | | -3 ptos |
| 75% carga | +2 a +3 ptos | | -4 ptos |
| 50% carga | +4 a +5 ptos | | -5 a -6 ptos |

Por su parte, el efecto del desbalance de voltaje puede estimarse según la figura 1.2 mostrada a continuación.[9]

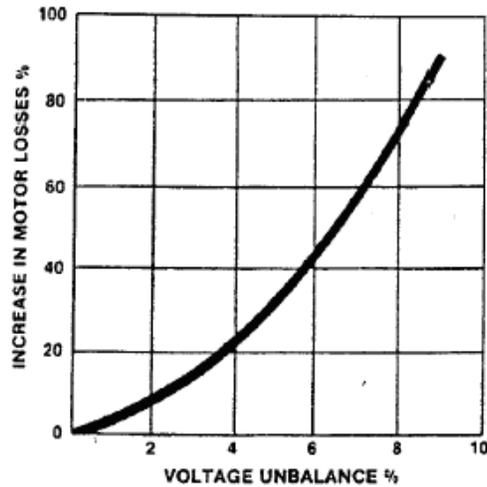


Figura 1.2 Efecto de desbalance del voltaje.

Otra corrección a la eficiencia del motor cuando hay presencia de distorsión armónica en el voltaje de alimentación puede estimarse mediante la figura 1.3.[9]

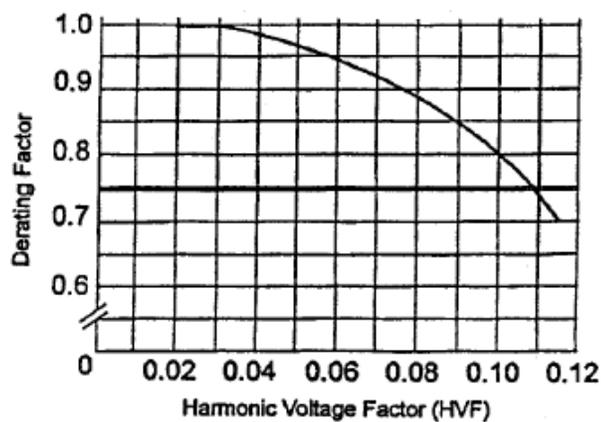


Figura 1.3 Corrección a la eficiencia del motor.

Desde el punto de vista práctico, se han desarrollado diferentes expresiones aproximadas para estimar el estado de carga del motor y calcular las pérdidas del motor para una carga diferente de la nominal.[6]

✓ Relación de potencia de salida a potencia de salida nominal.

El coeficiente de carga del motor es la relación de potencia de salida a potencia nominal.

$$k_c = \frac{P_{sal}}{P_N} \quad (1.34)$$

Considerando este coeficiente de carga, las pérdidas de potencia activa y reactiva para un estado de carga cualquiera pueden calcularse aproximadamente por las expresiones:

$$\Delta P = (V / V_n)^2 \Delta P_{sc} + k_c^2 \Delta P_{cc} \quad (1.35)$$

$$\Delta Q = (V / V_n)^2 \Delta Q_{sc} + k_c^2 \Delta Q_{cc} \quad (1.36)$$

Donde las pérdidas nominales pueden obtenerse a partir de los datos de chapa y una prueba de rotor libre mediante las expresiones:

$$\Delta P_{sc} = P(\text{rotor libre}) \quad (1.37)$$

$$\Delta Q_{sc} = Q(\text{rotor libre}) \approx \sqrt{3} \cdot V_n \cdot I_{sc} \quad (1.38)$$

$$\Delta P_{cc} = P_N (1 / \eta_N - 1) - \Delta P_{sc} \quad (1.39)$$

$$\Delta Q_{cc} = P_N / \eta_N \tan(\cos^{-1}(fp_N)) - \Delta Q_{sc} \quad (1.40)$$

✓ La relación de potencia de entrada a potencia de entrada nominal.

El coeficiente de carga del motor es la relación de potencia de salida a potencia de salida nominal, de forma que puede plantearse que:

$$k_c = \frac{P}{P_n} = \frac{P_{ent} \cdot \eta}{P_{entn} \cdot \eta_n} \approx \frac{P_{ent}}{P_{entn}} \quad (1.41)$$

Esta aproximación será más exacta en la medida en que no varíe la eficiencia del motor, o sea, en los estados de carga cercanos al nominal.

Como en este caso se ha asumido que la eficiencia no cambia con la carga, las pérdidas activas en el motor se calcularían a eficiencia nominal y las reactivas a partir del k_c calculado.

$$\Delta Q = \Delta Q_{sc} + \Delta Q_n \cdot k_c^2 \quad (1.42)$$

- ✓ La relación de corriente a corriente nominal.

En la práctica, comúnmente se acostumbra asociar el estado de carga del motor con la relación de corriente a corriente nominal, es decir:

$$k_c = \frac{P}{P_n} \approx \frac{I}{I_n} \quad (1.43)$$

Sin embargo, este procedimiento es muy inexacto, sobre todo para valores de carga reducida, ya que tanto la eficiencia como el factor de potencia del motor varían con su estado de carga, por lo que la relación real sería para un voltaje de alimentación nominal:

$$k_c = \frac{P}{P_n} = \frac{\sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \eta \cdot \cos \phi}{\sqrt{3} \cdot V_n \cdot I_n \cdot \eta_n \cdot \cos \phi_n} = \frac{I \cdot \eta \cdot \cos \phi}{I_n \cdot \eta_n \cdot \cos \phi_n} \quad (1.44)$$

Como el producto eficiencia x factor de potencia se reduce en la medida en que disminuye la carga del motor, el coeficiente de carga (k_c) siempre será menor que la relación de corriente a corriente nominal.

Cuando hay variaciones en la tensión de trabajo del motor, se emplea la expresión:

$$k_c \approx \frac{V \cdot I}{V_n \cdot I_n} \quad (1.45)$$

No obstante, si se cumplen las expresiones anteriores, puede plantearse que:

$$kVA^2 = [(\Delta P_{sc} + kc^2 \Delta P_{cc}) + kc \cdot P_N]^2 + [\Delta Q_{sc} + kc^2 \Delta Q_{cc}]^2 \quad (1.46)$$

Y a partir de esta se puede buscar una expresión iterativa para obtener k_c como:

$$k_c = \frac{\sqrt{kVA^2 - [\Delta Q_{sc} + kc^2 \Delta Q_{cc}]^2} - [\Delta P_{sc} + kc^2 \Delta P_{cc}]}{P_N} \quad (1.47)$$

- ✓ La relación de deslizamiento a deslizamiento nominal.

Un método aproximado que se puede emplear para estimar el coeficiente de carga del motor se basa en medir su velocidad bajo carga (n_2) y determinar k_c como la relación de deslizamiento a deslizamiento nominal.

$$kc \approx \frac{S}{S_n} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 - n_{2n}} \quad (1.48)$$

Dónde:

S: Deslizamiento.

n: Velocidad angular.

Este procedimiento se recomienda cuando se tiene un tacómetro óptico y no se dispone de lecturas de potencia de entrada.

Debido a que el deslizamiento varía con la tensión efectiva real, se ha hecho un refinamiento en la fórmula anterior:

$$kc \approx \frac{n_1 - n_2}{(n_1 - n_{2n})(Vn/V)^2} \quad (1.49)$$

En los métodos de la corriente o el deslizamiento, una vez estimado el estado de carga del motor pueden emplearse las expresiones de las pérdidas activas y reactivas:

$$\Delta P = \Delta P_{sc} + \Delta P_n \cdot kc^2 \quad (1.50)$$

$$\Delta Q = \Delta Q_{sc} + \Delta Q_n \cdot kc^2 \quad (1.51)$$

Pérdidas con carga variable:

Las pérdidas de energía activa y reactiva en un motor ante un gráfico de carga variable en el tiempo se determinan como la suma de las pérdidas de potencia activa y reactiva en cada estado de carga, es decir:[6]

$$\Delta Ea = \sum_{i=1}^n \Delta P_i \cdot \Delta t_i \quad (1.52)$$

$$\Delta Er = \sum_{i=1}^n \Delta Q_i \cdot \Delta t_i \quad (1.53)$$

Utilizando el valor medio cuadrático del coeficiente de carga (k_{CMC}) y suponiendo constante el voltaje, puede plantearse:

$$\Delta E_a = T(\Delta P_{sc} + kc_{MC}^2 \Delta P_{cc}) \quad (1.54)$$

$$\Delta E_r = T(\Delta Q_{sc} + kc_{MC}^2 \Delta Q_{cc}) \quad (1.55)$$

1.1.4 Pérdidas de potencia referidas

El consumo de potencia reactiva de las cargas industriales circula por los elementos del SEN provocando pérdidas de potencia activa adicionales en el mismo. Por lo tanto, cuando se realizan análisis de consumo energético en la industria, no deben contabilizarse solamente las pérdidas de potencia activa de los equipos, sino también considerar el efecto que provoca en la red el consumo de potencia reactiva de dichos equipos.

El efecto de esta carga reactiva se evalúa corrientemente utilizando el coeficiente incremental de pérdidas activas por el consumo de reactivo (kip), cuya magnitud se encuentra normalmente 0.02-0.12 kW/kVAr en dependencia de la distancia a que se encuentre la empresa industrial con respecto a las plantas generadoras del SEN.

Como quiera que los receptores y los mismos elementos del sistema industrial consumen para su trabajo no solo potencia activa, sino reactiva, es que se introduce el concepto de pérdidas referidas de potencia en dichos elementos. Pérdidas que involucran tanto las pérdidas de potencia activas como las que se producen en el SEN debido a la circulación por el mismo de la potencia reactiva que se consume en pérdidas en dicho elemento.

Las pérdidas totales referidas del transformador se calculan como la suma de las pérdidas de potencia activa y las de potencia reactiva afectadas por el kip.[1]

$$\Delta P' = \Delta P + kip \cdot \Delta Q \quad (1.56)$$

$$\Delta P' = (\Delta P_{sc} + kc^2 \Delta P_{cc}) + kip(\Delta Q_{sc} + kc^2 \Delta Q_{cc}) \quad (1.57)$$

$$\Delta P' = (\Delta P_{sc} + kip \cdot \Delta Q_{sc}) + kc^2 (\Delta P_{cc} + kip \cdot \Delta Q_{cc}) \quad (1.58)$$

Dónde:

kip: Coeficiente incremental de pérdidas.

$\Delta P'$: Pérdidas activas totales referidas.

De esta manera, se definen las pérdidas sin carga y de cortocircuito referidas por las expresiones:

$$\Delta P_{sc}' = \Delta P_{sc} + k_{ip} \cdot \Delta Q_{sc} \quad (1.59)$$

$$\Delta P_{cc}' = \Delta P_{cc} + k_{ip} \cdot \Delta Q_{cc} \quad (1.60)$$

Las pérdidas totales referidas del transformador para un estado de carga determinado se calcularán en base al coeficiente de carga k_c :

$$\Delta P'(k_c) = \Delta P_{sc}' + k_c^2 \cdot \Delta P_{cc}' \quad (1.61)$$

Esta expresión puede representarse gráficamente como una parábola cuyo intercepto con el eje de las pérdidas es el consumo en vacío del transformador como se muestra en la figura 1.4.

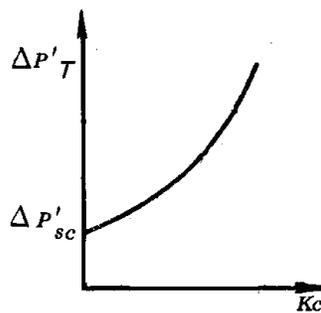


Figura 1.4 Pérdidas referidas del transformador

Las pérdidas referidas son iguales a las pérdidas de potencia activa cuando $k_{ip} = 0$ o pueden ser algo mayores en el caso en que $k_{ip} > 0$.

1.2 Generalidades sobre el factor de potencia

Operar con bajo factor de potencia una instalación eléctrica, además del impacto en el pago de electricidad, tiene otras implicaciones de igual o mayor significación, particularmente en relación con la capacidad de los equipos de transformación y distribución de la energía eléctrica y con el uso eficiente de las máquinas y aparatos que funcionan con electricidad. La mayoría de las cargas industriales son de naturaleza inductiva, siendo estas la que dan origen al bajo factor de potencia, con los inconvenientes que esto ocasiona.

Energéticamente hablando, el factor de potencia ($\cos\phi$) es la relación entre la potencia activa (que produce trabajo en la carga) y la potencia aparente de circuito:[10]

$$\cos\phi = f_p = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{3}VI} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \cos(\tan^{-1}(Q/P)) \quad (1.62)$$

Esta es la expresión del factor de potencia instantáneo en un momento dado. Sin embargo, considerando la variabilidad de la carga eléctrica en el tiempo, se acostumbra a emplear el término de factor de potencia medio pesado para referirse a un valor constante que representa la relación entre la energía activa E_a (kW.h) y la energía aparente E_s (kVA.h) suministrada a la carga:[10]

$$f_{p_{MP}} = \frac{E_a}{\sqrt{E_a^2 + E_r^2}} = \cos(\tan^{-1}(E_r / E_a)) \quad (1.63)$$

Dónde:

$f_{p_{MP}}$: Factor de potencia medio pesado.

El factor de potencia medio pesado es el que corrientemente se emplea por las empresas distribuidoras de energía eléctrica para facturar la energía que se suministra a una empresa industrial dada.

1.2.1 Inconvenientes de un bajo factor de potencia

Una instalación industrial común tiene un factor de potencia natural que puede ser relativamente bajo, en el rango de 0.6 a 0.8 inductivo. Este bajo factor de potencia se debe a la presencia de motores asíncronos subcargados, el uso de convertidores electrónicos para el suministro de corriente directa, la utilización de dispositivos de inducción, unidades de climatización, y el empleo de lámparas fluorescentes. En la medida en que la planta está más motorizada, puede esperarse un empeoramiento del factor de potencia, a menos que se tomen medidas correctivas.[11]

La potencia aparente y, como consecuencia, la corriente de la carga depende inversamente del factor de potencia de la misma:[10]

$$S = \frac{P}{\cos \phi} \quad (1.64)$$

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}V \cos \phi} \quad (1.65)$$

De estas expresiones puede concluirse que un bajo factor de potencia incrementa la corriente. Gráficamente esto se puede observar en la figura 1.5, donde se evidencia que cuanto mayor sea la corriente reactiva inductiva (I_L) para una misma potencia activa (I_R constante), mayor es el ángulo y por tanto, más bajo el $\cos \phi$. Como consecuencia, se produce un incremento en la corriente total.

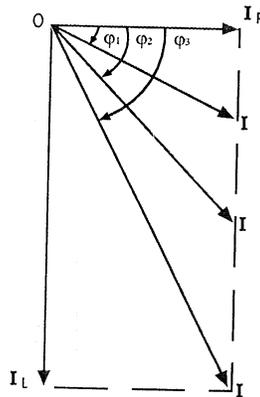


Figura 1.5 Disminución del factor de potencia por el incremento de la corriente reactiva I_L

El incremento de la corriente produce serios inconvenientes (para el usuario y para la empresa que suministra energía eléctrica), como los que se describen a continuación.[10]

a) Disminución de la capacidad de los equipos de generación, distribución y maniobra de la energía eléctrica.

Muchos equipos eléctricos, como son los generadores, transformadores, conductores, seccionadores fusibles, interruptores automáticos, etc. Se dimensionan a partir de una capacidad de corriente. El incremento de la corriente debido a un bajo factor de potencia aumenta la carga térmica de los equipos que suministran o permiten el paso de dicha corriente, produciendo fallas, reducción de la vida útil y operaciones inadecuadas. Esto puede obligar, por ejemplo, a utilizar conductores de

mayor calibre, transformadores de mayor capacidad que serán, por lo tanto, más caros. En la figura 1.6, se muestra una gráfica de un transformador, donde se puede observar cómo su capacidad depende del factor de potencia. Para valores reducidos de este, la carga útil del equipo se ve notoriamente disminuida.

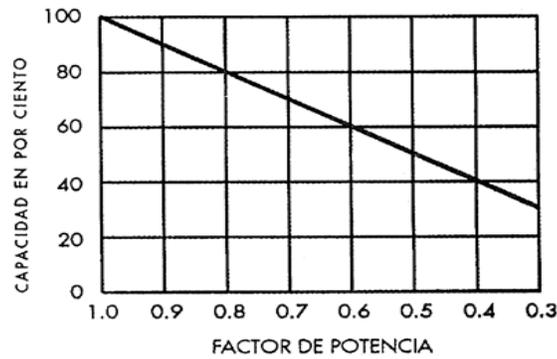


Figura 1.6 Influencia del factor de potencia en la capacidad de un transformador.

b) Incremento en las pérdidas de potencia y energía.

Las pérdidas de potencia y energía en transformadores, cables y otros elementos del sistema dependen de la circulación por dichos elementos, tanto de la potencia activa como reactiva de las cargas. Así, como ya se había planteado anteriormente, las pérdidas de energía (ΔP) son:

$$\Delta P = 3I^2 R = 3 \left(\frac{P}{\sqrt{3} V \cos \varphi} \right)^2 R = \frac{P^2}{V^2 \cos^2 \varphi} R \quad (1.66)$$

$$\Delta P = 3 \left(\frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{3} V} \right)^2 R = \frac{P^2 + Q^2}{V^2} R \quad (1.67)$$

Un bajo factor de potencia provoca un incremento apreciable de las pérdidas de potencia en los elementos serie y por ende, en las pérdidas de energía.

c) Deficiente regulación de tensión.

La caída de tensión en un elemento serie determinado (cable, transformador, etc.), se define como la diferencia entre los valores modulares de fase a neutro de la tensión en el lado de la fuente V_s y en el lado de la carga V_r :

$$\Delta V = V_s - V_r \quad (1.68)$$

De forma aproximada, la caída de tensión de una fase a neutro en una línea que tiene una resistencia (R) y reactancia (X), se puede calcular como:[12]

$$\Delta V \approx \frac{RP + XQ}{V} \quad (1.69)$$

Debido a que la reactancia inductiva es generalmente mayor que la resistencia, las caídas de tensión en los elementos del sistema dependen primordialmente de la magnitud de la potencia reactiva circulante. De esta forma, si las cargas tienen bajo factor de potencia, pueden esperarse caídas de tensión más pronunciadas en transformadores y cables.

d) Incremento en la factura de energía eléctrica.

Por lo anteriormente visto, un bajo factor de potencia significa energía desperdiciada y afecta a la adecuada utilización del sistema eléctrico. Por esta razón, en las tarifas eléctricas se imponen cuotas a manera de multas si el factor de potencia es menor que cierta cifra (penalización) y se ofrece una reducción en la factura (bonificación) en instalaciones con un factor de potencia elevado.

1.2.2 Métodos de corrección del factor de potencia

El mejoramiento del factor de potencia en la industria o los servicios, solo puede ser alcanzado a través de la correcta combinación de diferentes medios para su elevación, cada uno de los cuales debe ser técnica y económicamente fundamentado. Los medios para la elevación del factor de potencia pueden ser considerados dentro de los grupos generales descritos a continuación:[1]

✓ Reducción del consumo de potencia reactiva, sin la aplicación de medios compensadores.

El primer paso para corregir el bajo factor de potencia en una instalación es prevenirlo, para lo cual se debe evitar, en lo posible, la demanda excesiva de potencia reactiva. Para esto, en términos generales, no se requieren grandes inversiones capitales. A esta variante pertenecen las siguientes medidas:

1. Ordenamiento del proceso tecnológico.
2. Selección correcta del tipo de motor.
3. Sustitución de los motores asíncronos subcargados por otros de menor potencia.
4. Reducción de la tensión de los motores que sistemáticamente trabajan con poca carga.
5. Limitación del trabajo de los motores en vacío.
6. Elevación de la calidad de la reparación de los motores.
7. Sustitución de los transformadores subcargados.

Ordenamiento del proceso tecnológico.

La sola aplicación de medidas organizativas del proceso de producción puede significar un efecto considerable en la elevación del factor de potencia, siempre que ellas sean encaminadas al mejoramiento del régimen de trabajo eléctrico de la instalación. La coincidencia innecesaria en el proceso productivo de actividades que implican algún grado de subutilización de los equipos eléctricos (que por lo general son evitables), conducen a un mayor consumo de energía eléctrica y, casi siempre, a un empeoramiento del factor de potencia.

Selección correcta del tipo de motor.

Los motores asíncronos de alta velocidad y gran potencia poseen un mayor factor de potencia, como se puede observar en las curvas típicas de motores estándar que se muestran en la figura 1.7. Lo mismo ocurre con los motores trifásicos con respecto a los monofásicos y con los motores abiertos en comparación con los cerrados. Siempre que sea posible y de acuerdo con los requerimientos del proceso productivo, aspectos como los señalados deben tomarse en consideración a la hora de seleccionar el tipo de motor.

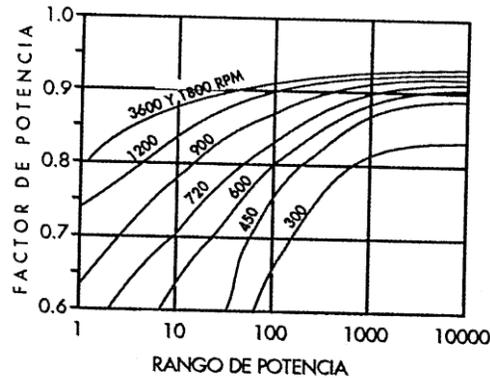


Figura 1.7 Curvas típicas de motores trifásicos asincrónicos estándar.

Sustitución de los motores asincrónicos subcargados por otros de menor potencia.

