



Facultad de Metalurgia Electromecánica
Departamento de Ingeniería Eléctrica

TRABAJO DE DIPLOMA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO

***TEMA: EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE LA MODIFICACIÓN TECNOLÓGICA
DEL SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE LA REFINERÍA “HERMANOS
DÍAZ”***

Autor: Adriano Ajo Pérez

Tutor: M. Sc. Ignacio Romero Rueda

**Moa 2014
“Año 56 de la Revolución”**

**“El conocimiento es la virtud y solo si se sabe se puede
divisar el bien”**

Sócrates.

DEDICATORIA

A mi querida madre, quien siempre supo enseñarme lo bueno y lo malo de la vida, quien me dedicó todo su tiempo, amor, sacrificio y sabiduría, para que yo llegara a ser lo que hoy soy, gracias por entenderme y comprenderme, gracias por existir en mi vida GISELA PÉREZ OLIVA.

A la memoria de mi querido padre Reynaldo Ajo Marrero que ya no existe entre nosotros.

A la Virgen de la Caridad del Cobre. (Oshún).

AGRADECIMIENTOS

Al Señor por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el período de estudio.

A mi madre por su amor y devoción constante y haberme inculcado el espíritu de estudio.

A una persona muy especial para mí, que es como si fuera mi padre Robert.

A mis abuelos quienes han luchado junto conmigo, para llegar a donde estoy, Fe LLilian Oliva Cabrera y Leo Pérez Nazco.

A un gran amigo y compañero Álvaro Montero Sánchez.

A mi padrino por siempre apoyarme en todos los momentos, Salvador Díaz Martínez.

A mi Madrina por enseñarme que el tiempo lo cura todo, Marena Jiménez Rodríguez.

A mí querida tía y madre a la vez por su apoyo incondicional, Maricela Díaz Verdecie.

A mi tía Daysi por estar siempre a mi lado.

A mis tías Magalis y Leticia.

A mis queridos Hermanos, Yudelkis, Norgito, Ana María, Geidi Bárbara y Katia.

A mis Sobrinos Luis Miguel, Manolito, María Carla y María Claudia.

A mis primos Julio Cesar, David Alejandro, Yosvani, Yosmani y Luisito.

A una persona muy querida Alina Cruz Hidalgo, por ayudarme en los momentos buenos y malos.

A mi tutor Ignacio Romero Rueda por su apoyo incondicional.

A una gran amiga y profesora Doralis Durán Durán, por soportarme todo este tiempo de estudio.

A una secretaria y gran amiga, Blanquita.

A Bárbara Pérez, Damaris Mora, Yoa, Anielis, Marbelis por su gran ayuda.

A Odalis Robles Laurencio por su amor y dedicación.

A mis amigos, Dilber, Newton, Amauri, Carlitos, Yordanis, Luisito, Sergio, Andrés, Yasmani, Dianelis, Yahimaris, Roberto, Virgilí, Lesdanis, Gustavo, Jorge Luis, Adisleidis, Odalis, Yeili, Yoan Raúl, Susel, Keyla, Reyna, Felipito, Felipe, Yudelmi, Yusi, Mailié, Osmany y familia, en fin a todos en general.

A la negra y sus compañeras de trabajo de la cocina.

A los Santos y todos los eggúns.

A todos quienes me ayudaron a realizar mi sueño hecho realidad, les estoy eternamente agradecido.

Gracias a todos.

RESUMEN

El presente trabajo de acuerdo con los principios del desarrollo energético sostenible en Cuba tiene como objetivo evaluar la modificación tecnológica del sistema de suministro de energía eléctrica a las diferentes subestaciones de la refinería Hermanos Díaz con criterios energéticos y ambientales.

El trabajo consta de dos partes: un estudio de factibilidad técnico económico donde se demuestra que la red aérea a la intemperie es la óptima a emplear y una segunda parte que analiza el cambio de las redes eléctricas internas con la utilización de nuevas tecnologías conductoras para determinar la variante racional desde el punto de vista medioambiental. La red eléctrica resultante económico-ambiental es del tipo aéreo por bandejas con un TIR de 19,96%, una tasa de interés del 15%, un VAN de 2,9 M\$ para un periodo de recuperación de la inversión de 2 años y 7 meses.