Los motores que operan con bajas cargas disminuyen su factor de potencia. En la figura 1.8 se tiene una curva característica para un motor estándar de jaula de ardilla trifásico, de 1800 rpm. Nótese cómo el factor de potencia decrece sensiblemente para cargas por debajo del 50 % de su potencia nominal.

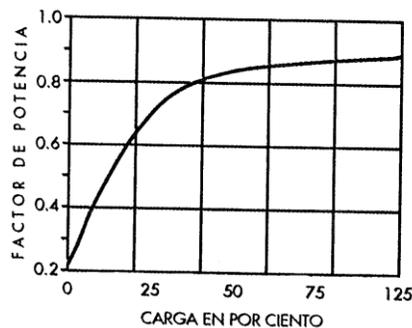


Figura 1.8 Variación del factor de potencia con la carga de un motor asincrónico.

Por esto, es importante adecuar la capacidad de los motores a sus cargas reales y evitar su operación prolongada en vacío. Desde luego, siempre se requerirá de un adecuado análisis técnico económico de cualquier medida de sustitución de motores en operación, que deberá incluir la valoración de los costos de mejorar el factor de potencia con el uso de medios compensadores, sin sustituir el motor.

Reducción de la tensión de los motores que sistemáticamente trabajan con poca carga.

Ante la imposibilidad técnica o económica de sustituir motores asincrónicos subcargados, se debe estudiar la conveniencia de la reducción de la tensión hasta un determinado valor mínimo permisible, lo que provoca la reducción de la potencia reactiva requerida por el motor y con ello, la elevación del factor de potencia. Al propio tiempo, se disminuyen las pérdidas de potencia activa y, consecuentemente, se eleva la eficiencia del motor

Limitación del trabajo de los motores en vacío.

El trabajo de muchos motores asincrónicos se caracteriza porque en los intervalos entre cargas ellos operan en vacío. En no pocas aplicaciones, el tiempo de trabajo de los motores en vacío llega a ser del 50 - 60 % del tiempo total del ciclo. Si los intervalos de trabajo en vacío son suficientemente grandes, resulta conveniente desconectar el motor de la red durante este tiempo. Esto disminuirá el consumo de potencia activa y, particularmente, de potencia reactiva.

Elevación de la calidad de la reparación de los motores.

Una reparación deficiente, puede provocar (entre otras cosas) una disminución del factor de potencia en los motores, debido al incremento de la corriente en vacío. Además, defectos en la reparación pueden producir desbalances y otros fenómenos que reducen el factor de potencia y provocan un incremento de las pérdidas. Es necesario que la reparación se realice en talleres que apliquen los procedimientos adecuados y que la efectúe personal calificado, para garantizar la calidad.

Sustitución de los transformadores subcargados.

En la elevación del factor de potencia de una instalación, pueden ser alcanzados muy buenos resultados a través de la racionalización del trabajo de los transformadores, logrado con la sustitución y reagrupación de estos, así como con la desconexión de algunos durante las horas de menor carga. Si con estas medidas se reduce el consumo de potencia reactiva y se disminuyen las pérdidas de potencia activa, entonces su ejecución será en la mayoría de los casos de utilidad económica.

✓ Con la aplicación de medios compensadores.

Usualmente no resultan suficientes las medidas que permiten mejorar el factor de potencia sin emplear medios compensadores y entonces, resulta necesario utilizar

equipos auxiliares para corregirlo. Estos equipos de naturaleza capacitiva, toman una corriente en adelanto con respecto a la tensión, que se opone a la corriente inductiva de las cargas de la instalación.

La manera de mostrar el efecto descrito es a través de las relaciones de potencia. En la figura 1.9 se observa cómo la potencia reactiva capacitiva $ckVAR$, reduce el requerimiento de potencia reactiva total ($kVAR - ckVAR$), disminuyendo tanto el ángulo como la potencia aparente kVA . [10]

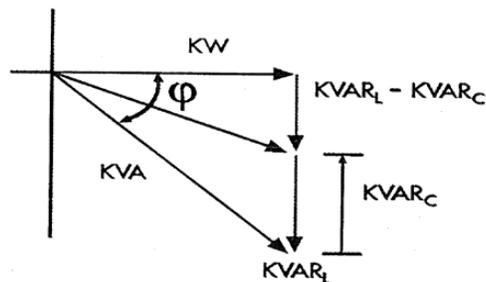


Figura 1.9 Efecto de los $ckVAR$ sobre los $kVAR$ en una instalación

Por ningún motivo se debe sobrecompensar la carga, ya que un exceso de $ckVAR$ puede ser tan perjudicial como su defecto. En la práctica, principalmente por razones económicas, los $kVAR$ no se anulan totalmente, sino se les mantiene dentro de los valores que den los costos totales menores. La evaluación económica en cuanto a qué magnitud de los $kVAR$ debe compensarse empleando métodos de descuento.

Equipos compensadores de potencia reactiva.

Los equipos empleados en la compensación de la potencia reactiva de las cargas son fundamentalmente: [12]

- ✓ Bancos de capacitores estáticos.
- ✓ Condensadores sincrónicos (motores sincrónicos sobreexcitados).
- ✓ Compensadores activos (basados en electrónica de potencia: SVC, FACTS, etc.)

De ellos, por su bajo costo, reducido mantenimiento y bajas pérdidas de energía, los bancos de capacitores son los compensadores más empleados en la industria.

CAPÍTULO 2

CAPÍTULO 2 Descripción de la empresa y procedimiento a utilizar.

En este se hace una descripción de la empresa, se define el procedimiento a seguir y las condiciones de operación de la planta. Se hace una descripción del programa a utilizar para los cálculos y se definen las condiciones de operación de la planta.

2.1 Descripción de la empresa

Después de 21 años de explotación, en el año 2001 se crea la empresa con capital mixto Cementos Cienfuegos S.A., perteneciente al Ministerio de la Construcción y comienza un proceso de rehabilitación de la línea 3 con vistas a la modernización para restablecer su capacidad productiva y alcanzar una producción total de la fábrica de 1 500 000 t *clinker*. En noviembre del 2004 se pone en operación la línea con resultados productivos y ambientales muy favorables. En la actualidad Cementos Cienfuegos S.A, dirige sus actividades a la producción y comercialización de *clinker* y cemento consignados a clientes nacionales y extranjeros. Tiene implantado un sistema de gestión integrado sobre las normas, NC ISO 14001: 2004, NC 18001: 2005, NC ISO 9001: 2008 y NC ISO 50 001: 2011, en proceso de certificación.

Se ubica en el municipio Cienfuegos, extendida sobre áreas de la Llanura de Cienfuegos a los 220 09' 20" de Latitud Norte y los 800 15' 19" de Longitud Oeste. Esta instalación industrial es la mayor en Cuba y una de las más grandes de Latinoamérica.[13]

2.1.1 Descripción del sistema eléctrico de la empresa

La empresa cuenta con una instalación principal de 115 kV, en un esquema de conexión en H con dos líneas de alimentación como se observa en la figura 2.1, línea Expreso que transfiere la energía total consumida por la fábrica, mientras la otra es un ramal (línea Trinidad) que entrega 20 MW para casos de averías, en la operación normal esta última se mantiene desconectada. Las líneas son introducidas en la subestación de la empresa a través de pasa muros de cobre tipo MDF110/250, que alimentan las barras de donde se instalan los transformadores de fuerza *Tr-101* y *Tr-102 (115/6kV)* separados por interruptores de soplo de aire tipo *D3AF7* de 2000 A.

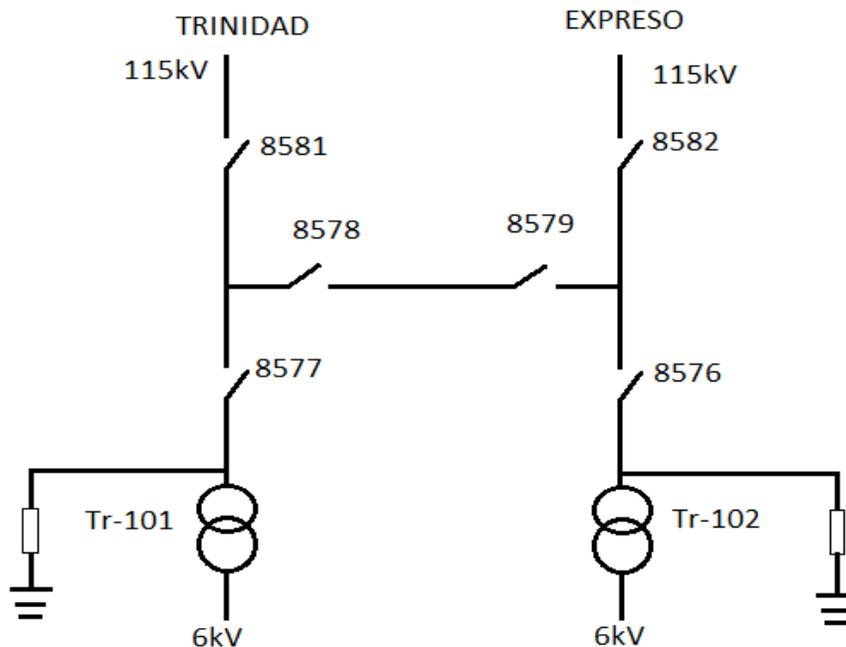


Figura 2.1 Esquema de conexión H de la alimentación de la red nacional a la instalación principal.

A partir de los transformadores de entrada *Tr-101* y *Tr-102* se alimenta la subestación 10 (principal) y *de ella* se desprenden cinco subestaciones más y centros de cargas que son los encargados de distribuir las líneas de 460 V, mediante transformadores, hacia los CCM (Centro de Control de Motores) y las fuerzas tecnológicas y no tecnológicas.

Subestación 10:

Para la alimentación de las cargas existente en dicha subestación se tiene los transformadores 103 y 104 de 400 kVA cada uno, pero se mantiene operando con carga actualmente el 103, mientras que el 104 se encuentra trabajando en vacío y es de reserva.

Esta subestación se encuentra distribuida por 4 bloques interconectados entre ellos (1 con 3 y 2 con 4) de los cuales se alimentan directamente varios transformadores y motores de 6 kV como se describe a continuación:

1. Transformador 111 de 1600 kVA que alimenta los siguientes CCM:

- ✓ Panel 5P1-1M1 (dosificadora L-I).
 - ✓ Panel 5P1-1M2 (molienda de cemento L-I).
 - ✓ Panel 5P0-1M1 (transporte de cemento).
 - ✓ Electrofiltro (Cemento L-I).
2. El transformador 112 de 1600 kVA que alimenta los siguientes CCM:
- ✓ Panel 5P2-1M1 (dosificación L-II).
 - ✓ Panel 5P2-1M2 (molienda de cemento L-II).
 - ✓ Electrofiltro (Cemento L-II).
3. Los transformadores 114, 122 y 124 de 630, 1600 y 1000 kVA respectivamente alimenta fuerzas no tecnológicas.
4. Los transformadores 121 y 125 de 1600 kVA cada uno se encuentra trabajando sin carga porque alimenta paneles que en estos momentos no están trabajando.
5. Dos motores de 2500 kW (561-AP1 y 562-AP1) para el accionamiento principal de los molinos de cemento.
6. Dos ventiladores succionadores de 200 kW (561-VE1 y 562-VE1).

Subestación 20:

Esta subestación es una de las más importantes por el área que alimenta directamente, es junto a la principal la más grande de la industria y también se encuentra dividida en cuatro bloques interconectados de la misma forma que la subestación principal. De ella se alimenta gran cantidad de transformadores y motores de 6 kV como se describe a continuación.

1. El transformador 4P0-1T1 de 2500 kVA para la alimentación de compresores.
2. El transformador 201 y 202 de 1000 kVA cada uno, el primero es de reserva pero se encuentra trabajando sin carga y el segundo alimenta:
 - ✓ Fuerza no tecnológica (cocina, comedor, departamento técnico).
 - ✓ Bombas de agua caliente del comedor.

- ✓ Bombas de agua fría del comedor.
- 3. El transformador 211 y 212 de 1000 kVA cada uno se encuentra trabajando sin carga porque alimenta paneles que en estos momentos no están trabajando al igual que el 221 de 1600 kVA.
- 4. El transformador 214 de 1600 kVA que alimenta compresores y electrofiltros aunque casi nunca está trabajando :
- 5. El transformador 222 de 1600 kVA que alimenta los siguientes CCM:
 - ✓ Electrofiltros.
 - ✓ Panel 3P2-1M1 (Dosificación Molino de Crudo Línea-II).
 - ✓ Panel 3P2-1M2 (Transporte a Silos de Harina línea-II).
 - ✓ Panel 4P2-1M1 (Silos de Harina L-II).
 - ✓ Panel 4P2-1M2 (Silos de Mezcla L-II).
- 6. El transformador 223 de 1600 kVA que alimenta los siguientes CCM:
 - ✓ Electrofiltros.
 - ✓ Panel 3P3-1M1 (Dosificación Molino de Crudo L-III).
 - ✓ Panel 3P3-1M2 (Transporte a Silos de Harina L-III).
 - ✓ Panel 4P3-1M1 (Silos de Harina L-III).
 - ✓ Panel 4P3-1M2 (Silos de Mezcla L-III).
- 7. El transformador 224 de 630 kVA que alimenta fuerzas no tecnológicas.
- 8. Cuatro motores de 400 kW (362-AP1, 362-AP2, 363-AP1, 363-AP2) para el accionamiento principal de los molinos de crudo.
- 9. Dos motores de 315 kW (332-TB1, 333-TB1) para e accionamiento principal de los molinillos.
- 10. Un ventilador exhaustor de 280 kW (362-VE1).
- 11. Tres ventiladores exhaustores de 630 kW (362-VE2, 363-VE1, 363-VE2).

Subestación 23:

Se desprende directamente de la subestación 20 y se encuentra dividida en 2 bloques que pueden interconectarse. Alimenta los transformadores 231 de 1600 kVA que se encuentra en caliente pero de reserva y el 232 de 1000 kVA que lleva toda la carga del CCM 3P1-1M3 y la fuerza no tecnológica del laboratorio.

Subestación 30:

Se encuentra dividida en 2 bloques que pueden interconectarse alimentando:

1. El transformador 301 de 1600 kVA que alimenta los siguientes CCM:
 - ✓ Panel 2P1-2M2 (Silos de Caliza).
 - ✓ Tratamiento de agua.
 - ✓ Fuerza no tecnológica.
2. El transformador 302 de 1000 kVA que se encuentra en caliente pero de reserva.
3. El transformador 310 de 1600 kVA que alimenta el taller central.

Subestación 40:

Es la encargada del área de entrega de cemento perteneciente a la parte antigua de la empresa, también se encuentra dividida en 2 bloques que pueden interconectarse alimentando:

1. El transformador 401 de 1000 kVA que se encuentra en caliente pero de reserva.
2. El transformador 402 de 400 kVA alimenta los compresores del área:
3. El transformador 411 de 1600 kVA que se encuentra trabajando sin carga porque alimenta paneles que en estos momentos están deshabilitados.
4. El transformador 412 de 100 kVA que alimenta los siguientes CCM:
 - ✓ Panel 6P1-1M1.
 - ✓ Panel 6P1-1M2.

Subestación 50:

Es una pequeña subestación perteneciente a la parte no modernizada de materia prima que alimenta:

1. Dos trituradoras de 400 kW (211-AP1 y 211-AP2) las dos de 6 kV.
2. El transformador 502 de 100 kVA que alimenta los siguientes CCM:
 - ✓ Panel 2P1-2M1.
 - ✓ Fuerzas no tecnológicas.

A partir del bloque 3 de la subestación 10 se acopló el proyecto de Línea III concebido por la modernización la cual consta con cuatro centros de cargas:

- Precalentador del horno que alimenta por 6 kV:
 1. Dos ventiladores de 250 kW (422-VE1, 423-VE1).
 2. Un ventilador de gas caliente de 1700 kW (443-VE1).
 3. El transformador 4P1-1T1 de 1600 kVA que alimenta los siguientes CCM:
 - ✓ Panel 4P3-1M1.
 - ✓ Panel 4P3-1M2.
 4. El transformador 463- AP1.T01 de 1000 kVA que alimenta el motor del accionamiento principal de horno de 600 kW (463-AP1).
- Descarga del horno que alimenta por 6 kV:
 1. Un ventilador de 525 kW (473-VEB).
 2. El transformador 4P3-1T2 de 2000 kVA que alimenta los siguientes CCM:
 - ✓ Panel 4P3-1M6.
 - ✓ Panel 4P3-1M7.
 3. El transformador 4P3-1T3 de 2000 kVA que alimenta el siguiente CCM:
 - ✓ Panel 4P3-1M8.
- Molino de carbón que alimenta por 6 kV:
 1. Un ventilador de 650 kW (L61-VE1).
 2. El transformador L61-AP1.T01 de 1300 kVA que alimenta un motor de 815 kW (L61-AP1) que es el accionamiento principal del molino de carbón.
 3. El transformador LP1-1T1 de 2000 kVA que alimenta los siguientes CCM:
 - ✓ Panel LP1-1M1.

- ✓ Panel LP1-1M2.
- 4. El transformador LP1-1T2 de 1000 kVA que alimenta el siguiente CCM:
 - ✓ Panel LP1-1M3.
- Secador de materias primas que alimenta por 6 kV:
 - 1. Un ventilador de 525 kW (221-VE3).
 - 2. El transformador 2P1-1T3 de 2000 kVA que alimenta los siguientes CCM:
 - ✓ Panel 2P1-1M1.
 - ✓ Panel 2P1-1M2.
 - 3. El transformador 221-AP1.T01 de 800 kVA que alimenta dos motores de 360 kW (221-AP1, 221-AP2).

2.2 Fundamentación de la investigación

La situación económica internacional y de nuestro país está influenciando cada vez más en el encarecimiento de la energía eléctrica, por ello, en el caso de la empresa la principal partida del costo total es el costo energético. En este sentido, los aspectos básicos que determinan la competitividad de la empresa son la calidad y el precio de sus productos o servicios. La posición en el mercado y la estrategia de cambio de posición vienen determinadas por la relación calidad-precio con respecto a otras empresas de la competencia, por lo que el consumo energético y el aumento de los costos de la energía producen un sensible aumento del precio del producto, colocando a la empresa en posición desventajosa en el mercado.

A partir de los datos de consumo de portadores de los años 2014 al 2016 se pudo determinar los impactos de los energéticos en los gastos totales de la empresa para ese período. Tal como se observa en la figura 2.2, los gastos en energía constituyen la principal partida de gastos.



Figura 2.2 Estructura de gastos totales de la empresa del año 2016.

La identificación de equipos altos consumidores de electricidad le permite a la empresa llevar un control estricto sobre el comportamiento del mismo. En relación al consumo de electricidad el proceso de Horno constituye el de mayor consumo eléctrico según se observa en la figura 2.3.

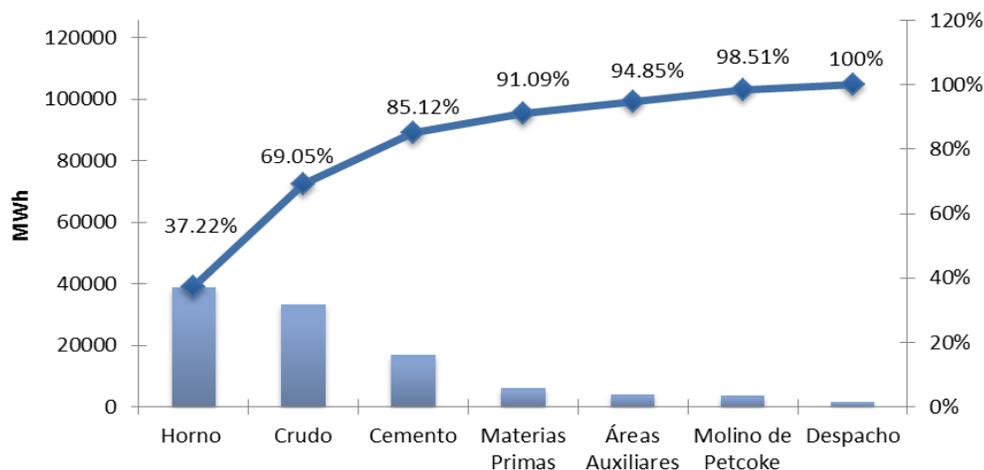


Figura 2.3 Estructura de gastos de electricidad por áreas del año 2016.

Las áreas de Horno, Crudo y Cemento necesitan tener mayor seguimiento, medición y análisis, dado el peso que tiene en el consumo y gastos de portadores energéticos de la empresa. Dentro de estas áreas se han identificado como equipos claves los mayores consumidores de energía, considerando su potencia y el tiempo real de operación.

La realización de un balance electroenergético en la empresa Cementos Cienfuegos S.A sustentada sobre la base de los principales consumidores eléctricos para la determinación de las pérdidas totales, constituye la alternativa más eficaz para solucionar el uso irracional de la energía en el sistema eléctrico. A partir del electrobalance es posible analizar la estructura de utilización de la energía y sobre estos resultados, es posible elaborar las medidas de ahorro con el objetivo de incrementar la eficiencia del uso de la energía en la empresa. De esta forma se podría incidir de manera provechosa en el costo de la energía por producción (índice de consumo) de la fábrica y contribuir con su rentabilidad.

2.3 Procedimiento para la ejecución del balance electroenergético

El objetivo del balance electroenergético en este trabajo es determinar las posibles pérdidas en circuitos eléctricos ubicados en las áreas tecnológicas de Cementos Cienfuegos S.A. y su posterior análisis para aplicar medidas dirigidas a minimizar dichas pérdidas. Este procedimiento se aplica a toda la red eléctrica de 6 kV, esta limitante está condicionada a la extensión de la red eléctrica y al limitado tiempo disponible para el estudio.

No obstante este trabajo podrá ser continuado por la institución de conjunto con la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas como parte de la cooperación entre ambas instituciones. Para realizar este proyecto es necesario ejecutar las siguientes tareas:

1. Revisión y actualización del monolineal de la empresa con el objetivo de conocer la distribución de las cargas para ello es necesario:
 - ✓ Recorrer las subestaciones para verificar los equipos que se encuentran conectados a las mismas.
 - ✓ Visitar los centros de carga para verificar que CCM se encuentran conectados a ellos.
 - ✓ Verificar las cargas conectadas a cada CCM.
 - ✓ Obtener datos de chapa (transformadores y motores) y calibre de los conductores existentes (revisión de la bibliografía técnica disponible en los

archivos de la empresa, bases de datos existentes y mediciones directas en el terreno).

- ✓ Tomar lecturas (voltaje, corriente, potencias y factor de potencia) disponibles en los transformadores y motores para introducir en el IPA.
- 2. Confeccionar el monolineal en el IPA y realizar electrobalance a partir del estudio de flujo de potencia.
- 3. Utilizar el software Motor Calculator para analizar el comportamiento de los motores y compararlos con el IPA.
- 4. A partir de datos de catálogo dados por el fabricante y el método de interpolación lineal calcular el estado de cargabilidad de los motores y compararlos con los programas usados para ver la fiabilidad de estos.
- 5. Una vez concluido el electrobalance se obtiene como resultado el consumo de fábrica y el consumo de cada elemento que componen la red industrial interna.
- 6. Obtención del valor total de pérdidas en la red industrial y el valor de pérdida para cada elemento.
- 7. Determinación de los elementos de la red que inciden directamente en las pérdidas significativas (transformadores, motores y conductores).
- 8. Elaborar propuesta de mejoras y su factibilidad económica.

2.4 Descripción de los programas a utilizar

Descripción del IPA:

El editor de redes industriales permite la descripción interactiva del diagrama monolineal de un Sistema de Suministro Eléctrico Industrial. Puede describir el diagrama monolineal de cualquier tipo de circuito utilizado en la industria, aunque está fundamentalmente orientado a la descripción de circuitos radiales y magistrales; sus cálculos siguen los estándares planteados por la norma ANSI/IEEE.[14]

El editor de redes se basa en un editor gráfico orientado a componentes que se ofrecen en un conjunto de paletas en la vista principal (nodos, enlaces, equipos, interruptores y fallas) como se muestra en la figura 2.4 que pueden escogerse

libremente para ser insertados en el monolineal, siempre sobre alguno de los componentes ya insertados. Cuando se crea una red nueva, aparece implícitamente un nodo raíz para permitir la inserción del resto de los componentes en el circuito que se describe. Este nodo raíz no pertenece a la red y solo se incluye para facilitar la edición. Todos los componentes insertados tienen un nombre que puede ser modificado libremente.

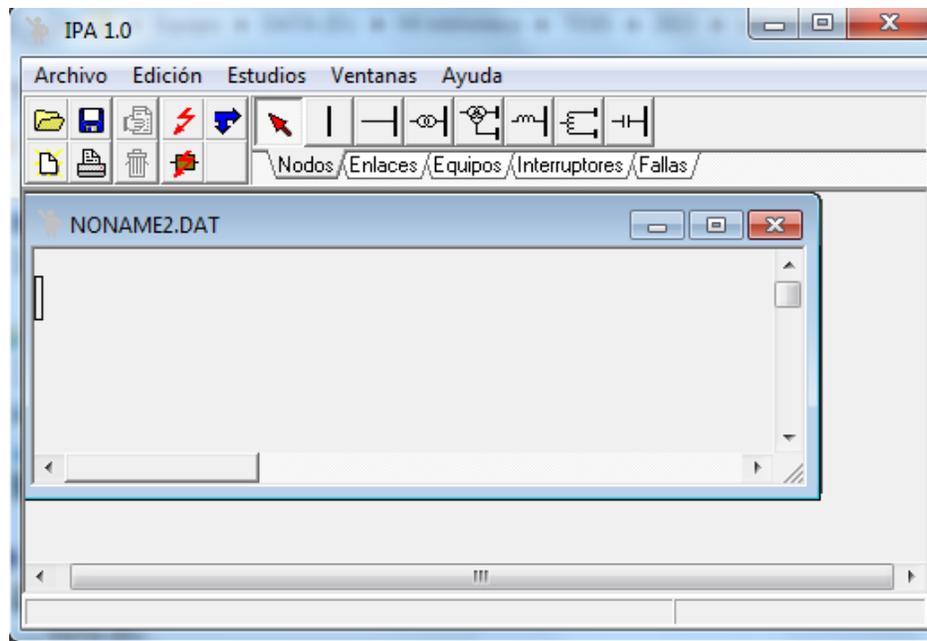


Figura 2.4 Vista principal del IPA.

Terminado el monolineal, esta plataforma permite que se introduzcan los datos de los elementos que conforman el circuito de la instalación industrial en estudio de forma muy específica logrando un acercamiento a la realidad de la empresa. El software brinda la opción de realizar estudios de cortocircuitos, régimen de cortocircuitos y flujo de potencia.

El editor permite tanto la edición de los datos de los componentes y de la propia configuración del circuito, como la visualización de los resultados que se obtienen de cualquiera de los estudios disponibles. Una vez calculado el estudio, los componentes cambian de color según se muestra en la figura 2.5 para denotar que poseen resultados. En este caso, el menú contextual del componente incorpora la

opción implícita de Cálculos, la que permite visualizar los resultados correspondientes al componente seleccionado para el estudio previamente ejecutado.[14]

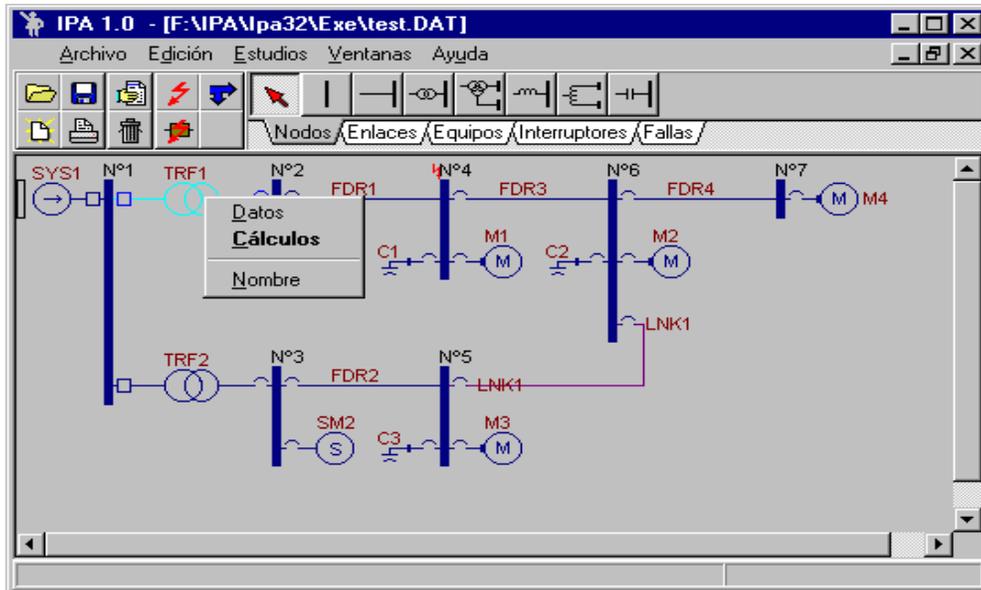


Figura 2.5 Vista de un sistema de prueba después de corrido.

Descripción del Motor Calculator:

El software Motor Calculator está destinado a la estimación de las variables de comportamiento de los motores asíncronos para su análisis energético integral lo cual permite tomar decisiones para un uso racional de la energía eléctrica. Cuenta con una base de datos interactiva con toda la información de los posibles motores eléctricos instalados en la industria, una detallada base de datos de más de 25000 motores, obtención de las variables de comportamiento de los motores, cálculo de pérdidas de energía y potencia. En la figura 2.6 se muestra la ventana principal del software donde se introducen los datos del motor a estudiar y se estiman los que no posea para lograr un acercamiento lo más real posible a su comportamiento en la industria, teniendo en cuenta que mientras más información se le pueda introducir al programa, más exacto es el cálculo.[15]

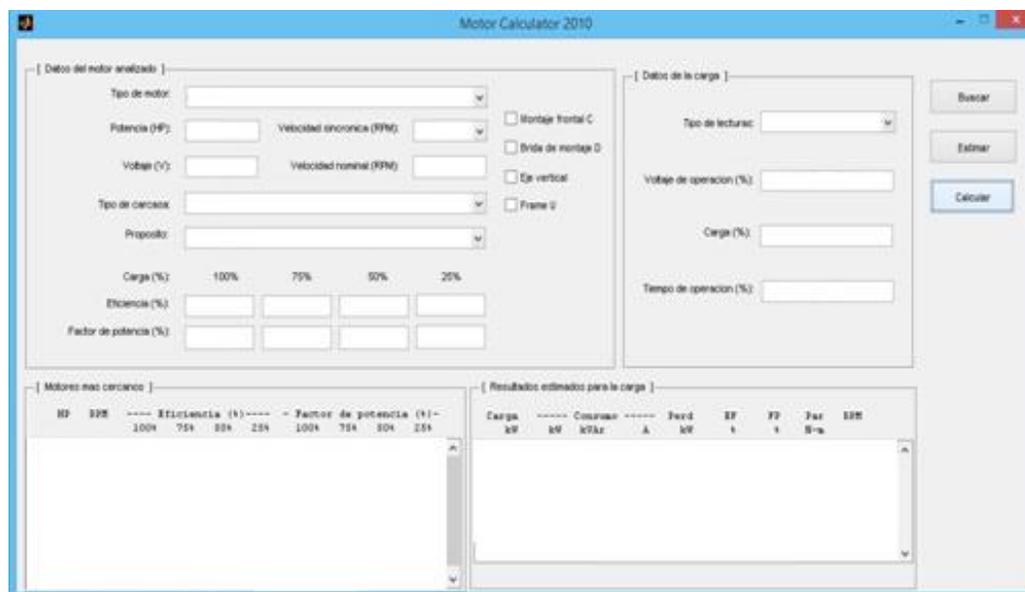


Figura 2.6 Ventana principal del Motor Calculator.

2.5 Confección del monolineal.

La actualización del monolineal fue realizado a partir del esquema general de la red eléctrica industrial de la empresa que se encuentra en la subestación principal, para ello fue realizado un trabajo de campo con el objetivo de introducir las modificaciones necesarias y obtener la distribución eléctrica de la industria y los datos de chapa posibles de la totalidad de los equipos consumidores de la empresa como se muestra en las tablas 2.1 y 2.2. Paralelamente fueron utilizados los unifilares de la instalación de piroproceso y materias primas ya elaborados durante el proyecto de rehabilitación de la Línea III.

Los elementos principales para la obtención de un diagrama unifilar que permita un estudio de flujo de potencia son:

- ✓ Sistema eléctrico de suministro de 115 kV.
- ✓ Motores trifásicos de inducción de 6 kV.
- ✓ Transformadores trifásicos.
- ✓ Conductores.

Tabla 2.1 Datos nominales de los transformadores.

| Transformador | Modelo | Potencia (kVA) | V _{1nom} (V) | V _{2nom} (V) |
|---------------|-------------------|----------------|-----------------------|-----------------------|
| TR 101 | | 32000 | 115000 | 6300 |
| TR 102 | TDLF 40000-110 CU | 40000 | 115000 | 6300 |
| TR 111 | TD1601-6CU | 1600 | 6000 | 460 |
| TR 121 | TD1601-6CU | 1600 | 6000 | 460 |
| TR 103 | DOK 400 | 400 | 6000 | 460 |
| TR 112 | TD1601-6CU | 1600 | 6000 | 460 |
| TR 122 | TD1601-6CU | 1600 | 6000 | 460 |
| TR 124 | TD1001-6CU | 1000 | 6000 | 460 |
| TR 114 | DOK 630 | 630 | 6000 | 460 |
| TR 104 | DOK 400 | 400 | 6000 | 460 |
| TR 125 | TD1601-6CU | 1600 | 6000 | 460 |
| TR 221 | TD1601-6CU | 1600 | 6000 | 460 |
| TR 211 | TD1001-6CU | 1000 | 6000 | 460 |
| TR 222 | TD1601-6CU | 1600 | 6000 | 460 |
| TR 212 | TD1001-6CU | 1000 | 6000 | 460 |
| TR 201 | TD1001-6CU | 1000 | 6000 | 460 |
| TR 223 | TD1601-6CU | 1600 | 6000 | 460 |
| TR 224 | DOK 630 | 630 | 6000 | 460 |
| TR 214 | TD1601-6CU | 1600 | 6000 | 460 |
| TR 202 | TD1001-6CU | 1000 | 6000 | 460 |
| TR 4P0-1T1 | OA | 2500 | 6000 | 460 |
| TR 231 | TD1601-6CU | 1600 | 6000 | 460 |
| TR 232 | TD1001-6CU | 1000 | 6000 | 460 |
| TR 301 | TD1601-6CU | 1600 | 6000 | 460 |
| TR 302 | TD1001-6CU | 1000 | 6000 | 460 |
| TR 310 | TD1601-6CU | 1600 | 6000 | 460 |
| TR 401 | TD1001-6CU | 1000 | 6000 | 460 |
| TR 411 | TD1601-6CU | 1600 | 6000 | 460 |
| TR 402 | DOK 400 | 400 | 6000 | 460 |
| TR 412 | TD1001-6CU | 1000 | 6000 | 460 |
| TR 501 | TD1001-6CU | 1000 | 6000 | 460 |
| TR 502 | TD1001-6CU | 1000 | 6000 | 460 |
| TR 4P3 1T2 | OA | 2000 | 6000 | 460 |
| TR 4P3 1T3 | OA | 1000 | 6000 | 460 |
| TR 463 AP1 | DCU 4031 | 1000 | 6000 | 2x720 |
| TR 4P3 1T1 | TD1601-6CU | 1600 | 6000 | 460 |
| TR L61 AP1 | CTMU 7HA1300 | 1300 | 6000 | 2x1905 |
| TR LP1 1T1 | OA | 2000 | 6000 | 460 |
| TR LP1 1T2 | TD1001-6CU | 1000 | 6000 | 460 |
| TR 2P1 1T3 | OA | 2000 | 6000 | 460 |
| TR 221 AP1 | CTMP 7HM 800 | 800 | 6000 | 2x500 |

Tabla 2.2 Datos nominales de los motores.

| Nombre equipo | Código | Pot.(kW) | I(amp) | Volt.(V) | Vel(rpm) | FP |
|--|---------|----------|--------|----------|----------|------|
| Trituradora | 211-AP1 | 400 | 53 | 6000 | 712 | |
| Trituradora | 211-AP2 | 400 | 53 | 6000 | 712 | |
| Ventilador Casa de Bolsa | 221-VE3 | 525 | 64 | 6000 | 892 | 0,82 |
| Triturador de martillo (Acc. Princ. Molinillo) | 332-TB1 | 314 | 40 | 6000 | 889 | |
| Ventilador Exahustor 1 | 362-VE1 | 280 | 37 | 6000 | 710 | 0.78 |
| Ventilador Exahustor 2 | 362-VE2 | 630 | 75 | 6000 | 710 | 0.87 |
| Accionamiento Principal Molino | 362-AP1 | 900 | 109 | 6000 | 890 | |
| Accionamiento Principal Molino | 362-AP2 | 900 | 109 | 6000 | 890 | |
| Triturador de martillo (Acc. Princ. Molinillo) | 333-TB1 | 315 | 41 | 6000 | 888 | 0.8 |
| Accionamiento Principal 1 Molino | 363-AP1 | 900 | 110 | 6000 | 890 | 0.83 |
| Accionamiento Principal 2 Molino | 363-AP2 | 900 | 110 | 6000 | 890 | 0.83 |
| Ventilador Exahustor | 363-VE1 | 630 | 75 | 6000 | 893 | |
| Ventilador Exahustor | 363-VE2 | 630 | 75 | 6000 | 893 | |
| Ventilador de gases de entrada al molino | L61-VE1 | 650 | 74 | 6000 | 1193 | 0,87 |
| Ventilador | 422-VE1 | 250 | 35.8 | 6000 | 592 | 0.71 |
| Ventilador | 423-VE1 | 250 | 38 | 6000 | 590 | 0.73 |
| Ventilador Gas Caliente | 443-VE1 | 1700 | 199 | 6000 | 895 | 0,85 |
| Ventilador | 473-VEB | 525 | 64 | 6000 | 892 | 0,82 |
| Motor Principal Molino 1 | 561-AP1 | 2500 | 295 | 6000 | 715 | |
| Motor Principal Molino 2 | 562-AP1 | 2500 | 295 | 6000 | 715 | |
| Motor Ventilador Succión E | 561-VE1 | 200 | 26 | 6000 | 890 | |
| Motor Ventilador Succión E | 562-VE1 | 200 | 26 | 6000 | 890 | |

En la figura del anexo 1 se muestra el monolineal de la empresa montado en el IPA para el estudio a realizar. Como cada CCM nombrado anteriormente alimenta gran cantidad de motores de bajo voltaje y se hace muy engorrosa la obtención de datos reales a todos los niveles, se llegó al acuerdo de realizar el estudio hasta 6 kV.

Para llevar a cabo esto, todos los motores de bajo voltaje se cambiaron en el IPA por una carga equivalente, para así, tomar lecturas de los transformadores y poder introducirlos en la carga correspondiente a cada transformador. La figura 2.7 y 2.8 muestra el monolineal acoplado para el mejor estudio del flujo de potencia de la industria y que fue utilizado en este trabajo.

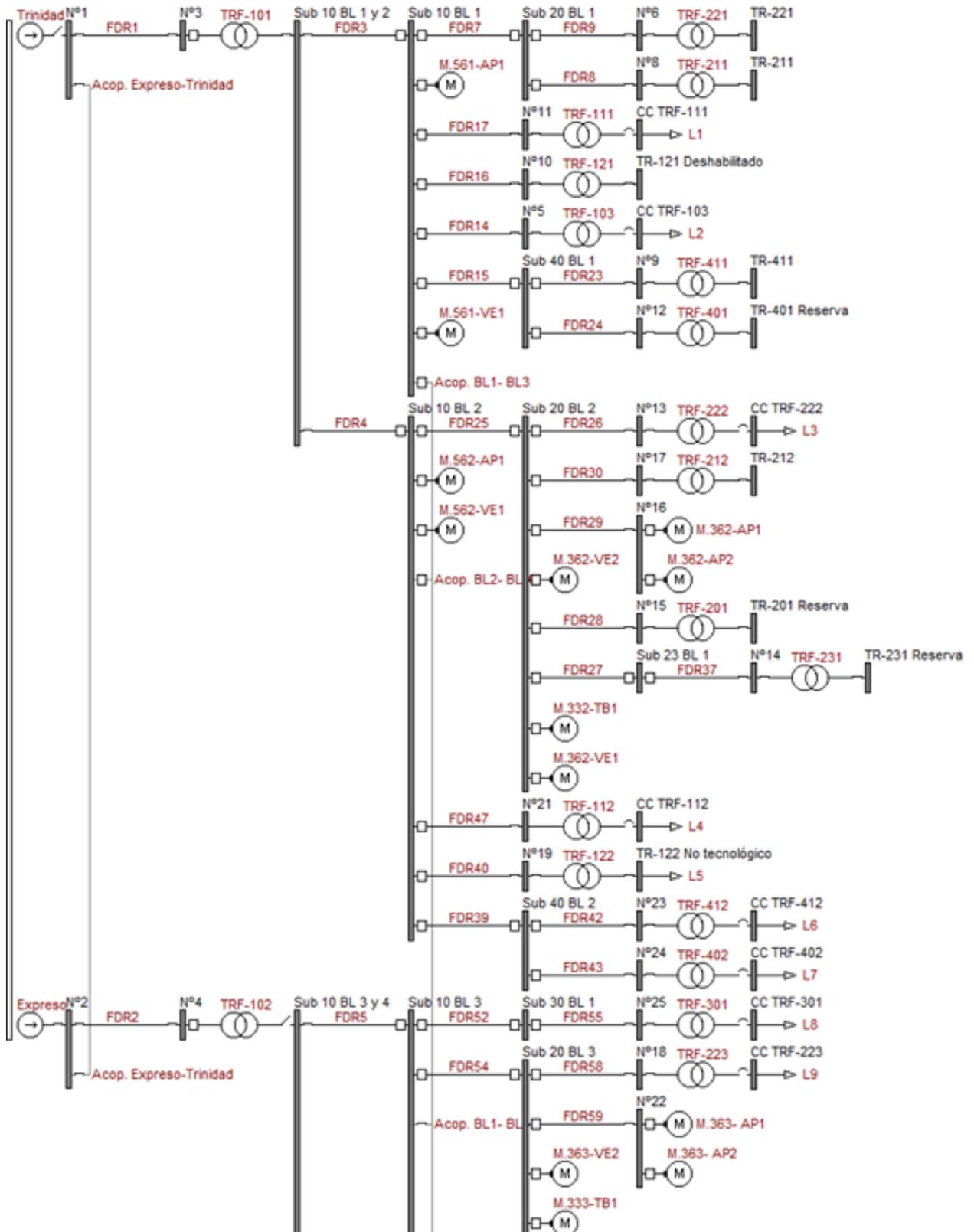


Figura 2.7 Monolineal de la empresa para flujo de carga.