Se concluye que mediante esta red se garantiza la calidad del servicio eléctrico y el ahorro de emisiones de CO₂ al aire, como contribuyente número uno de los contaminantes del medio ambiente.

SUMMARY

The Scope of Work is a study of the electric system efficiency at the Refinery “Hermanos Díaz” located at Santiago de Cuba's city focusing on the groups of cables and your environmental impact.

Environmental aspects introduced allow making an evaluation of efficiency in term of costs. The electric network is described and it emphasizes the environmental problems that these cause mainly CO₂emissions.

The work consists of two parts: A study of the overall efficiency in the conventional network of distribution in the classical technology. It includes a feasibility study where it is demonstrated which is the more optimal variant to use. The second part examines the technological change of the electric internal networks with the utilization of new cables technologies suitable to the surrounding. It analyzes in detail the losses in this type of cables taking into account the resistive term and conclusion regarding the emissions of CO₂and it's cost.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. ARCO TEÓRICO CONCEPTUAL	5
1.1. Introducción	5
1.2. Eficiencia energética en redes de distribución de media tensión	5
1.2.1. Enlace Eficiencia Energética-Ecoeficiencia.....	6
1.2.2. Generalidades de las redes eléctricas de distribución.	7
1.3. Descripción general del proceso productivo de la refinería.....	9
1.4. Breve descripción del esquema eléctrico actual	10
1.5 Situación ambiental actual relacionada con el sistema eléctrico.....	12
CAPÍTULO 2. DIAGNÓSTICO TECNOLÓGICO Y ESTUDIO DE FACTIBILIDAD EN EL SISTEMA ELÉCTRICO DE LA REFINERÍA “HERMANOS DÍAZ”	13
2.1. Introducción.....	13
2.2. Niveles de tensión y frecuencia de las redes de medio y bajo voltaje	13
2.3. Deterioro del aislamiento de los conductores.....	14
2.4. Impactos ambientales potenciales generados por las líneas eléctricas soterradas..	18
2.5. Impactos ambientales potenciales generados por las líneas áreas	19
2.6. Estudio de las variantes a utilizar	20
2.7. Estudio de factibilidad técnico económico (EFTE) realizado.....	26
2.8. Parámetros eléctricos para la evaluación económica	28
2.9. Beneficio ambiental de la modernización.....	31
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS ECOLÓGICO Y ECONÓMICO DE LA MODERNIZACIÓN DE LAS LÍNEAS ELÉCTRICAS EN LA REFINERÍA	35
3.1. Introducción	35
3.1.1. Criterio de selección por intensidad máxima admisible por calentamiento	36
3.1.2. Criterio de la selección por sección económica.....	37
3.1.3. Criterio de la selección por sección ecológica.....	42
CONCLUSIONES.....	51
RECOMENDACIONES	52
BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA	53

INTRODUCCIÓN

Lograr un desarrollo sostenible es una tarea compleja para cualquier sociedad. Esta, esencialmente tiene en cuenta la optimización de la relación economía-ambiente, en tal forma que la economía pueda satisfacer las necesidades de la presente generación, simultáneamente manteniendo la base ambiental para satisfacer las necesidades de las futuras generaciones (República Dominicana, 2007).

La empresa del Petróleo tiene un importante rol en el logro de una adecuada relación económica – ambiental, las actividades que desarrolla incluyen la explotación de recursos naturales importantes. Este debe completar la formación de la fuerza técnica de alta calificación y dedicación con que cuenta, en los conceptos ambientales e introducir el uso de tecnologías que permitan la mejora continua de los aspectos técnicos vinculados al medio ambiente, teniendo en cuenta que los impactos ambientales no podrán ser llevados a cero o eliminados, pueden ser reducidos a niveles ambientales aceptables(Zamora, 2010).