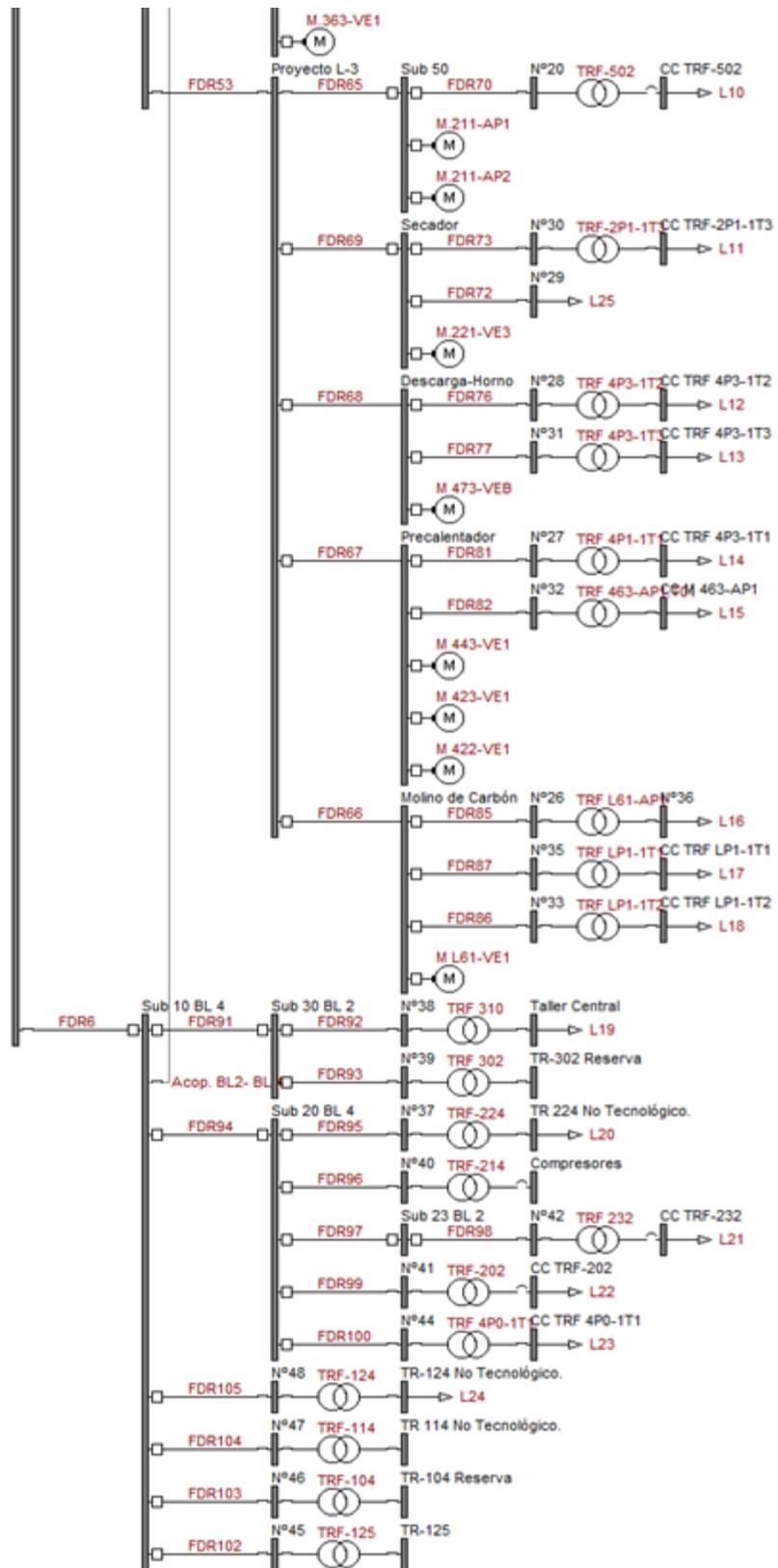


Figura 2.8 Continuación.

CAPÍTULO 3

CAPÍTULO 3 Análisis de los resultados y propuestas de mejora

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos del electrobalance, así como el estudio de factibilidad económica de las propuestas de mejoras. Con la implementación del IPA se obtuvo el estado actual de la industria en cuanto a pérdidas, consumo y estado de carga de sus principales elementos consumidores.

3.1 Comportamiento actual

Para el análisis de pérdidas se contó con los datos obtenidos por un grupo de mediciones realizadas durante varias semanas con un amperímetro de gancho (hookOn) y relés digitales (Sepam, Siprotec y Micrologic 5.0). En la tabla 3.1 aparece el valor promedio de la potencia y corriente de carga de los motores estudiados, en la tabla 3.2 aparecen las lecturas obtenidas de los transformadores de la industria. También fue necesario determinar el área de la sección transversal y longitud de los alimentadores, estos datos se recogen en la tabla del anexo 2.

Tabla 3.1 Lectura de los motores.

| Motores | Volt(kV) | I(A) | P(kW) | FP |
|---------|----------|------|-------|------|
| 561-AP1 | 6,09 | 266 | 2300 | 0,83 |
| 561-VE1 | 6,09 | 25,5 | 209,8 | |
| 562-AP1 | 6,2 | 265 | 2240 | 0,79 |
| 562-VE1 | 6,2 | 24 | 183 | 0,71 |
| 362-AP1 | 6,16 | 103 | 880 | 0,81 |
| 362-AP2 | 6,16 | 103 | 880 | 0,81 |
| 362-VE1 | 6,16 | 20,3 | 79 | 0,37 |
| 362-VE2 | 6,15 | 40 | 310 | 0,73 |
| 332-TB1 | 6,14 | 25,7 | 185 | 0,65 |
| 363-AP1 | 6,16 | 103 | 880 | 0,8 |
| 363-AP2 | 6,16 | 103 | 880 | 0,79 |
| 363-VE1 | 6,18 | 32 | 230 | 0,67 |
| 363-VE2 | 6,18 | 45 | 387 | 0,8 |
| 333-TB1 | 6,16 | 28,2 | 170 | 0,57 |
| 211-AP1 | 6,16 | 35,4 | 96,5 | 0,25 |
| 211-AP2 | 6,16 | 30 | 119 | 0,39 |
| 473-VEB | 6,25 | 47,6 | 416 | 0,8 |
| 422-VE1 | 6,12 | 33 | 240 | 0,68 |
| 423-VE1 | 6,26 | 38 | 267 | 0,64 |
| 443-VE1 | 6,28 | 120 | 1280 | 0,98 |
| 221-VE3 | 6,17 | 40,9 | 310 | 0,69 |

Tabla 3.2 Lectura de los transformadores.

| Transformador | Volt(V) | I(A) | P(kW) | FP |
|----------------|---------|--------|-------|------|
| 103 | 453 | 156,13 | 80,2 | 0,67 |
| 111 | 445 | 360 | 256 | 0,93 |
| 112 | 451 | 372,52 | 227 | 0,74 |
| 122 | 440 | 104,6 | 76,8 | 0,94 |
| 124 | 460 | 102,72 | 65,5 | |
| 202 | 450 | 175,3 | 105 | 0,78 |
| 222 | 449 | 768,32 | 390 | 0,7 |
| 223 | 450 | 799,8 | 408 | 0,72 |
| 224 | 452 | 34,2 | 15,3 | 0,6 |
| 4P0-1T1 | 460 | 1232,6 | 940,8 | 0,96 |
| 232 | 452 | 87,65 | 68,4 | 0,71 |
| 301 | 452 | 516,32 | 252 | 0,64 |
| 310 | 452 | 106,82 | 45,8 | 0,55 |
| 402 | 460 | 217 | 158 | 0,96 |
| 412 | 445 | 282,13 | 145 | 0,65 |
| 502 | 450 | 290 | 169 | 0,76 |
| 4P3-1T2 | 456 | 1588 | 977,9 | 0,77 |
| 4P3-1T3 | 447 | 206 | 159 | 0,97 |
| TRANS. L61-AP1 | 3733 | 82,89 | 480 | 0,98 |
| LP1-1T1 | 450 | 104 | 70 | |
| LP1-1T2 | 450 | 177 | 130 | 0,93 |
| 4P1-1T1 | 450 | 403 | 250 | 0,76 |
| TRANS. 463-AP1 | 715 | 367,5 | 440 | 0,98 |
| 2P1-1T3 | 440 | 578 | 270 | 0,65 |

Análisis general.

En la tabla 3.3 se muestra los datos estadísticos generales de consumo y pérdidas de la industria dados por el IPA.

Tabla 3.3 Estado actual de la empresa.

| | kWh | kVArh | kWh(p) | kVArh(p) |
|--------------------|--------|--------|--------|----------|
| Generación | 488203 | 393783 | 0 | 0 |
| a) SEN | 488203 | 393783 | 0 | 0 |
| b) Generadores | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Cargas | 477221 | 341118 | 16344 | 0 |
| a) M. Inducción | 319481 | 240920 | 16344 | 0 |
| b) M. Sincrónicos | 0 | 0 | 0 | 0 |
| c) Otras | 157740 | 100198 | 0 | 0 |
| Capacitores | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Sistema | 0 | 0 | 10982 | 52665 |
| a) Transformadores | 0 | 0 | 9301 | 70305 |
| b) Líneas | 0 | 0 | 1681 | 16228 |
| c) Otros | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Consumo Total | 488203 | 393783 | 10982 | 52665 |

El electrobalance que a continuación se muestra en la figura 3.1, se confeccionó con los datos obtenidos de la tabla 3.3 mostrando el comportamiento de las pérdidas y consumo de energía, obteniendo que la mayor cantidad de pérdidas se localiza en los motores y los transformadores, representando el 3% y el 2 % de la energía total consumida como promedio en 24 horas de trabajo (considerando generación fija y sin paradas durante las 24 horas).

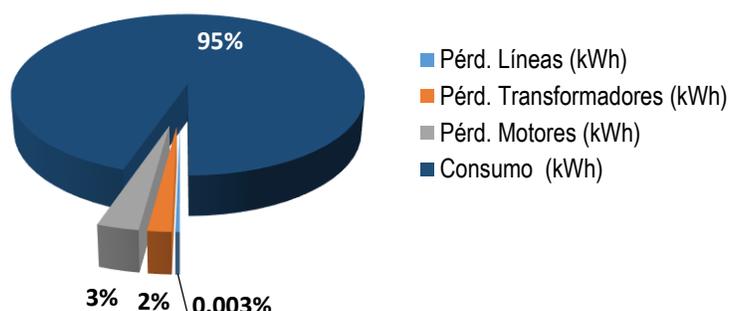


Figura 3.1 Porcentaje de pérdidas por tipo de componente de la red.

Análisis de los transformadores.

Para el análisis de los transformadores se tuvo en cuenta que algunos se encuentra alimentando CCM perteneciente a las líneas 1 y 2 (en horno y crudo) no activas, otros son de reserva y están trabajando en vacío.

La subestación de enlace con el SEN cuenta con dos transformadores que operan con un régimen de carga variable, debido a que depende de la demanda en los distintos horarios de producción en la industria. El análisis se hizo operando solamente el transformador 101 de 32 MVA ya que nunca trabajan con carga los dos a la misma vez y el transformador 102 de 40 MVA que se mantiene caliente se piensa cambiar en un futuro por uno de la misma capacidad del 101. En la tabla 3.4 se muestra el flujo de potencia dados por el IPA de dichos transformadores.

Tabla 3.4 Flujo de potencia de los transformadores de enlace con el SEN.

| Desde | Hacia | kW | kVAr | A | FP | kWh | kVArh | kWh(p) | kVArh(p) |
|-----------------|---------|----------|----------|--------|-------|-----------|-----------|--------|----------|
| Nº3 | TRF-101 | 20281.4 | 16464.2 | 131.2 | 77.6 | 486753.7 | 395140.9 | 4861.3 | 44423.7 |
| Sub 10 BL 1 y 2 | TRF-101 | -20078.8 | -14613.2 | 2375.2 | -80.9 | -481892.3 | -350717.2 | 0 | 0 |
| Nº4 | TRF-102 | 60 | 354.9 | 1.8 | 16.7 | 1439.7 | 8517.7 | 1439.7 | 8517.7 |
| Sub 10 BL 3 y 4 | TRF-102 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Como promedio se comporta en un rango entre el 50% y el 75% de su capacidad nominal, dependiendo de la cantidad de áreas que estén trabajando en los distintos horarios del día. Cuando ocurre el arranque de la industria debido a algún paro por avería o por reparación este transformador opera en un período relativamente corto con un factor de carga inferior al 35%. En la tabla del anexo 3 se muestra el flujo de potencia de los transformadores instalados en la industria.

Los transformadores son equipos muy eficientes y a pesar de operar con bajos estados de carga su eficiencia permanece elevada, pues sus pérdidas son muy pequeñas respecto a la potencia nominal, en la tabla 3.5 se muestran los resultados de estudio se pueden comprobar estos datos, obteniéndose también de ella que de los transformadores distribuidos por áreas solo el 4P3-1T2 se encuentran trabajando en un 66.43% de su carga nominal, mientras que los demás están trabajando por debajo de un 50%. Los inferiores al 4% son aquellos transformadores que están trabajando sin carga y se mantiene de reserva para casos de avería o mantenimiento ya que algunos se le puede acoplar la carga de otro transformador.

Tabla 3.5 Estudio de los transformadores.

| Transformadores. | kVA nom | kW | kVAr | kVA | kc(%) | ΔE_a (kWh) | ΔE_r (kVArh) | E_a (kWh) | E_r (kVArh) |
|------------------|------------|-------|-------|----------|-------|-----------------------|-------------------------|----------------|------------------|
| TRF-101 | 32000 | 20281 | 16464 | 26122,88 | 81,63 | 4861,3 | 44423,7 | 486753,7 | 395140,9 |
| TRF-221 | 1600 | 2,9 | 18,9 | 19,12 | 1,20 | 70,5 | 452,5 | 70,5 | 452,5 |
| TRF-211 | 1000 | 2,2 | 12,7 | 12,89 | 1,29 | 52,9 | 303,7 | 52,9 | 303,7 |
| TRF-111 | 1600 | 259,5 | 128,2 | 289,44 | 18,09 | 84,7 | 520,3 | 6228,7 | 3076,3 |
| TRF-121 | 1600 | 2,9 | 18,9 | 19,12 | 1,20 | 70,5 | 452,5 | 70,5 | 452,5 |
| TRF-103 | 400 | 81,8 | 127,1 | 151,15 | 37,79 | 43 | 241,3 | 1963 | 3049,3 |
| TRF-411 | 1600 | 2,9 | 18,8 | 19,02 | 1,19 | 70,4 | 452,2 | 70,4 | 452,2 |
| TRF-401 | 1000 | 2,2 | 12,6 | 12,79 | 1,28 | 52,8 | 303,6 | 52,8 | 303,6 |
| TRF-222 | 1600 | 395,3 | 420,3 | 576,99 | 36,06 | 128,3 | 726,1 | 9488,3 | 10086,1 |
| TRF-212 | 1000 | 0,3 | 2,3 | 2,32 | 0,23 | 7,8 | 55,9 | 7,8 | 55,9 |
| TRF-201 | 1000 | 2,2 | 12,5 | 12,69 | 1,27 | 52,1 | 299,4 | 52,1 | 299,4 |
| TRF-231 | 1600 | 2,9 | 18,6 | 18,82 | 1,18 | 69,4 | 446 | 69,4 | 446 |
| TRF-112 | 1600 | 230,7 | 226,3 | 323,16 | 20,20 | 87,9 | 534,9 | 5535,9 | 5430,9 |
| TRF-122 | 1600 | 87,8 | 55 | 103,60 | 6,48 | 71,9 | 459,2 | 2107,1 | 1320,8 |
| TRF-412 | 1000 | 147,9 | 180,5 | 233,36 | 23,34 | 68,5 | 371,2 | 3548,5 | 4331,2 |
| TRF-402 | 400 | 160,2 | 80,2 | 179,15 | 44,79 | 51,7 | 268,2 | 3843,7 | 1924,2 |
| TRF-102 | 40000 | 60 | 354,9 | 359,94 | 0,90 | 1439,7 | 8517,7 | 1439,7 | 8517,7 |
| TRF-301 | 1600 | 256,2 | 340,9 | 426,44 | 26,65 | 101,1 | 597,5 | 6149,1 | 8181,5 |

| | | | | | | | | | |
|-------------|------|-------|-------|---------|-------|-------|--------|---------|---------|
| TRF-223 | 1600 | 413,4 | 416,7 | 586,97 | 36,69 | 130,5 | 736,2 | 9922,5 | 10000,2 |
| TRF-502 | 1000 | 171,7 | 160,7 | 235,17 | 23,52 | 65,8 | 352,6 | 4121,8 | 3856,6 |
| TRF-2P1-1T3 | 2000 | 283,5 | 322,3 | 429,24 | 21,46 | 108,5 | 607,8 | 6804,5 | 7735,8 |
| TRF 4P3-1T2 | 2000 | 992 | 883,9 | 1328,66 | 66,43 | 338 | 1774,7 | 23807,6 | 21214,6 |
| TRF 4P3-1T3 | 1000 | 161,4 | 34,5 | 165,05 | 16,50 | 58,4 | 323,6 | 3874,4 | 827,6 |
| TRF 4P1-1T1 | 1600 | 247,6 | 225,8 | 335,10 | 20,94 | 86,8 | 523,7 | 5942,8 | 5419,7 |
| TRF 463-AP1 | 1000 | 450,1 | 125,2 | 467,19 | 46,72 | 122,2 | 603,6 | 10802,2 | 3003,6 |
| TRF L61-AP1 | 1300 | 525,4 | 98,4 | 534,54 | 41,12 | 129,1 | 682,1 | 12609,1 | 2362,1 |
| TRF LP1-1T1 | 2000 | 73,6 | 61,7 | 96,04 | 4,80 | 86,9 | 500 | 1766,9 | 1481,6 |
| TRF LP1-1T2 | 1000 | 129,4 | 60,4 | 142,80 | 14,28 | 57,7 | 322,8 | 3105,7 | 1450,8 |
| TRF 310 | 1600 | 48,8 | 83,7 | 96,89 | 6,06 | 71,4 | 456,6 | 1170,6 | 2009,4 |
| TRF 302 | 1000 | 2,2 | 12,6 | 12,79 | 1,28 | 52,8 | 303,2 | 52,8 | 303,2 |
| TRF-224 | 630 | 16,8 | 29,2 | 33,69 | 5,35 | 36,3 | 275,2 | 403,5 | 700 |
| TRF-214 | 1600 | 2,9 | 18,8 | 19,02 | 1,19 | 70,2 | 450,9 | 70,2 | 450,9 |
| TRF 232 | 1000 | 70,7 | 76,3 | 104,02 | 10,40 | 55,5 | 314,5 | 1697,1 | 1831,3 |
| TRF-202 | 1000 | 107,4 | 96,9 | 144,65 | 14,47 | 58,6 | 328,1 | 2578,6 | 2324,9 |
| TRF 4P0-1T1 | 2500 | 949,2 | 327,5 | 1004,11 | 40,16 | 202,3 | 1099,8 | 22781,5 | 7860,6 |
| TRF-124 | 1000 | 67,8 | 62,1 | 91,94 | 9,19 | 55 | 312,6 | 1627 | 1491 |
| TRF-114 | 630 | 1,5 | 11,5 | 11,60 | 1,84 | 36,1 | 275,1 | 36,1 | 275,1 |
| TRF-104 | 400 | 1 | 7,6 | 7,67 | 1,92 | 23,8 | 183,5 | 23,8 | 183,5 |
| TRF-125 | 1600 | 2,9 | 18,9 | 19,12 | 1,20 | 70,4 | 452,4 | 70,4 | 452,4 |

La figura 3.2 se obtiene a partir de la tabla 3.5 en la cual se evidencia que la mayoría de los transformadores instalados se encuentran sobredimensionados o trabajando en vacío. Solamente un 5 % de ellos poseen una demanda mayor al 60% de su capacidad nominal.

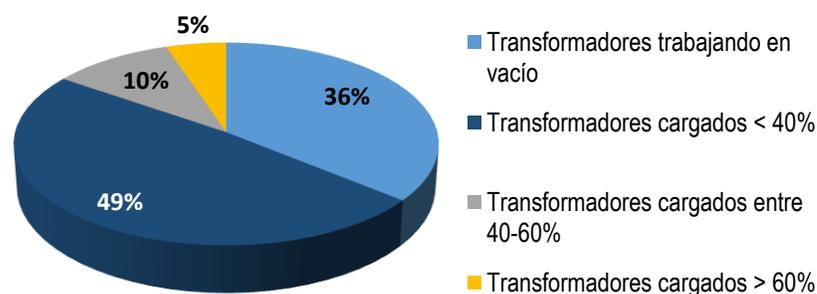


Figura 3.2 Porcentaje de cargabilidad de los transformadores.

Análisis de los conductores.

En los conductores principales existen pérdidas aunque muy ínfimas representando el 0.003% de la energía consumida. Éstas son debido a los valores elevados de potencias que estos transmiten y las distancias recorridas por túneles, que llegan a las distintas áreas evitando una serie de obstáculos.

Otro factor que contribuye a la existencia de pérdidas eléctricas y el aumento de éstas en los alimentadores es la presencia de empalmes y el estado de deterioro de los mismos debido a las altas temperaturas, escapes de vapor y derrame de líquidos existentes en la industria durante el proceso de producción. En la tabla del anexo 4 se muestran los resultados obtenidos con el estudio.

Análisis de los motores.

Para el análisis de los motores a parte de lo obtenido según el IPA se comprobó el estado actual de la mayoría de ellos en el software Motor Calculator y otros a través de datos de comportamiento típicos dados por el fabricante para distintos estados de cargas mediante el método de interpolación lineal. Esto fue realizado para una evaluación paralela por un método similar, para determinar qué tan distante daba un reporte de otro y los posibles errores que podrían existir para en un futuro mejorar dichos programas.

Durante el estudio fueron detectados algunos motores sobredimensionados, esto se debe en algunos de los casos a que estos equipos se quemaron y fueron remplazados por unidades de mayor potencia al no tener motores de reserva con la capacidad apropiada.

Estudio según el IPA.

En la tabla 3.6 se aprecian todos los parámetros eléctricos de operación de los motores de dicha industria. Muchos de ellos operan con un factor de carga superior al 70% de la potencia nominal. Los motores 362-VE2 y 363-VE1 se encuentran en un estado inferior al 50%.

Tabla 3.6 Estudio de los motores.

| Motores | kW nom | kW | kVAr | A | FP | kWh | kVArh | kWh(p) | kc |
|-----------|--------|-------|--------|-------|------|---------|---------|--------|------|
| M.561-AP1 | 2500 | 2300 | 1607,1 | 268,4 | 82 | 55200 | 38569,3 | 2649,6 | 87,6 |
| M.561-VE1 | 200 | 209,8 | 168,3 | 25,7 | 78 | 5035,2 | 4039,8 | 332,3 | 98 |
| M.562-AP1 | 2500 | 2240 | 1755,2 | 272,2 | 78,7 | 53760 | 42124,9 | 2580,5 | 85,3 |
| M.562-VE1 | 200 | 183 | 181,5 | 24,7 | 71 | 4392 | 4355,5 | 289,9 | 85,5 |
| M.362-VE2 | 630 | 310 | 292,3 | 41,1 | 72,8 | 7440 | 7015,6 | 490,9 | 46 |
| M.332-TB1 | 314 | 185 | 201,2 | 26,3 | 67,7 | 4440 | 4828,5 | 277,9 | 55,2 |
| M.362-VE1 | 280 | 151,5 | 154,8 | 20,9 | 69,9 | 3636 | 3714,9 | 233,1 | 50,6 |
| M.362-AP1 | 900 | 880 | 658,3 | 106,1 | 80,1 | 21120 | 15798 | 1203,8 | 92,2 |
| M.362-AP2 | 900 | 880 | 658,3 | 106,1 | 80,1 | 21120 | 15798 | 1203,8 | 92,2 |
| M.363-VE2 | 630 | 360 | 294,1 | 44,8 | 77,4 | 8640 | 7058,9 | 513,5 | 53,7 |
| M.333-TB1 | 315 | 170 | 248,2 | 29 | 56,5 | 4080 | 5958 | 301,8 | 50 |
| M.363-VE1 | 630 | 228 | 254,9 | 33 | 66,7 | 5472 | 6117,1 | 238 | 34,6 |
| M.363-AP1 | 900 | 880 | 658,3 | 106,2 | 80,1 | 21120 | 15798 | 1077,1 | 92,8 |
| M.363-AP2 | 900 | 880 | 658,3 | 106,2 | 80,1 | 21120 | 15798 | 1077,1 | 92,8 |
| M.211-AP1 | 400 | 275,9 | 259,5 | 38,2 | 72,8 | 6621,6 | 6228,1 | 439,3 | 64,4 |
| M.211-AP2 | 400 | 225,1 | 227,6 | 32,3 | 70,3 | 5402,4 | 5461,4 | 352,9 | 52,6 |
| M.221-VE3 | 525 | 310 | 308,1 | 42,9 | 70,9 | 7440 | 7395,2 | 280,5 | 56,8 |
| M.473-VEB | 525 | 416 | 304,1 | 50,9 | 80,7 | 9984 | 7297,8 | 389,4 | 76,1 |
| M.443-VE1 | 1700 | 1280 | 255,6 | 128,4 | 98,1 | 30720 | 6134,8 | 1010 | 72,8 |
| M.423-VE1 | 250 | 267 | 313,8 | 40,5 | 64,8 | 6408 | 7531,2 | 852,3 | 92,6 |
| M.422-VE1 | 250 | 233 | 257,1 | 34,1 | 67,2 | 5592 | 6170,2 | 201,3 | 89,8 |
| M.L61-VE1 | 650 | 447,4 | 322 | 53,4 | 81,2 | 10737,6 | 7727,2 | 348,8 | 66,6 |

La figura 3.3 se obtiene a partir de la tabla 3.6 en la cual se evidencia que el 9% de los motores instalados se encuentran trabajando por debajo del 50% de su capacidad nominal y el 50% de ellos se encuentra trabajando por encima de un 75%.

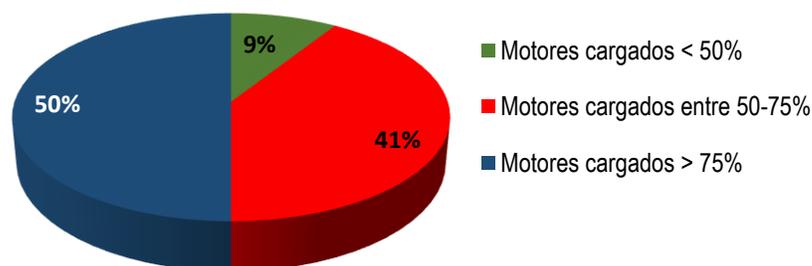


Figura 3.3 Porcentaje de cargabilidad de los motores.

Todo el análisis anterior se deriva de la tabla del anexo 5, la cual muestra el reporte de las cargas implementadas en el IPA.

Estudio según Motor Calculator.

Para lograr el estudio en el software se tuvo en cuenta que los motores mayores de 746 kW y los de velocidades inferiores a 900 rpm no se pudieron analizar porque el programa no cuenta con la base de datos para dichos motores, exceptuando el 443-VE1 que a pesar de ser de 1700 kW se contaba con datos de catálogo como se muestra en la tabla 3.7.

Tabla 3.7 Datos de catálogo del motor.

| Motor 443-VE1 | | | |
|---------------|------|------|-----|
| kc (%) | 100 | 75 | 50 |
| η (%) | 96.7 | 96.6 | |
| fp | 0.85 | 0.85 | |
| Psal (kW) | 1700 | 1275 | 850 |

Al implementar el Motor Calculator se obtiene una estimación del estado de carga de los motores. Si se tienen datos de catálogo la estimación es más cercana a la realidad. En la figura 3.4 se muestra la implementación de dicho programa para el motor 443-VE1.

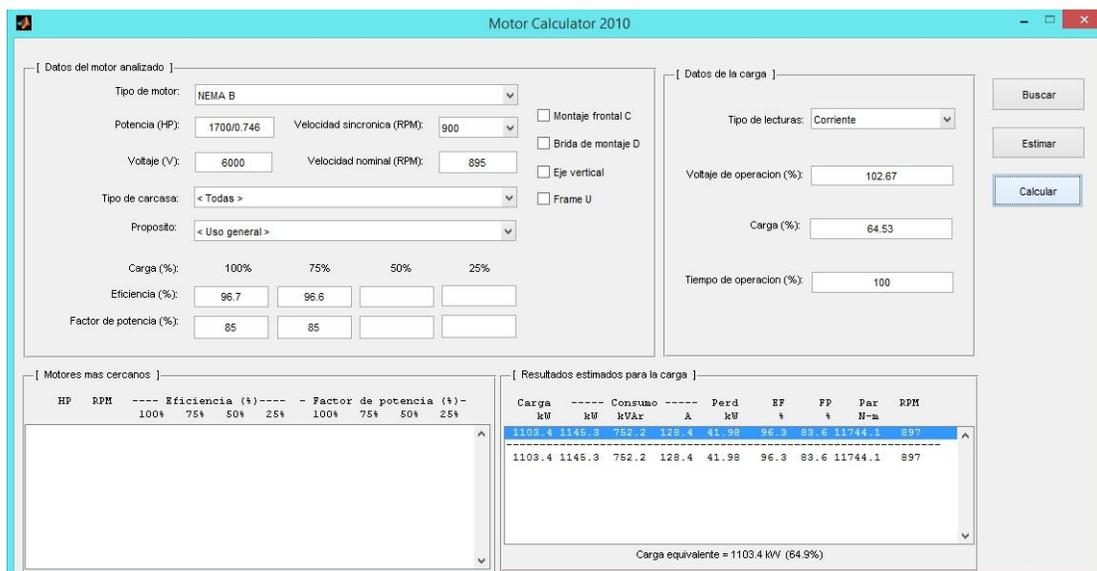


Figura 3.4 Implementación del Motor Calculator.

En la tabla 3.8 se puede apreciar los resultados estimados para la carga de los motores de la industria dados por el Motor Calculator.

Tabla 3.8 Carga estimada por el Motor Calculator.

| Motor | Carga | | Consumo | | Pérdidas kW | EF % | FP % | Par N-m | RPM | kc % |
|---------|--------|--------|---------|-------|----------------|---------|---------|------------|------|---------|
| | kW | kW | kVAr | A | | | | | | |
| 561-VE1 | 198.2 | 213.5 | 171.8 | 25.9 | 15.4 | 92.8 | 97.9 | 2124.9 | 891 | 99.1 |
| 562-VE1 | 175.7 | 190.1 | 161.1 | 23.6 | 14.4 | 92.4 | 76.3 | 1882.1 | 892 | 87.9 |
| 362-VE2 | 310.3 | 338.9 | 249.9 | 39.5 | 28.7 | 91.5 | 80.6 | 3670.8 | 807 | 49.2 |
| 332-TB1 | 168.6 | 186.8 | 195.9 | 24.4 | 18.2 | 90.3 | 69.0 | 1799.2 | 895 | 53.7 |
| 362-VE1 | 120.7 | 134.4 | 170.9 | 20.4 | 13.7 | 89.8 | 61.8 | 1403.6 | 821 | 43.1 |
| 363-VE2 | 347.8 | 377.3 | 289.1 | 44.5 | 29.5 | 92.2 | 79.4 | 3704.1 | 897 | 55.2 |
| 333-TB1 | 175.8 | 194.3 | 199.0 | 26.1 | 18.5 | 90.5 | 69.9 | 1878.5 | 894 | 55.8 |
| 363-VE1 | 214.7 | 241.6 | 252.8 | 32.7 | 27.0 | 88.8 | 69.1 | 2282.1 | 898 | 34.1 |
| 211-AP1 | 262.9 | 282.7 | 199.5 | 32.4 | 19.8 | 93.0 | 81.7 | 3211.3 | 782 | 65.7 |
| 211-AP2 | 213.5 | 232.0 | 180.7 | 27.6 | 18.5 | 92.0 | 78.9 | 2537.5 | 803 | 53.4 |
| 221-VE3 | 355.5 | 350.2 | 296.4 | 42.9 | 14.7 | 95.8 | 76.3 | 3578.0 | 895 | 63.9 |
| 473VEB | 392.7 | 409.1 | 321.9 | 48.1 | 16.4 | 96.0 | 78.6 | 10999.3 | 895 | 74.4 |
| 443-VE1 | 1034.4 | 1076.0 | 739.2 | 120.0 | 41.6 | 96.1 | 82.4 | 11006.3 | 897 | 64.9 |
| L61-VE1 | 448.0 | 464.6 | 316.2 | 52.0 | 16.6 | 96.4 | 82.7 | 10999.5 | 1196 | 68.9 |

Cálculo mediante interpolación lineal.

La tabla 3.9 muestra el comportamiento típico de varios motores según el fabricante para varios estados de carga.

Tabla 3.9 Característica de carga según el fabricante.

| Motores | kc (%) | η (%) | fp |
|-------------------|--------|------------|------|
| 221-VE3 y 473-VEB | 100 | 96.1 | 0.82 |
| | 75 | 96 | 0.8 |
| | 50 | 95.5 | 0.72 |
| L61-VE1 | 100 | 96.7 | 0.87 |
| | 75 | 96.6 | 0.85 |
| | 50 | 96 | 0.78 |
| 422-VE1 | 100 | 94.6 | 0.71 |
| | 75 | 94.4 | 0.64 |
| | 50 | 93.5 | 0.52 |

En este caso el estudio se hizo para dichos motores ya que son los que presentan datos de catálogo (50, 75 y 100% de carga nominal). Usando el método de interpolación lineal se logra una buena aproximación del estado de carga de los motores. En la tabla del anexo 6 se muestran los datos nominales para los distintos estados de carga de dichos motores y en el régimen en el que se encuentra trabajando.

En la tabla 3.10 se muestra el estado de carga para los distintos software y los logrados según el comportamiento típico dado por el fabricante y podemos ver que se encuentra en los mismos rangos con ligeras variaciones entre ellos. Mostrando así la estimación cercana existente entre los software y el estado calculado por interpolación lineal con datos de catálogo.

Tabla 3.10 Estado de carga.

| Motores | kW nom | IPA kc(%) | M.C kc(%) | Catálogo kc(%) |
|-----------|--------|--------------|--------------|-------------------|
| M.221-VE3 | 525 | 56.8 | 63.9 | 58 |
| M.473-VEB | 525 | 76.1 | 74.4 | 72 |
| M.422-VE1 | 250 | 89.8 | - | 88 |
| M.L61-VE1 | 650 | 66.6 | 68.90 | 65 |

3.2 Propuestas de modificación y factibilidad económica

Una vez concluido el electrobalance fue determinado que existen motores con bajo coeficiente de utilización., los que se muestran en la tabla 3.11. Los valores de utilización son menores 55%, el valor de las pérdidas para el grupo de motores mostrados en dicha tabla asciende a 353586.56 kWh/a lo que representa un valor de 39778.49 CUC.

Tabla 3.11 Propuesta de motores a sustituir en la inversión.

| Motores | kW nom | kWh | kWh(p) | Tiempo trabajo [d] | Pérdida total [kWh] | CUC | %Pérdidas | kc |
|--------------|--------|--------|--------|--------------------------|---------------------------|-----------------|-----------|------|
| M.362-VE2 | 630 | 7440 | 490.9 | 156.33 | 76744.03 | 8633.70 | 6.60 | 46 |
| M.362-VE1 | 280 | 3636 | 233.1 | 156.33 | 36441.30 | 4099.65 | 6.41 | 50.6 |
| M.363-VE2 | 630 | 8640 | 513.5 | 165.58 | 85027.04 | 9565.54 | 5.94 | 53.7 |
| M.333-TB1 | 315 | 4080 | 301.8 | 165.58 | 49973.05 | 5621.97 | 7.40 | 50 |
| M.363-VE1 | 630 | 5472 | 238 | 165.58 | 39408.83 | 4433.49 | 4.35 | 34.6 |
| M.211-AP2 | 400 | 5402.4 | 352.9 | 187.00 | 65992.30 | 7424.13 | 6.53 | 52.6 |
| TOTAL | | | | | 353586.56 | 39778.49 | | |

Por la magnitud de las pérdidas se propone que la entidad aplique algunas de las siguientes soluciones:

1. Sustituir los motores por otros de menor potencia o similar de mayor eficiencia.

En este caso el costo de la inversión para este paquete de motores está en el orden de los 58000 CUC si se decide invertir en la compra de estos equipos, analizando su factibilidad económica en la tabla 3.12.

Tabla 3.12 Cálculo de rentabilidad de la inversión

| | | Tiempo en que se valora la inversión | | | | |
|------------------------------|-------------------|--------------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Costo de mantenimiento anual | CUC | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 |
| | Pérdidas nuevas | 11933.55 | 11933.55 | 11933.55 | 11933.55 | 11933.55 |
| | Pérdidas actuales | 39778.49 | 39778.49 | 39778.49 | 39778.49 | 39778.49 |
| + VALOR RESID ACT FIJOS | | 1300 | 1300 | 1300 | 1300 | 1300 |
| FLUJO DE CAJA | | 25144.94 | 25144.94 | 25144.94 | 25144.94 | 25144.94 |
| - INVERSIÓN | | 58000.00 | | | | |
| | Costo equipo | 55000.00 | | | | |
| | Costo de montaje | 3000.00 | | | | |
| = FLUJO NET CAPITAL | | 25144.94 | 25144.94 | 25144.94 | 25144.94 | 25144.94 |
| FC DESCONTADO | | 10% | 22859.04 | 20780.94 | 18891.77 | 17174.33 |
| | | | 15613.03 | | | |

| | |
|------------|---------------------|
| VAN | 37319.12 CUC |
| TIR | 78 % |
| TRI | 2a, 6mes |

Como se observa en los indicadores de financiación la inversión es factible económicamente para la empresa. El tiempo estimado para valorar la inversión (5 años) es inferior al tiempo de vida útil establecido por el fabricante de estos equipos por lo que la rentabilidad real de la inversión es superior a la calculada.

2. Instalar variadores de velocidad.

Como la mayoría de los sistemas trabajan por debajo de su capacidad nominal durante la mayor parte del tiempo, se han desarrollado métodos para reducir la salida de los motores a un nivel que coincida con lo que se le demanda. Los reguladores de tiro, válvulas de estrangulación y sistemas de recirculación que se usan tradicionalmente para este fin son muy ineficientes desde el punto de vista energético. Reduciendo la velocidad de la carga se obtendría el mismo objetivo de una manera más adecuada.

Es en este campo donde toman importancia los variadores de velocidad, cuya función principal es ofrecer diferentes velocidades de trabajo. Esto permitirá ahorros energéticos y, por tanto, ahorro en costes en aquellas máquinas accionadas por los motores eléctricos que no trabajan a plena carga la mayor parte del tiempo.

El objetivo final, por tanto, es minimizar el uso de la energía consumida por los motores eléctricos mediante la utilización de variadores de velocidad modernos que sustituyan, total o parcialmente, a los métodos convencionales de control de la carga.

En este caso el costo de la inversión para este paquete de motores está en el orden de los 73000 CUC si se decide invertir en la compra de estos equipos, analizando que es factible económicamente en la tabla 3.13.

Tabla 3.13 Cálculo de rentabilidad de la inversión de los variadores.

| | | Tiempo valora la inversión | | | | |
|------------------------------|-------------------|----------------------------|----------|----------|----------|----------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Costo de mantenimiento anual | CUC | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 |
| | Pérdidas nuevas | 3977.85 | 3977.85 | 3977.85 | 3977.85 | 3977.85 |
| | Pérdidas actuales | 39778.49 | 39778.49 | 39778.49 | 39778.49 | 39778.49 |
| + VALOR RESID ACT FIJOS | | 1300 | 1300 | 1300 | 1300 | 1300 |
| FLUJO DE CAJA | | 33100.64 | 33100.64 | 33100.64 | 33100.64 | 33100.64 |
| - INVERSIÓN | | 73000.00 | | | | |
| | Costo equipo | 70000.00 | | | | |
| | Costo de montaje | 3000.00 | | | | |
| = FLUJO NET CAPITAL | | 33100.64 | 33100.64 | 33100.64 | 33100.64 | 33100.64 |
| FC DESCONTADO | | 10% | 30091.49 | 27355.90 | 24869.00 | 22608.18 |
| | | | 20552.89 | | | |

| | |
|------------|---------------------|
| VAN | 52477.47 CUC |
| TIR | 70% |
| TRI | 2a, 6mes |

En el caso de los transformadores se pudo constatar que muchos se encuentran trabajando en vacío y que están ubicados en su mayoría en la línea 1 actualmente

fuera de servicio. Esto está asociado a la conservación de dichos transformadores en cuanto a aislamiento para de ser necesario garantizar sus condiciones en una arrancada futura. Las pérdidas mostradas en la tabla 3.14, aunque son pequeñas, tienen su costo en CUC para la empresa.

Tabla 3.14 Pérdidas y ahorro por la desconexión de transformadores en vacío.

| Pérdidas totales en transformadores (kWh) | Pérdidas con transformadores en vacío desconectados (kWh) | | | Ahorro (kWh) | | |
|---|---|------|------|--------------|------|------|
| | 24 h | 20 h | 16 h | 24 h | 20 h | 16h |
| 9301 | 7134 | 5945 | 4756 | 2167 | 3356 | 4545 |

Una desconexión permanente no se justifica ya que el ahorro anual asciende a 2925.45 CUC, en período de 10 años este valor alcanzaría los 29254.5 CUC valor insuficiente para compensar los gastos de mantenimiento para restablecer su capacidad de trabajo. En este sentido se propone desconectar los transformadores a intervalos que garanticen la integridad del aislamiento. Este tiempo de desconexión debe ser determinado por las mediciones de aislamiento por parte del personal eléctrico de la entidad.

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

1. Los resultados de la ejecución del electrobalance en cementos Cienfuegos S.A. permitieron identificar las pérdidas de energía eléctrica en los elementos que componen la red eléctrica de la empresa y las medidas para su disminución.
2. La actualización del monolineal constituye un elemento fundamental previo a la realización del electrobalance, que facilitó la corrección en la identificación de los equipos conectados a la red.
3. Al realizar el electrobalance, se percibe que las pérdidas de energía eléctrica en motores, transformadores y conductores representan el 3%, 2% y 0.003% respectivamente del consumo total.
4. Las medidas dirigidas a disminución de las pérdidas eléctricas en motores de 6kV, especialmente la sustitución de motores con bajo coeficiente de carga y/o la conexión de variadores muestran altos indicadores de rentabilidad por lo que son factibles económicamente de ser implementadas por la empresa.
5. Una desconexión permanente de los transformadores que se encuentran trabajando en vacío no se justifica, ya que el ahorro anual asociada a la eliminación de las pérdidas asciende solo a 29255 CUC en período de 10 años, valor insuficiente para compensar los gastos de mantenimiento para restablecer su capacidad de trabajo.

RECOMENDACIONES

RECOMENDACIONES

1. Continuar el estudio en bajo voltaje para elevar la eficiencia energética de la industria y así lograr reducir las pérdidas al nivel más bajo posible, las medidas de ahorro derivada de este estudio deberán además ir aparejada con el estudio de factibilidad económica.
2. Desconectar los transformadores a intervalos que garanticen la integridad del aislamiento. Este tiempo de desconexión debe ser determinado por las mediciones de aislamiento por parte del personal eléctrico de la entidad.

BIBLIOGRAFÍA

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. A. F. y. E. R. López, *Suministro Eléctrico de Empresas Industriales*, 1985.
- [2] I. L. Kosow, *Máquinas eléctricas y transformadores*: Pearson Educación, 1993.
- [3] B. S. Guru, H. R. Hiziroglu, and J. E. Brito, *Máquinas eléctricas y transformadores*: Oxford University Press, 2003.
- [4] E. O. Luciano Cuellar, "Manejo Eficiente de la Energía Aplicada en Transformadores," Universidad Autónoma de Occidente Cali., 2007.
- [5] G. CONDUMEX, "Folleto de Aplicaciones de Conductores Eléctricos " *Electric.,S.*" Curso de Calidad de la Energía Eléctrica ".
- [6] Reliance Electric Motors Information Center Available: <http://www.reliance.com/cgi-bin/mtrquery.pl>
- [7] *Baldor Electric Motors Catalogs* Available: <http://www.baldor.com/products>
- [8] D. Beeman, *Industrial Power Systems Handbook*, 1981 ed. La Habana.
- [9] I. S. 739-1995, "IEEE Recommended Practices for Energy Management in Industrial and Commercial Facilities," ed: IEEE, 1995.
- [10] P. Viego, "Temas especiales de Sistemas Eléctricos Industriales," Texto de Maestría en Eficencia Energética, Universidad de Cienfuegos, Cuba, 2006.
- [11] A. G. Jiménez, "Balance Electroenergético en la Unidad Económica Básica Central Azucarero Perucho Figueredo," Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, 2013.
- [12] V. León, "Optimización energética de las instalaciones eléctricas industriales y domésticas," España, 2002.
- [13] (2009). *Cementos Cienfuegos S.A.* Available: <http://www.cementoscfg.com>
- [14] I. P. Abril, "Ayuda del IPA," ed. Universidad Central Marta Abreu de las Villas.
- [15] S. M. Gerónimo, "Programa para la estimación de parámetros energéticos de motores en funcionamiento. ," Departamento de Electroenergética, Universidad Central Marta Abreu de las Villas, 2005.

BIBLIOGRAFÍA

- I. S. 141-1993, "IEEE Recommended Practices for Electric Power Distribution for Industrial Plants," ed: IEEE, 1993.
- I. P. E. S. 2000, "IEEE Standard Definitions of the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions," ed: USA.
- I. I. A. S. I. P. S. Dept, I. o. Electrical, and E. E. N. O. Section, *2001 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference: conference record : papers presented at the 2001 Annual Meeting : Hyatt Regency Hotel, New Orleans, Louisiana, May 15-16, 2001*: IEEE, 2001.
- J. A. Z. Gaitán, "Desarrollo de una herramienta metodológica para verificar la validez de un modelo matemático para el cálculo de la eficiencia de un transformador," Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, 2013.
- J. J. Grainger, W. D. Stevenson, C. L. Sousa, and P. R. Torres, *Análisis de sistemas de potencia*: McGraw-Hill, 1996.
- B. S. Guru, H. R. Hiziroglu, and J. E. Brito, *Máquinas eléctricas y transformadores*: Oxford University Press, 2003.
- G. E. Harper, *Manual de instalaciones eléctricas residenciales e industriales*: Editorial Limusa, 1996.
- G. E. Harper, *Curso de transformadores y motores de inducción*: Editorial Limusa, 2000.
- G. E. Harper, *El libro práctico de los generadores, transformadores y motores eléctricos*: Editorial Limusa, 2005.
- B. K. a. W. Johnson, J.R, "Tailoring induction motor analytical models to fit known motor performance characteristics and satisfy particular studies needs," *IEEE Trans. on Power Systems*, August 1991.
- O. S. Lobosco, J. L. P. da Costa Dias, and D. Oliver, *Selección y aplicación de motores eléctricos*: Marcombo, 1990.
- E. O. LUCIANO CUELLAR, "Manejo Eficiente de la Energía Aplicada en Transformadores," Universidad Autónoma de Occidente Cali., 2007.P. I. Motors, "112TM," 2004.

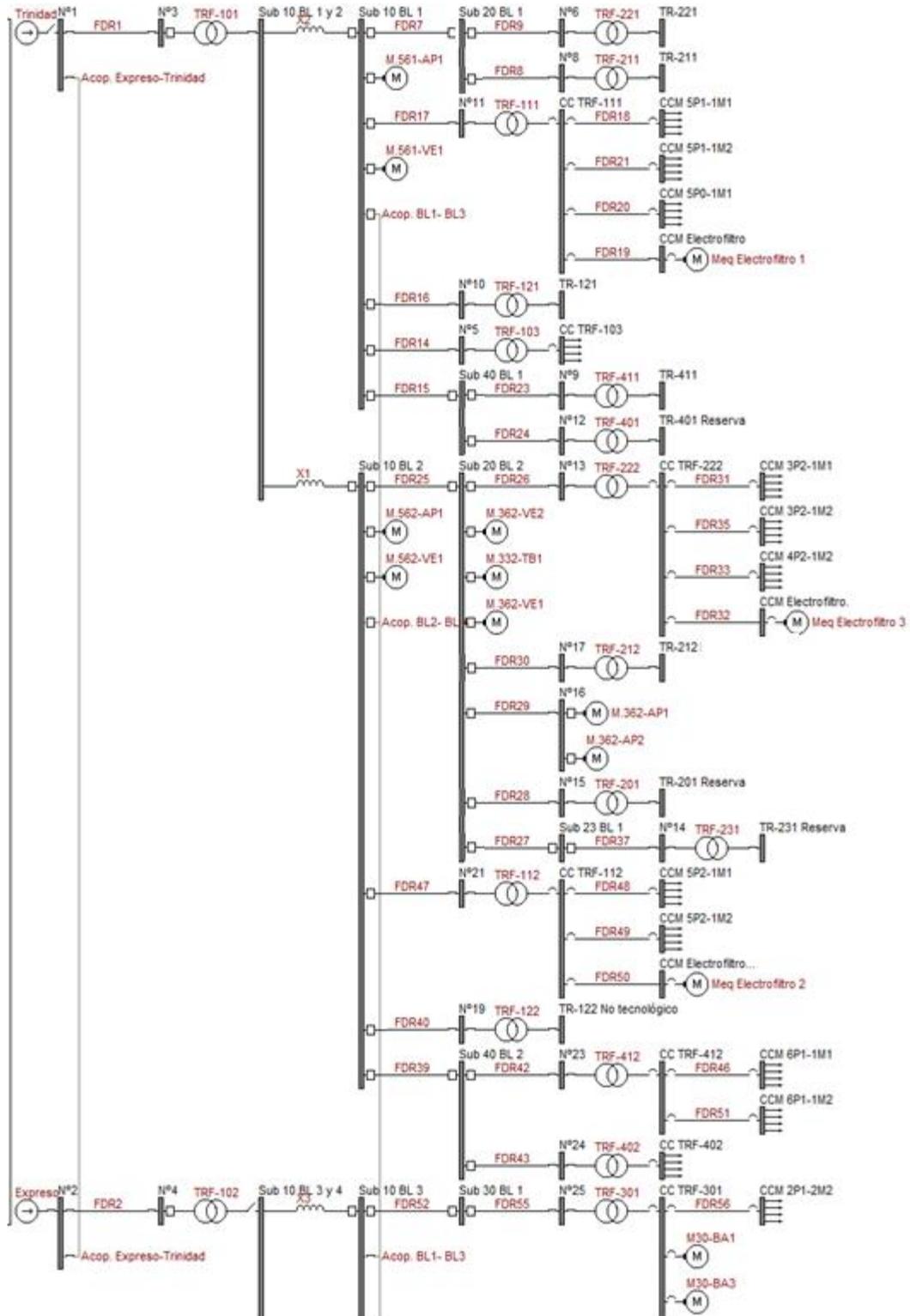
F. Pedra J. Coroles, "Estimation of induction motor double-cage model parameters from manufactures data," *IEEE Trans. on Energy Conversion* June 2004.

C. A. A. Urrego, R. A. G. Rendón, and R. H. Isaza, "Reubicación óptima de transformadores de distribución para reducción de pérdidas técnicas," *Scientia et Technica*, vol. 2, pp. 28-34, 2012.

ANEXOS

ANEXOS

Anexo 1 Monolineal de la empresa



Anexo 2 Datos de conductores

| Subestación 10 | | | | | | |
|----------------|-------------|-------------|---------|----------|------------|----------|
| Desde | Tramo | Hasta | Calibre | Material | Cant./Cond | Longitud |
| Bloque 1 | Bloque 3 | | Barra | | | |
| | | Sub 20 BL 1 | 300 mm2 | Al | 5xFase | 420 |
| | | TR 111 | 120 mm2 | Al | 1xFase | 100 |
| | | TR 121 | 185 mm2 | Al | 1xFase | 315 |
| | | M 561 AP1 | 300 MCM | Cu | 1xFase | 120 |
| | | M 561 VE1 | 250 MCM | Cu | 1xFase | 160 |
| | | TR 103 | 120 mm2 | Al | 1xFase | 50 |
| | | Sub 40 BL 1 | 240 mm2 | Al | 2xFase | 255 |
| Bloque 2 | Bloque 4 | | Barra | | | |
| | | Sub 20 BL 2 | 300 mm2 | Al | 5xFase | 423 |
| | | TR 112 | 120 mm2 | Al | 1xFase | 115 |
| | | TR 122 | 185 mm2 | Al | 1xFase | 325 |
| | | M 562 AP1 | 300 MCM | Cu | 1xFase | 120 |
| | | M 562 VE1 | 250 MCM | Cu | 1xFase | 160 |
| | | Sub 40 BL 2 | 240 mm2 | Al | 2xFase | 275 |
| Bloque 3 | | Sub 30 BL 1 | 300 mm2 | Al | 2xFase | 750 |
| | | Sub 20 BL 3 | 300 mm2 | Al | 5xFase | 428 |
| Bloque 4 | Proyecto L3 | | Barra | | | |
| | | Sub 30 BL 2 | 300 mm2 | Al | 2xFase | 750 |
| | | Sub 20 BL4 | 300 mm2 | Al | 5xFase | 430 |
| | | TR 124 | 185 mm2 | Al | 1xFase | 335 |
| | | TR 114 | 120 mm2 | Al | 1xFase | 125 |
| | | TR 104 | 120 mm2 | Al | 1xFase | 70 |
| | TR 125 | 185 mm2 | Al | 1xFase | 335 | |
| Subestación 20 | | | | | | |
| Desde | Tramo | Hasta | Calibre | Material | Cant./Cond | Longitud |
| Bloque 1 | Bloque 3 | | Barra | | | |
| | | TR 221 | 185 mm2 | Al | 1xFase | 156 |
| | | TR 211 | 120 mm2 | Al | 1xFase | 172 |
| Bloque 2 | Bloque 4 | | Barra | | | |
| | | TR 222 | 185 mm2 | Al | 1xFase | 216 |
| | | TR 212 | 120 mm2 | Al | 1xFase | 213 |
| | | M 362 AP1,2 | 300 mm2 | Al | 1xFase | 38 |
| | | M 362 VE2 | 250 MCM | Cu | 1xFase | 140 |
| | | M 332 TB1 | 250 MCM | Cu | 1xFase | 140 |
| | | M 362 VE1 | 250 MCM | Cu | 1xFase | 140 |
| | | TR 201 | 120 mm2 | Al | 1xFase | 34 |
| | Sub 23 BL 1 | 185 mm2 | Al | 2xFase | 360 | |
| Bloque 3 | | TR 223 | 185 mm2 | Al | 1xFase | 261 |
| | | M 363 AP1,2 | 300 mm2 | Al | 1xFase | 45 |
| | | M 363 VE2 | 250 MCM | Cu | 1xFase | 170 |
| | | M 333 TB1 | 250 MCM | Cu | 1xFase | 170 |

| | | | | | |
|-------------------------|------------------|----------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| | M 363 VE1 | 250 MCM | Cu | 1xFase | 170 |
| Bloque 4 | TR 224 | 185 mm2 | Al | 1xFase | 151 |
| | TR 214 | 185 mm2 | Al | 1xFase | 164 |
| | Sub 23 BL 2 | 185 mm2 | Al | 2xFase | 359 |
| | TR 202 | 120 mm2 | Al | 1xFase | 35 |
| | TR 4P0-1T1 | 4/0 AWG | Cu | 1xFase | 80 |
| M 362 AP1,2 | M 362 AP1 | 300 MCM | Cu | 1xFase | 140 |
| | M 362 AP2 | 300 MCM | Cu | 1xFase | 140 |
| M 363 AP1,2 | M 363 AP1 | 300 MCM | Cu | 1xFase | 170 |
| | M 363 AP2 | 300 MCM | Cu | 1xFase | 170 |
| Subestación 23 | | | | | |
| Tramo | | | | | |
| Desde | Hasta | Calibre | Material | Cant./Cond | Longitud |
| Bloque 1 | Bloque 2 | | | Barra | |
| | TR 231 | 185 mm2 | Al | 1xFase | 28 |
| Bloque 2 | TR 232 | 120 mm2 | Al | 1xFase | 29 |
| Subestación 30 | | | | | |
| Tramo | | | | | |
| Desde | Hasta | Calibre | Material | Cant./Cond | Longitud |
| Bloque 1 | Bloque 2 | | | Barra | |
| | TR 301 | 185 mm2 | Al | 1x Fase | 30 |
| Bloque 2 | TR 302 | 120 mm2 | Al | 1x Fase | 30 |
| | TR 310 | 185 mm2 | Al | 1x Fase | 200 |
| Subestación 40 | | | | | |
| Tramo | | | | | |
| Desde | Hasta | Calibre | Material | Cant./Cond | Longitud |
| Bloque 1 | Bloque 2 | | | Barra | |
| | TR 411 | 185 mm2 | Al | 1xFase | 220 |
| | TR 401 | 185 mm2 | Al | 1xFase | 30 |
| Bloque 2 | TR 412 | 185 mm2 | Al | 1xFase | 210 |
| | TR 402 | 185 mm2 | Al | 1xFase | 24 |
| Subestación 50 | | | | | |
| Tramo | | | | | |
| Desde | Hasta | Calibre | Material | Cant./Cond | Longitud |
| Bloque 1 | M 211 AP1 | 300 MCM | Cu | 1xFase | 150 |
| | M 211 AP2 | 300 MCM | Cu | 1xFase | 150 |
| | TR 502 | 250 mm2 | Al | 1xFase | 30 |
| Proyecto Línea 3 | | | | | |
| Tramo | | | | | |
| Desde | Hasta | Calibre | Material | Cant./Cond | Longitud |
| Proyecto L3 | Descarga-Horno | 500 MCM | Cu | 1xFase | 500 |
| | Pre calentador | 350 MCM | Cu | 2xFase | 800 |
| | Molino de Carbón | 350 MCM | Cu | 2xFase | 800 |
| | Secador | 500 MCM | Cu | 5xFase | 4500 |
| | Sub 50 | 300 mm2 | Al | 2xFase | 4800 |
| Descarga-Horno | TR 4P3-1T2 | 4/0 AWG | Cu | 1xFase | 20 |
| | M 473-VEB | 4/0 AWG | Cu | 1xFase | 100 |
| | TR 4P3-1T3 | 4/0 AWG | Cu | 1xFase | 20 |

| | | | | | |
|-------------------------|----------------|---------|----|--------|-----|
| Pre calentador | TR 4P1-1T1 | 4/0 AWG | Cu | 1xFase | 20 |
| | M 443-VE1 | 350 MCM | Cu | 1xFase | 95 |
| | TR 463-AP1.T01 | 4/0 AWG | Cu | 1xFase | 20 |
| | M 423-VE1 | 4/0 AWG | Cu | 1xFase | 80 |
| | M 422-VE1 | 4/0 AWG | Cu | 1xFase | 120 |
| Molino de Carbón | TR L61-AP1 | 4/0 AWG | Cu | 1xFase | 50 |
| | TR LP1-1T1 | 4/0 AWG | Cu | 1xFase | 50 |
| | M L61-VE1 | 4/0 AWG | Cu | 1xFase | 180 |
| | TR LP1-1T2 | 4/0 AWG | Cu | 1xFase | 50 |
| Secador | TR 221-AP1 | 4/0 AWG | Cu | 1xFase | 20 |
| | M 221-VE3 | 4/0 AWG | Cu | 1xFase | 140 |
| | TR 2P1-1T3 | 4/0 AWG | Cu | 1xFase | 20 |
| TR 463-AP1 | M 463-AP1 | 350 MCM | Cu | 2xFase | 180 |
| TR L61-AP1 | M L61-AP1 | 350 MCM | Cu | 1xFase | 150 |
| TR 221-AP1 | M 221-AP1 | 250 MCM | Cu | 3xFase | 100 |
| | M 221-AP2 | 250 MCM | Cu | 3xFase | 100 |

Anexo 3 Flujo de potencia de los transformadores

| Desde | Hacia | kW | kVAr | A | FP | kWh | kVArh | kWh(p) | kVArh(p) |
|-----------------|---------|--------|--------|--------|-------|---------|---------|--------|----------|
| Nº3 | TRF-101 | 20281 | 16464 | 131.2 | 77.6 | 486754 | 395141 | 4861.3 | 44424 |
| Sub 10 BL 1 y 2 | TRF-101 | -20079 | -14613 | 2375.2 | -80.9 | -481892 | -350717 | 0 | 0 |
| Nº6 | TRF-221 | 2.9 | 18.9 | 1.8 | 15.4 | 70.5 | 452.5 | 70.5 | 452.5 |
| TR-221 | TRF-221 | 0 | 0 | 0 | -80.9 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Nº8 | TRF-211 | 2.2 | 12.7 | 1.2 | 17.1 | 52.9 | 303.7 | 52.9 | 303.7 |
| TR-211 | TRF-211 | 0 | 0 | 0 | -81.9 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Nº11 | TRF-111 | 259.5 | 128.2 | 27.7 | 89.7 | 6228.7 | 3076.3 | 84.7 | 520.3 |
| CC TRF-111 | TRF-111 | -256 | -106.5 | 365.8 | -92.3 | -6144 | -2556 | 0 | 0 |
| Nº10 | TRF-121 | 2.9 | 18.9 | 1.8 | 15.4 | 70.5 | 452.5 | 70.5 | 452.5 |
| TR-121 | TRF-121 | 0 | 0 | 0 | -80.9 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Nº5 | TRF-103 | 81.8 | 127.1 | 14.5 | 54.1 | 1963 | 3049.3 | 43 | 241.3 |
| CC TRF-103 | TRF-103 | -80 | -117 | 189 | -56.4 | -1920 | -2808 | 0 | 0 |
| Nº9 | TRF-411 | 2.9 | 18.8 | 1.8 | 15.4 | 70.4 | 452.2 | 70.4 | 452.2 |
| TR-411 | TRF-411 | 0 | 0 | 0 | -81 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Nº12 | TRF-401 | 2.2 | 12.6 | 1.2 | 17.1 | 52.8 | 303.6 | 52.8 | 303.6 |
| TR-401 Reserva | TRF-401 | 0 | 0 | 0 | -82 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Nº13 | TRF-222 | 395.3 | 420.3 | 55.9 | 68.5 | 9488.3 | 10086 | 128.3 | 726.1 |
| CC TRF-222 | TRF-222 | -390 | -390 | 745.1 | -70.7 | -9360 | -9360 | 0 | 0 |
| Nº17 | TRF-212 | 0.3 | 2.3 | 0.2 | 13.9 | 7.8 | 55.9 | 7.8 | 55.9 |
| TR-212 | TRF-212 | 0 | 0 | 0 | -79.9 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Nº15 | TRF-201 | 2.2 | 12.5 | 1.2 | 17.1 | 52.1 | 299.4 | 52.1 | 299.4 |
| TR-201 Reserva | TRF-201 | 0 | 0 | 0 | -81.7 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Nº14 | TRF-231 | 2.9 | 18.6 | 1.8 | 15.4 | 69.4 | 446 | 69.4 | 446 |

| | | | | | | | | | |
|-----------------------|-------------|--------|-------|--------|-------|---------|---------|--------|--------|
| TR-231 Reserva | TRF-231 | 0 | 0 | 0 | -80.7 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Nº21 | TRF-112 | 230.7 | 226.3 | 31 | 71.4 | 5535.9 | 5430.9 | 87.9 | 534.9 |
| CC TRF-112 | TRF-112 | -227 | -204 | 404.3 | -74.4 | -5448 | -4896 | 0 | 0 |
| Nº19 | TRF-122 | 87.8 | 55 | 9.9 | 84.7 | 2107.1 | 1320.8 | 71.9 | 459.2 |
| TR-122 No tecnológico | TRF-122 | -84.8 | -35.9 | 121 | -92.1 | -2035.2 | -861.6 | 0 | 0 |
| Nº23 | TRF-412 | 147.9 | 180.5 | 22.4 | 63.4 | 3548.5 | 4331.2 | 68.5 | 371.2 |
| CC TRF-412 | TRF-412 | -145 | -165 | 292.4 | -66 | -3480 | -3960 | 0 | 0 |
| Nº24 | TRF-402 | 160.2 | 80.2 | 17.2 | 89.4 | 3843.7 | 1924.2 | 51.7 | 268.2 |
| CC TRF-402 | TRF-402 | -158 | -69 | 229.7 | -91.6 | -3792 | -1656 | 0 | 0 |
| Nº4 | TRF-102 | 60 | 354.9 | 1.8 | 16.7 | 1439.7 | 8517.7 | 1439.7 | 8517.7 |
| Sub 10 BL 3 y 4 | TRF-102 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Nº25 | TRF-301 | 256.2 | 340.9 | 41 | 60.1 | 6149.1 | 8181.5 | 101.1 | 597.5 |
| CC TRF-301 | TRF-301 | -252 | -316 | 539.7 | -62.3 | -6048 | -7584 | 0 | 0 |
| Nº18 | TRF-223 | 413.4 | 416.7 | 56.9 | 70.4 | 9922.5 | 10000 | 130.5 | 736.2 |
| CC TRF-223 | TRF-223 | -408 | -386 | 760 | -72.6 | -9792 | -9264 | 0 | 0 |
| Nº20 | TRF-502 | 171.7 | 160.7 | 23.7 | 73 | 4121.8 | 3856.6 | 65.8 | 352.6 |
| CC TRF-502 | TRF-502 | -169 | -146 | 312.6 | -75.7 | -4056 | -3504 | 0 | 0 |
| Nº30 | TRF-2P1-1T3 | 283.5 | 322.3 | 42.2 | 66 | 6804.5 | 7735.8 | 108.5 | 607.8 |
| CC TRF-2P1-1T3 | TRF-2P1-1T3 | -279 | -297 | 554.5 | -68.5 | -6696 | -7128 | 0 | 0 |
| Nº28 | TRF 4P3-1T2 | 992 | 883.9 | 131.3 | 74.7 | 23808 | 21215 | 338 | 1774.7 |
| CC TRF 4P3-1T2 | TRF 4P3-1T2 | -977.9 | -810 | 1778.2 | -77 | -23470 | -19440 | 0 | 0 |
| Nº31 | TRF 4P3-1T3 | 161.4 | 34.5 | 16.3 | 97.8 | 3874.4 | 827.6 | 58.4 | 323.6 |
| CC TRF 4P3-1T3 | TRF 4P3-1T3 | -159 | -21 | 217.8 | -99.1 | -3816 | -504 | 0 | 0 |
| Nº27 | TRF 4P1-1T1 | 247.6 | 225.8 | 33 | 73.9 | 5942.8 | 5419.7 | 86.8 | 523.7 |
| CC TRF 4P3-1T1 | TRF 4P1-1T1 | -244 | -204 | 433.1 | -76.7 | -5856 | -4896 | 0 | 0 |
| Nº32 | TRF 463-AP1 | 450.1 | 125.2 | 46 | 96.3 | 10802 | 3003.6 | 122.2 | 603.6 |
| CC M 463-AP1 | TRF 463-AP1 | -445 | -100 | 398 | -97.6 | -10680 | -2400 | 0 | 0 |
| Nº26 | TRF L61-AP1 | 525.4 | 98.4 | 51.8 | 98.3 | 12609 | 2362.1 | 129.1 | 682.1 |
| Nº36 | TRF L61-AP1 | -520 | -70 | 85.1 | -99.1 | -12480 | -1680 | 0 | 0 |
| Nº35 | TRF LP1-1T1 | 73.6 | 61.7 | 9.3 | 76.6 | 1766.9 | 1481.6 | 86.9 | 500 |
| CC TRF LP1-1T1 | TRF LP1-1T1 | -70 | -40.9 | 107.8 | -86.3 | -1680 | -981.6 | 0 | 0 |
| Nº33 | TRF LP1-1T2 | 129.4 | 60.4 | 13.8 | 90.6 | 3105.7 | 1450.8 | 57.7 | 322.8 |
| CC TRF LP1-1T2 | TRF LP1-1T2 | -127 | -47 | 180.5 | -93.8 | -3048 | -1128 | 0 | 0 |
| Nº38 | TRF 310 | 48.8 | 83.7 | 9.3 | 50.3 | 1170.6 | 2009.4 | 71.4 | 456.6 |
| Taller Central | TRF 310 | -45.8 | -64.7 | 104.4 | -57.8 | -1099.2 | -1552.8 | 0 | 0 |
| Nº39 | TRF 302 | 2.2 | 12.6 | 1.2 | 17.1 | 52.8 | 303.2 | 52.8 | 303.2 |
| TR-302 Reserva | TRF 302 | 0 | 0 | 0 | -81.8 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Nº37 | TRF-224 | 16.8 | 29.2 | 3.2 | 49.9 | 403.5 | 700 | 36.3 | 275.2 |
| TR 224 No tecnológico | TRF-224 | -15.3 | -17.7 | 30.8 | -65.4 | -367.2 | -424.8 | 0 | 0 |
| Nº40 | TRF-214 | 2.9 | 18.8 | 1.8 | 15.4 | 70.2 | 450.9 | 70.2 | 450.9 |
| Compresores | TRF-214 | 0 | 0 | 0 | -81.4 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| | | | | | | | | | |
|-----------------------|-------------|--------|--------|--------|-------|---------|---------|-------|--------|
| N°42 | TRF 232 | 70.7 | 76.3 | 10 | 68 | 1697.1 | 1831.3 | 55.5 | 314.5 |
| CC TRF-232 | TRF 232 | -68.4 | -63.2 | 122.9 | -73.4 | -1641.6 | -1516.8 | 0 | 0 |
| N°41 | TRF-202 | 107.4 | 96.9 | 13.9 | 74.3 | 2578.6 | 2324.9 | 58.6 | 328.1 |
| CC TRF-202 | TRF-202 | -105 | -83.2 | 177 | -78.4 | -2520 | -1996.8 | 0 | 0 |
| N°44 | TRF 4P0-1T1 | 949.2 | 327.5 | 96.4 | 94.5 | 22782 | 7860.6 | 202.3 | 1099.8 |
| CC TRF 4P0-1T1 | TRF 4P0-1T1 | -940.8 | -281.7 | 1305.5 | -95.8 | -22579 | -6760.8 | 0 | 0 |
| N°48 | TRF-124 | 67.8 | 62.1 | 8.8 | 73.7 | 1627 | 1491 | 55 | 312.6 |
| TR-124 No tecnológico | TRF-124 | -65.5 | -49.1 | 107.8 | -80 | -1572 | -1178.4 | 0 | 0 |
| N°47 | TRF-114 | 1.5 | 11.5 | 1.1 | 13 | 36.1 | 275.1 | 36.1 | 275.1 |
| TR 114 No tecnológico | TRF-114 | 0 | 0 | 0 | -79.5 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| N°46 | TRF-104 | 1 | 7.6 | 0.7 | 12.9 | 23.8 | 183.5 | 23.8 | 183.5 |
| TR-104 Reserva | TRF-104 | 0 | 0 | 0 | -79.4 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| N°45 | TRF-125 | 2.9 | 18.9 | 1.8 | 15.4 | 70.4 | 452.4 | 70.4 | 452.4 |
| TR-125 Deshabilitado | TRF-125 | 0 | 0 | 0 | -80.9 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Anexo 4 Flujo de potencia en conductores

| Desde | Hacia | kW | kVAr | A | FP | kWh | kVArh | kWh(p) | kVArh(p) |
|-----------------|------------------------|----------|----------|--------|-------|-----------|-----------|--------|----------|
| N°1 | Acop. Expreso-Trinidad | -20292.9 | -17546.1 | 134.7 | -75.6 | -487030.8 | -421106.1 | 2.9 | 16.0 |
| N°2 | Acop. Expreso-Trinidad | 20293.1 | 17546.8 | 134.7 | 75.6 | 487033.7 | 421122.0 | 0.0 | 0.0 |
| N°1 | FDR1 | 20292.9 | 17546.1 | 134.7 | 75.6 | 487030.8 | 421106.1 | 7.3 | 39.9 |
| N°3 | FDR1 | -20292.6 | -17544.4 | 134.7 | -75.6 | -487023.5 | -421066.2 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 10 BL 1 y 2 | FDR3 | 11451.4 | 8712.7 | 1379.9 | 79.6 | 274833.1 | 209105.3 | 8.1 | 54.0 |
| Sub 10 BL 1 | FDR3 | -11451.0 | -8710.5 | 1379.9 | -79.6 | -274825.0 | -209051.4 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 10 BL 1 | M.561-AP1.Fdr | 2304.0 | 1651.9 | 271.9 | 81.3 | 55296.6 | 39645.7 | 96.6 | 1076.5 |
| M.561-AP1 | M.561-AP1.Fdr | -2300.0 | -1607.1 | 271.9 | -82.0 | -55200.0 | -38569.2 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 10 BL 1 | M.561-VE1.Fdr | 209.9 | 168.9 | 25.8 | 77.9 | 5036.7 | 4053.1 | 1.5 | 13.2 |
| M.561-VE1 | M.561-VE1.Fdr | -209.8 | -168.3 | 25.8 | -78.0 | -5035.2 | -4039.8 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 10 BL 1 | Acop. BL1- BL3 | 8582.6 | 6552.7 | 1035.6 | 79.5 | 205982.7 | 157264.3 | 2.3 | 15.2 |
| Sub 10 BL 3 | Acop. BL1- BL3 | -8582.5 | -6552.0 | 1035.6 | -79.5 | -205980.4 | -157249.1 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 10 BL 1 | FDR7 | 5.1 | 31.3 | 3.0 | 16.1 | 122.7 | 752.3 | 0.0 | 0.1 |
| Sub 20 BL 1 | FDR7 | -5.1 | -31.3 | 3.0 | -16.1 | -122.7 | -752.2 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 20 BL 1 | FDR9 | 2.9 | 18.8 | 1.8 | 15.4 | 70.1 | 450.1 | 0.0 | 0.1 |
| N°6 | FDR9 | -2.9 | -18.8 | 1.8 | -15.4 | -70.1 | -450.1 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 20 BL 1 | FDR8 | 2.2 | 12.6 | 1.2 | 17.1 | 52.6 | 302.1 | 0.0 | 0.0 |
| N°8 | FDR8 | -2.2 | -12.6 | 1.2 | -17.1 | -52.6 | -302.1 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 10 BL 1 | FDR17 | 259.6 | 128.5 | 27.8 | 89.6 | 6230.4 | 3083.8 | 1.9 | 9.6 |
| N°11 | FDR17 | -259.5 | -128.1 | 27.8 | -89.7 | -6228.4 | -3074.3 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 10 BL 1 | FDR16 | 2.9 | 18.8 | 1.8 | 15.4 | 70.1 | 450.1 | 0.0 | 0.1 |
| N°10 | FDR16 | -2.9 | -18.8 | 1.8 | -15.4 | -70.1 | -450.0 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 10 BL 1 | FDR14 | 81.8 | 127.1 | 14.5 | 54.1 | 1963.3 | 3049.9 | 0.3 | 1.3 |
| N°5 | FDR14 | -81.8 | -127.0 | 14.5 | -54.1 | -1963.0 | -3048.6 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 10 BL 1 | FDR15 | 5.1 | 31.3 | 3.0 | 16.1 | 122.6 | 752.1 | 0.0 | 0.3 |
| Sub 40 BL 1 | FDR15 | -5.1 | -31.3 | 3.0 | -16.1 | -122.6 | -751.8 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 40 BL 1 | FDR23 | 2.9 | 18.7 | 1.8 | 15.4 | 70.0 | 449.9 | 0.0 | 0.1 |

| | | | | | | | | | |
|-----------------|-----------------|---------|---------|--------|-------|-----------|-----------|-------|--------|
| Nº9 | FDR23 | -2.9 | -18.7 | 1.8 | -15.4 | -70.0 | -449.8 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 40 BL 1 | FDR24 | 2.2 | 12.6 | 1.2 | 17.1 | 52.5 | 301.9 | 0.0 | 0.0 |
| Nº12 | FDR24 | -2.2 | -12.6 | 1.2 | -17.1 | -52.5 | -301.9 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 10 BL 1 y 2 | FDR4 | 8630.3 | 6895.4 | 1059.3 | 78.1 | 207127.1 | 165488.5 | 4.8 | 31.8 |
| Sub 10 BL 2 | FDR4 | -8630.1 | -6894.0 | 1059.3 | -78.1 | -207122.3 | -165456.6 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 10 BL 2 | M.562-AP1.Fdr | 2244.7 | 1801.9 | 276.1 | 78.0 | 53872.3 | 43245.4 | 112.3 | 1120.4 |
| M.562-AP1 | M.562-AP1.Fdr | -2240.0 | -1755.2 | 276.1 | -78.7 | -53760.0 | -42124.9 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 10 BL 2 | M.562-VE1.Fdr | 183.1 | 182.0 | 24.8 | 70.9 | 4393.4 | 4367.7 | 1.4 | 12.2 |
| M.562-VE1 | M.562-VE1.Fdr | -183.0 | -181.5 | 24.8 | -71.0 | -4392.0 | -4355.5 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 10 BL 2 | Acop. BL2- BL 4 | 2759.2 | 1884.9 | 320.5 | 82.6 | 66220.9 | 45236.7 | 0.7 | 4.4 |
| Sub 10 BL 4 | Acop. BL2- BL 4 | -2759.2 | -1884.7 | 320.5 | -82.6 | -66220.2 | -45232.3 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 10 BL 2 | FDR25 | 2816.4 | 2481.3 | 360.0 | 75.0 | 67593.0 | 59550.2 | 140.9 | 854.4 |
| Sub 20 BL 2 | FDR25 | -2810.5 | -2445.7 | 360.0 | -75.4 | -67452.1 | -58695.8 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 20 BL 2 | M.362-VE2.Fdr | 310.1 | 293.5 | 41.3 | 72.6 | 7443.4 | 7045.1 | 3.4 | 29.5 |
| M.362-VE2 | M.362-VE2.Fdr | -310.0 | -292.3 | 41.3 | -72.8 | -7440.0 | -7015.6 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 20 BL 2 | M.332-TB1.Fdr | 185.1 | 201.7 | 26.4 | 67.6 | 4441.4 | 4840.6 | 1.4 | 12.1 |
| M.332-TB1 | M.332-TB1.Fdr | -185.0 | -201.2 | 26.4 | -67.7 | -4440.0 | -4828.5 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 20 BL 2 | M.362-VE1.Fdr | 151.5 | 155.1 | 21.0 | 69.9 | 3636.9 | 3722.5 | 0.9 | 7.6 |
| M.362-VE1 | M.362-VE1.Fdr | -151.5 | -154.8 | 21.0 | -69.9 | -3636.0 | -3714.9 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 20 BL 2 | FDR26 | 395.8 | 423.6 | 56.0 | 68.3 | 9500.1 | 10167.1 | 11.8 | 81.9 |
| Nº13 | FDR26 | -395.3 | -420.2 | 56.0 | -68.5 | -9488.3 | -10085.2 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 20 BL 2 | FDR30 | 0.3 | 2.3 | 0.2 | 13.9 | 7.8 | 55.6 | 0.0 | 0.0 |
| Nº17 | FDR30 | -0.3 | -2.3 | 0.2 | -13.9 | -7.8 | -55.6 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 20 BL 2 | FDR29 | 1762.6 | 1338.5 | 213.8 | 79.6 | 42301.6 | 32123.7 | 22.3 | 135.4 |
| Nº16 | FDR29 | -1761.6 | -1332.8 | 213.8 | -79.7 | -42279.3 | -31988.2 | 0.0 | 0.0 |
| Nº16 | M.362-AP1.Fdr | 880.8 | 666.4 | 106.9 | 79.7 | 21139.6 | 15994.1 | 19.6 | 196.1 |
| M.362-AP1 | M.362-AP1.Fdr | -880.0 | -658.3 | 106.9 | -80.1 | -21120.0 | -15798.0 | 0.0 | 0.0 |
| Nº16 | M.362-AP2.Fdr | 880.8 | 666.4 | 106.9 | 79.7 | 21139.6 | 15994.1 | 19.6 | 196.1 |
| M.362-AP2 | M.362-AP2.Fdr | -880.0 | -658.3 | 106.9 | -80.1 | -21120.0 | -15798.0 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 20 BL 2 | FDR28 | 2.2 | 12.4 | 1.2 | 17.1 | 51.8 | 297.7 | 0.0 | 0.0 |
| Nº15 | FDR28 | -2.2 | -12.4 | 1.2 | -17.1 | -51.8 | -297.7 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 20 BL 2 | FDR27 | 2.9 | 18.5 | 1.8 | 15.4 | 69.1 | 443.6 | 0.0 | 0.1 |
| Sub 23 BL 1 | FDR27 | -2.9 | -18.5 | 1.8 | -15.4 | -69.1 | -443.5 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 23 BL 1 | FDR37 | 2.9 | 18.5 | 1.8 | 15.4 | 69.1 | 443.5 | 0.0 | 0.0 |
| Nº14 | FDR37 | -2.9 | -18.5 | 1.8 | -15.4 | -69.1 | -443.5 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 10 BL 2 | FDR47 | 230.8 | 226.8 | 31.0 | 71.3 | 5538.4 | 5442.8 | 2.8 | 13.8 |
| Nº21 | FDR47 | -230.7 | -226.2 | 31.0 | -71.4 | -5535.6 | -5429.0 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 10 BL 2 | FDR40 | 87.8 | 55.1 | 9.9 | 84.7 | 2107.3 | 1322.3 | 0.6 | 3.9 |
| Nº19 | FDR40 | -87.8 | -54.9 | 9.9 | -84.8 | -2106.8 | -1318.5 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 10 BL 2 | FDR39 | 308.2 | 262.2 | 38.8 | 76.2 | 7397.1 | 6291.6 | 3.0 | 24.3 |
| Sub 40 BL 2 | FDR39 | -308.1 | -261.1 | 38.8 | -76.3 | -7394.0 | -6267.3 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 40 BL 2 | FDR42 | 147.9 | 180.9 | 22.5 | 63.3 | 3550.2 | 4342.8 | 1.8 | 12.8 |
| Nº23 | FDR42 | -147.8 | -180.4 | 22.5 | -63.4 | -3548.3 | -4330.0 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 40 BL 2 | FDR43 | 160.2 | 80.2 | 17.2 | 89.4 | 3843.9 | 1924.5 | 0.1 | 0.9 |
| Nº24 | FDR43 | -160.2 | -80.2 | 17.2 | -89.4 | -3843.7 | -1923.6 | 0.0 | 0.0 |
| Nº2 | FDR2 | 60.0 | 354.9 | 1.8 | 16.7 | 1439.7 | 8517.7 | 0.0 | 0.0 |
| Nº4 | FDR2 | -60.0 | -354.9 | 1.8 | -16.7 | -1439.7 | -8517.7 | 0.0 | 0.0 |

| | | | | | | | | | |
|-----------------|----------------|---------|---------|-------|-------|-----------|-----------|-------|--------|
| Sub 10 BL 3 y 4 | FDR5 | 1486.7 | 1133.0 | 179.3 | 79.5 | 35681.6 | 27191.3 | 0.1 | 0.9 |
| Sub 10 BL 3 | FDR5 | -1486.7 | -1132.9 | 179.3 | -79.5 | -35681.5 | -27190.3 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 10 BL 3 | FDR52 | 256.6 | 343.1 | 41.1 | 59.9 | 6158.0 | 8235.3 | 8.1 | 49.4 |
| Sub 30 BL 1 | FDR52 | -256.2 | -341.1 | 41.1 | -60.1 | -6149.8 | -8185.9 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 30 BL 1 | FDR55 | 256.2 | 341.1 | 41.1 | 60.1 | 6149.8 | 8185.9 | 0.9 | 6.1 |
| N°25 | FDR55 | -256.2 | -340.8 | 41.1 | -60.1 | -6148.9 | -8179.8 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 10 BL 3 | FDR54 | 2941.9 | 2603.5 | 376.8 | 74.9 | 70606.7 | 62484.0 | 156.2 | 947.1 |
| Sub 20 BL 3 | FDR54 | -2935.4 | -2564.0 | 376.8 | -75.3 | -70450.5 | -61536.9 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 20 BL 3 | M.363-VE2.Fdr | 360.2 | 295.9 | 45.1 | 77.3 | 8645.0 | 7101.7 | 5.0 | 42.8 |
| M.363-VE2 | M.363-VE2.Fdr | -360.0 | -294.1 | 45.1 | -77.4 | -8640.0 | -7058.9 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 20 BL 3 | M.333-TB1.Fdr | 170.1 | 249.0 | 29.2 | 56.4 | 4082.1 | 5975.9 | 2.1 | 17.9 |
| M.333-TB1 | M.333-TB1.Fdr | -170.0 | -248.2 | 29.2 | -56.5 | -4080.0 | -5958.0 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 20 BL 3 | M.363-VE1.Fdr | 228.1 | 255.8 | 33.1 | 66.5 | 5474.7 | 6140.2 | 2.7 | 23.1 |
| M.363-VE1 | M.363-VE1.Fdr | -228.0 | -254.9 | 33.1 | -66.7 | -5472.0 | -6117.1 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 20 BL 3 | FDR58 | 414.1 | 420.9 | 57.1 | 70.1 | 9937.3 | 10102.1 | 14.8 | 102.7 |
| N°18 | FDR58 | -413.4 | -416.6 | 57.1 | -70.4 | -9922.5 | -9999.4 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 20 BL 3 | FDR59 | 1763.0 | 1342.4 | 214.2 | 79.6 | 42311.5 | 32217.0 | 23.6 | 143.0 |
| N°22 | FDR59 | -1762.0 | -1336.4 | 214.2 | -79.7 | -42287.9 | -32073.9 | 0.0 | 0.0 |
| N°22 | M.363- AP1.Fdr | 881.0 | 668.2 | 107.1 | 79.7 | 21143.9 | 16037.0 | 23.9 | 238.9 |
| M.363- AP1 | M.363- AP1.Fdr | -880.0 | -658.3 | 107.1 | -80.1 | -21120.0 | -15798.0 | 0.0 | 0.0 |
| N°22 | M.363- AP2.Fdr | 881.0 | 668.2 | 107.1 | 79.7 | 21143.9 | 16037.0 | 23.9 | 238.9 |
| M.363- AP 2 | M.363- AP2.Fdr | -880.0 | -658.3 | 107.1 | -80.1 | -21120.0 | -15798.0 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 10 BL 3 | FDR53 | 6870.7 | 4738.3 | 800.5 | 82.3 | 164897.3 | 113720.1 | 4.1 | 27.3 |
| Proyecto L-3 | FDR53 | -6870.5 | -4737.2 | 800.5 | -82.3 | -164893.2 | -113692.8 | 0.0 | 0.0 |
| Proyecto L-3 | FDR65 | 684.6 | 720.5 | 95.3 | 68.9 | 16430.5 | 17291.3 | 280.3 | 1699.9 |
| Sub 50 | FDR65 | -672.9 | -649.6 | 95.3 | -71.9 | -16150.2 | -15591.4 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 50 | M.211-AP1.Fdr | 276.0 | 260.6 | 38.7 | 72.7 | 6624.4 | 6255.6 | 2.8 | 27.5 |
| M.211-AP1 | M.211-AP1.Fdr | -275.9 | -259.5 | 38.7 | -72.8 | -6621.6 | -6228.1 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 50 | M.211-AP2.Fdr | 225.2 | 228.4 | 32.7 | 70.2 | 5404.4 | 5481.1 | 2.0 | 19.6 |
| M.211-AP2 | M.211-AP2.Fdr | -225.1 | -227.6 | 32.7 | -70.3 | -5402.4 | -5461.4 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 50 | FDR70 | 171.7 | 160.6 | 24.0 | 73.0 | 4121.5 | 3854.8 | 0.2 | 2.0 |
| N°20 | FDR70 | -171.7 | -160.5 | 24.0 | -73.0 | -4121.2 | -3852.8 | 0.0 | 0.0 |
| Proyecto L-3 | FDR69 | 938.1 | 782.3 | 117.2 | 76.8 | 22514.2 | 18774.3 | 104.7 | 1443.7 |
| Secador | FDR69 | -933.7 | -722.1 | 117.2 | -79.1 | -22409.5 | -17330.6 | 0.0 | 0.0 |
| Secador | M.221-VE3.Fdr | 310.2 | 309.5 | 43.5 | 70.8 | 7444.4 | 7428.3 | 4.4 | 33.1 |
| M.221-VE3 | M.221-VE3.Fdr | -310.0 | -308.1 | 43.5 | -70.9 | -7440.0 | -7395.2 | 0.0 | 0.0 |
| Secador | FDR73 | 283.5 | 322.5 | 42.6 | 66.0 | 6804.7 | 7739.3 | 1.5 | 11.3 |
| N°30 | FDR73 | -283.5 | -322.0 | 42.6 | -66.1 | -6803.2 | -7728.0 | 0.0 | 0.0 |
| Secador | FDR72 | 340.0 | 90.1 | 34.9 | 96.7 | 8160.4 | 2163.0 | 0.4 | 3.0 |
| N°29 | FDR72 | -340.0 | -90.0 | 34.9 | -96.7 | -8160.0 | -2160.0 | 0.0 | 0.0 |
| Proyecto L-3 | FDR68 | 1576.8 | 1320.6 | 197.3 | 76.7 | 37842.0 | 31694.9 | 164.9 | 2274.1 |
| Descarga- | FDR68 | -1569.9 | -1225.9 | 197.3 | -78.8 | -37677.1 | -29420.8 | 0.0 | 0.0 |
| Descarga- | M 473-VEB.Fdr | 416.2 | 305.4 | 51.1 | 80.6 | 9988.3 | 7330.5 | 4.3 | 32.6 |
| M 473-VEB | M 473-VEB.Fdr | -416.0 | -304.1 | 51.1 | -80.7 | -9984.0 | -7297.8 | 0.0 | 0.0 |
| Descarga-Horno | FDR76 | 992.3 | 886.0 | 131.8 | 74.6 | 23814.5 | 21263.5 | 5.7 | 43.4 |
| N°28 | FDR76 | -992.0 | -884.2 | 131.8 | -74.7 | -23808.8 | -21220.2 | 0.0 | 0.0 |
| Descarga-Horno | FDR77 | 161.4 | 34.4 | 16.3 | 97.8 | 3874.3 | 826.8 | 0.1 | 0.7 |

| | | | | | | | | | |
|------------------|---------------|---------|---------|-------|-------|----------|----------|-------|--------|
| Nº31 | FDR77 | -161.4 | -34.4 | 16.3 | -97.8 | -3874.2 | -826.1 | 0.0 | 0.0 |
| Proyecto L-3 | FDR67 | 2492.0 | 1335.9 | 271.2 | 88.1 | 59807.8 | 32062.0 | 320.2 | 3570.2 |
| Precalentador | FDR67 | -2478.7 | -1187.2 | 271.2 | -90.2 | -59487.6 | -28491.8 | 0.0 | 0.0 |
| Precalentador | M 443-VE1.Fdr | 1280.7 | 263.6 | 129.0 | 97.9 | 30737.2 | 6326.7 | 17.2 | 191.9 |
| M 443-VE1 | M 443-VE1.Fdr | -1280.0 | -255.6 | 129.0 | -98.1 | -30720.0 | -6134.7 | 0.0 | 0.0 |
| Precalentador | M 423-VE1.Fdr | 267.1 | 314.5 | 40.7 | 64.7 | 6410.2 | 7547.8 | 2.2 | 16.6 |
| M 423-VE1 | M 423-VE1.Fdr | -267.0 | -313.8 | 40.7 | -64.8 | -6408.0 | -7531.2 | 0.0 | 0.0 |
| Precalentador | M 422-VE1.Fdr | 233.1 | 257.8 | 34.3 | 67.1 | 5594.3 | 6187.8 | 2.3 | 17.6 |
| M 422-VE1 | M 422-VE1.Fdr | -233.0 | -257.1 | 34.3 | -67.2 | -5592.0 | -6170.2 | 0.0 | 0.0 |
| Precalentador | FDR81 | 247.6 | 225.8 | 33.1 | 73.9 | 5942.9 | 5420.3 | 0.4 | 2.7 |
| Nº27 | FDR81 | -247.6 | -225.7 | 33.1 | -73.9 | -5942.5 | -5417.6 | 0.0 | 0.0 |
| Precalentador | FDR82 | 450.1 | 125.4 | 46.1 | 96.3 | 10803.0 | 3009.2 | 0.7 | 5.3 |
| Nº32 | FDR82 | -450.1 | -125.2 | 46.1 | -96.3 | -10802.3 | -3003.9 | 0.0 | 0.0 |
| Proyecto L-3 | FDR66 | 1179.1 | 577.9 | 126.0 | 89.8 | 28298.7 | 13870.3 | 69.1 | 770.0 |
| Molino de Carbón | FDR66 | -1176.2 | -545.8 | 126.0 | -90.7 | -28229.6 | -13100.3 | 0.0 | 0.0 |
| Molino de Carbón | M L61-VE1.Fdr | 447.8 | 324.7 | 53.7 | 81.0 | 10746.2 | 7792.1 | 8.6 | 64.9 |
| M L61-VE1 | M L61-VE1.Fdr | -447.4 | -322.0 | 53.7 | -81.2 | -10737.6 | -7727.2 | 0.0 | 0.0 |
| Molino de Carbón | FDR85 | 525.5 | 99.1 | 51.9 | 98.3 | 12611.4 | 2378.7 | 2.2 | 16.8 |
| Nº26 | FDR85 | -525.4 | -98.4 | 51.9 | -98.3 | -12609.2 | -2361.8 | 0.0 | 0.0 |
| Molino de Carbón | FDR87 | 73.6 | 61.6 | 9.3 | 76.7 | 1766.4 | 1479.2 | 0.1 | 0.5 |
| Nº35 | FDR87 | -73.6 | -61.6 | 9.3 | -76.7 | -1766.4 | -1478.6 | 0.0 | 0.0 |
| Molino de Carbón | FDR86 | 129.4 | 60.4 | 13.9 | 90.6 | 3105.5 | 1450.3 | 0.2 | 1.2 |
| Nº33 | FDR86 | -129.4 | -60.4 | 13.9 | -90.6 | -3105.4 | -1449.1 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 10 BL 3 y 4 | FDR6 | -1486.7 | -1133.0 | 179.3 | -79.5 | -35681.6 | -27191.3 | 0.1 | 0.9 |
| Sub 10 BL 4 | FDR6 | 1486.7 | 1133.0 | 179.3 | 79.5 | 35681.8 | 27192.2 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 10 BL 4 | FDR91 | 51.0 | 96.4 | 10.5 | 46.8 | 1223.5 | 2313.6 | 0.5 | 3.2 |
| Sub 30 BL 2 | FDR91 | -51.0 | -96.3 | 10.5 | -46.8 | -1223.0 | -2310.4 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 30 BL 2 | FDR92 | 48.8 | 83.7 | 9.3 | 50.3 | 1170.6 | 2008.9 | 0.3 | 2.1 |
| Nº38 | FDR92 | -48.8 | -83.6 | 9.3 | -50.4 | -1170.3 | -2006.8 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 30 BL 2 | FDR93 | 2.2 | 12.6 | 1.2 | 17.1 | 52.5 | 301.5 | 0.0 | 0.0 |
| Nº39 | FDR93 | -2.2 | -12.6 | 1.2 | -17.1 | -52.5 | -301.4 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 10 BL 4 | FDR94 | 1148.3 | 555.3 | 122.3 | 90.0 | 27558.1 | 13327.8 | 16.5 | 100.3 |
| Sub 20 BL 4 | FDR94 | -1147.6 | -551.1 | 122.3 | -90.1 | -27541.6 | -13227.5 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 20 BL 4 | FDR95 | 16.8 | 29.1 | 3.2 | 50.0 | 403.3 | 698.7 | 0.0 | 0.2 |
| Nº37 | FDR95 | -16.8 | -29.1 | 3.2 | -50.0 | -403.3 | -698.5 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 20 BL 4 | FDR96 | 2.9 | 18.7 | 1.8 | 15.4 | 69.8 | 448.5 | 0.0 | 0.1 |
| Nº40 | FDR96 | -2.9 | -18.7 | 1.8 | -15.4 | -69.8 | -448.4 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 20 BL 4 | FDR97 | 70.7 | 76.3 | 10.0 | 68.0 | 1697.1 | 1832.1 | 0.3 | 2.0 |
| Sub 23 BL 2 | FDR97 | -70.7 | -76.3 | 10.0 | -68.0 | -1696.9 | -1830.0 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 23 BL 2 | FDR98 | 70.7 | 76.3 | 10.0 | 68.0 | 1696.9 | 1830.0 | 0.1 | 0.4 |
| Nº42 | FDR98 | -70.7 | -76.2 | 10.0 | -68.0 | -1696.8 | -1829.7 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 20 BL 4 | FDR99 | 107.4 | 96.8 | 13.9 | 74.3 | 2578.5 | 2324.2 | 0.2 | 0.8 |
| Nº41 | FDR99 | -107.4 | -96.8 | 13.9 | -74.3 | -2578.3 | -2323.3 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 20 BL 4 | FDR100 | 949.7 | 330.2 | 96.6 | 94.5 | 22792.9 | 7924.1 | 11.3 | 63.2 |
| Nº44 | FDR100 | -949.2 | -327.5 | 96.6 | -94.5 | -22781.6 | -7860.9 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 10 BL 4 | FDR105 | 67.8 | 62.2 | 8.8 | 73.7 | 1627.1 | 1492.5 | 0.5 | 3.1 |
| Nº48 | FDR105 | -67.8 | -62.1 | 8.8 | -73.8 | -1626.7 | -1489.4 | 0.0 | 0.0 |

| | | | | | | | | | |
|-------------|--------|------|-------|-----|-------|-------|--------|-----|-----|
| Sub 10 BL 4 | FDR104 | 1.5 | 11.4 | 1.1 | 13.0 | 35.9 | 273.7 | 0.0 | 0.0 |
| N°47 | FDR104 | -1.5 | -11.4 | 1.1 | -13.0 | -35.9 | -273.6 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 10 BL 4 | FDR103 | 1.0 | 7.6 | 0.7 | 12.9 | 23.7 | 182.5 | 0.0 | 0.0 |
| N°46 | FDR103 | -1.0 | -7.6 | 0.7 | -12.9 | -23.7 | -182.5 | 0.0 | 0.0 |
| Sub 10 BL 4 | FDR102 | 2.9 | 18.8 | 1.8 | 15.4 | 70.1 | 450.1 | 0.0 | 0.1 |
| N°45 | FDR102 | -2.9 | -18.7 | 1.8 | -15.4 | -70.1 | -450.0 | 0.0 | 0.0 |

Anexo 5 Flujo de potencia de cargas

| Hacia | kW | kVAr | A | FP | kWh | kVArh | kWh(p) | kc |
|-----------|-------|--------|--------|------|---------|---------|--------|------|
| M.561-AP1 | 2300 | 1607.1 | 268.4 | 82 | 55200 | 38569.3 | 2649.6 | 87.6 |
| M.561-VE1 | 209.8 | 168.3 | 25.7 | 78 | 5035.2 | 4039.8 | 332.3 | 98 |
| L1 | 256 | 106.5 | 365.8 | 92.3 | 6144 | 2556 | 0 | 17.3 |
| L2 | 80 | 117 | 189 | 56.4 | 1920 | 2808 | 0 | 35.4 |
| M.562-AP1 | 2240 | 1755.2 | 272.2 | 78.7 | 53760 | 42124.9 | 2580.5 | 85.3 |
| M.562-VE1 | 183 | 181.5 | 24.7 | 71 | 4392 | 4355.5 | 289.9 | 85.5 |
| M.362-VE2 | 310 | 292.3 | 41.1 | 72.8 | 7440 | 7015.6 | 490.9 | 46 |
| M.332-TB1 | 185 | 201.2 | 26.3 | 67.7 | 4440 | 4828.5 | 277.9 | 55.2 |
| M.362-VE1 | 151.5 | 154.8 | 20.9 | 69.9 | 3636 | 3714.9 | 233.1 | 50.6 |
| L3 | 390 | 390 | 745.1 | 70.7 | 9360 | 9360 | 0 | 34.5 |
| M.362-AP1 | 880 | 658.3 | 106.1 | 80.1 | 21120 | 15798 | 1203.8 | 92.2 |
| M.362-AP2 | 880 | 658.3 | 106.1 | 80.1 | 21120 | 15798 | 1203.8 | 92.2 |
| L4 | 227 | 204 | 404.3 | 74.4 | 5448 | 4896 | 0 | 19.1 |
| L5 | 84.8 | 35.9 | 121 | 92.1 | 2035.2 | 861.6 | 0 | 5.8 |
| L6 | 145 | 165 | 292.4 | 66 | 3480 | 3960 | 0 | 22 |
| L7 | 158 | 69 | 229.7 | 91.6 | 3792 | 1656 | 0 | 43.1 |
| L8 | 252 | 316 | 539.7 | 62.3 | 6048 | 7584 | 0 | 25.3 |
| M.363-VE2 | 360 | 294.1 | 44.8 | 77.4 | 8640 | 7058.9 | 513.5 | 53.7 |
| M.333-TB1 | 170 | 248.2 | 29 | 56.5 | 4080 | 5958 | 301.8 | 50 |
| M.363-VE1 | 228 | 254.9 | 33 | 66.7 | 5472 | 6117.1 | 238 | 34.6 |
| L9 | 408 | 386 | 760 | 72.6 | 9792 | 9264 | 0 | 35.1 |
| M.363-AP1 | 880 | 658.3 | 106.2 | 80.1 | 21120 | 15798 | 1077.1 | 92.8 |
| M.363-AP2 | 880 | 658.3 | 106.2 | 80.1 | 21120 | 15798 | 1077.1 | 92.8 |
| M.211-AP1 | 275.9 | 259.5 | 38.2 | 72.8 | 6621.6 | 6228.1 | 439.3 | 64.4 |
| M.211-AP2 | 225.1 | 227.6 | 32.3 | 70.3 | 5402.4 | 5461.4 | 352.9 | 52.6 |
| L10 | 169 | 146 | 312.6 | 75.7 | 4056 | 3504 | 0 | 22.3 |
| M.221-VE3 | 310 | 308.1 | 42.9 | 70.9 | 7440 | 7395.2 | 280.5 | 56.8 |
| L11 | 279 | 297 | 554.5 | 68.5 | 6696 | 7128 | 0 | 20.4 |
| L25 | 340 | 90 | 34.5 | 96.7 | 8160 | 2160 | 0 | 44 |
| M.473-VEB | 416 | 304.1 | 50.9 | 80.7 | 9984 | 7297.8 | 389.4 | 76.1 |
| L12 | 977.9 | 810 | 1778.2 | 77 | 23469.6 | 19440 | 0 | 63.5 |

| | | | | | | | | |
|-----------|-------|-------|--------|------|---------|--------|-------|------|
| L13 | 159 | 21 | 217.8 | 99.1 | 3816 | 504 | 0 | 16 |
| M.443-VE1 | 1280 | 255.6 | 128.4 | 98.1 | 30720 | 6134.8 | 1010 | 72.8 |
| M.423-VE1 | 267 | 313.8 | 40.5 | 64.8 | 6408 | 7531.2 | 852.3 | 92.6 |
| M.422-VE1 | 233 | 257.1 | 34.1 | 67.2 | 5592 | 6170.2 | 201.3 | 89.8 |
| L14 | 244 | 204 | 433.1 | 76.7 | 5856 | 4896 | 0 | 19.9 |
| L15 | 445 | 100 | 398 | 97.6 | 10680 | 2400 | 0 | 45.6 |
| M.L61-VE1 | 447.4 | 322 | 53.4 | 81.2 | 10737.6 | 7727.2 | 348.8 | 66.6 |
| L16 | 520 | 70 | 85.1 | 99.1 | 12480 | 1680 | 0 | 40.4 |
| L17 | 70 | 40.9 | 107.8 | 86.3 | 1680 | 981.6 | 0 | 4.1 |
| L18 | 127 | 47 | 180.5 | 93.8 | 3048 | 1128 | 0 | 13.5 |
| L19 | 45.8 | 64.7 | 104.4 | 57.8 | 1099.2 | 1552.8 | 0 | 5 |
| L20 | 15.3 | 17.7 | 30.8 | 65.4 | 367.2 | 424.8 | 0 | 3.7 |
| L21 | 68.4 | 63.2 | 122.9 | 73.4 | 1641.6 | 1516.8 | 0 | 9.3 |
| L22 | 105 | 83.2 | 177 | 78.4 | 2520 | 1996.8 | 0 | 13.4 |
| L23 | 940.8 | 281.7 | 1305.5 | 95.8 | 22579.2 | 6760.8 | 0 | 39.3 |
| L24 | 65.5 | 49.1 | 107.8 | 80 | 1572 | 1178.4 | 0 | 8.2 |

Anexo 6 Cargabilidad calculada por interpolación lineal

| Motor 221-VE3 | | | | Motor 473-VEB | | | |
|------------------|--------|--------|--------|-----------------|--------|--------|--------|
| kc(%) | 100 | 75 | 50 | kc(%) | 100 | 75 | 50 |
| η (%) | 96.1 | 96 | 95.5 | η (%) | 96.1 | 96 | 95.5 |
| fp | 0.82 | 0.8 | 0.72 | fp | 0.82 | 0.8 | 0.72 |
| Psal(kW) | 525 | 393.75 | 262.5 | Psal(kW) | 525 | 393.75 | 262.5 |
| Pent(kW) | 546.31 | 410.16 | 274.87 | Pent(kW) | 546.31 | 410.16 | 274.87 |
| ΔP (kW) | 21.31 | 16.41 | 12.37 | ΔP (kW) | 21.31 | 16.41 | 12.37 |
| I(A) | 64.11 | 49.33 | 36.74 | I(A) | 64.11 | 49.33 | 36.74 |
| Q(kVAr) | 381.32 | 307.62 | 264.93 | Q(kVAr) | 381.32 | 307.62 | 264.93 |
| Estados de carga | | | | | | | |
| Ic(A) | 40.9 | 42 | | Ic(A) | 47.6 | 41.9 | |
| kc | 58 | 60 | | kc | 72 | 60 | |
| Motor L61-VE1 | | | | Motor 422-VE1 | | | |
| kc(%) | 100 | 75 | 50 | kc(%) | 100 | 75 | 50 |
| η (%) | 96.7 | 96.6 | 96 | η (%) | 94.6 | 94.4 | 93.5 |
| fp | 0.87 | 0.85 | 0.78 | fp | 0.71 | 0.64 | 0.52 |
| Psal(kW) | 650 | 487.5 | 325 | Psal(kW) | 250 | 187.5 | 125 |
| Pent(kW) | 672.18 | 504.66 | 338.54 | Pent(kW) | 264.27 | 198.62 | 133.69 |
| ΔP (kW) | 22.18 | 17.16 | 13.54 | ΔP (kW) | 14.27 | 11.12 | 8.69 |
| I(A) | 74.35 | 57.13 | 41.76 | I(A) | 35.82 | 29.86 | 24.74 |
| Q(kVAr) | 380.94 | 312.76 | 271.61 | Q(kVAr) | 262.11 | 238.46 | 219.60 |
| Estados de carga | | | | | | | |
| Ic(A) | 51 | 44.7 | | Ic(A) | 32 | 33 | |
| kc | 65 | 55 | | kc | 84 | 88 | |