Actualmente es desfavorable desde el punto medioambiental el proceso productivo de las industrias petroleras cubanas ya que se operan con tecnología obsoletas, los estudios realizados con relación a este tema indican que estas empresas son altamente contaminantes ya que emanan a la atmósfera grandes cantidades de gases tóxicos sin el debido tratamiento.

En nuestro país existen cuatro Refinerías, La “Nico López” en el occidente, La “Camilo Cienfuegos” ubicada al norte de la bahía de Cienfuegos, La Sergio Soto ubicada en el centro del país y la “Hermanos Díaz” ubicada en la bahía de Santiago de Cuba.

Todas las refinerías cubanas operan con crudo importado, excepto la Refinería Sergio Soto cuya materia prima es el crudo nacional procedente de la zona central del país, y la Refinería “Nico López” que procesa algunas cantidades de crudo nacional de la región occidental de Cuba.

Los productos que se obtienen en las refinerías cubanas son el Gas Licuado Regular, Naftas y solventes, Gasolina Motor Regular y Especial, Kerosene, Diesel, Petróleos

Combustibles (Fuel Oil), Combustibles Diésel Marinos (Búnker), Cementos Asfálticos, Asfaltos Diluidos.

La Refinería Hermanos Díaz está enfrascada en la ejecución de una remodelación para sustituir el equipamiento eléctrico actual con más de 50 años de explotación con tecnología obsoleta y en malas condiciones producto de los contaminantes generados en el proceso productivo, en pos de lograr la garantía de un eficiente y seguro funcionamiento del sistema, mayor seguridad al hombre.

En la ejecución de esta remodelación es necesario tener en cuenta el cambio climático el cual constituye uno de los principales problemas ambientales con que se enfrenta la humanidad en estos momentos y en los años venideros.

La remodelación se ejecutará en las instalaciones de suministro eléctrico que van desde la subestación principal hasta los centros de cargas o subestaciones auxiliares, las que constituyen el análisis de esta tesis. Esta se valora desde el punto de vista técnico, económico y ambiental, para lograr una producción más limpia que garantice el futuro de las nuevas generaciones.

Justificación y viabilidad

La refinería “Hermanos Díaz”, en su proceso de refinación del petróleo incorpora a la atmósfera partículas y emisiones gaseosas, derrame de hidrocarburos al medio marino y al suelo, generando serios problemas de contaminación ambiental.

Aparejado a esto el proceso de remodelación en la que se verá inmersa cada una de sus subestaciones eléctricas también traerá consigo una serie de medidas relacionadas con el control medio ambiental, referido a la prevención y control de la atmósfera, suelos, aguas y, a los residuos sólidos.

Esto crea la necesidad de definir los impactos ambientales negativos causados por la construcción, operación y mantenimiento de las líneas eléctricas, que permitan determinar las principales medidas a adoptar para mitigar los impactos que estas producen.

Problemática

El sistema eléctrico presenta un alto nivel de deterioro por el tiempo de construido y por la interacción de los contaminantes de naturaleza química que genera la Refinería que afectan el equipamiento, los conductores y el aislamiento de los mismos.

Problema de la investigación

Necesidad de criterios energéticos para la evaluación del sistema de suministro eléctrico en las condiciones actuales de operación de las líneas de distribución en la Refinería Hermanos Díaz.

Objetivo General

Evaluar con criterios energéticos la modificación tecnológica del sistema de suministro de energía eléctrica a las diferentes subestaciones de la refinería Hermanos Díaz, de acuerdo con los principios del desarrollo energético sostenible.

Objetivos específicos

1. Definir los principales problemas ambientales relacionados con el proceso tecnológico y del sistema eléctrico.
2. Realizar un estudio de factibilidad de las variantes aéreas y soterradas, identificar los impactos ambientales potenciales de las mismas.
3. Identificar los beneficios económicos, ecológicos y sociales con la correcta selección de las líneas eléctricas.

Hipótesis

El estudio de los fundamentos teóricos existentes, conjugado con el análisis de factibilidad técnico económico de variantes de redes eléctricas, permitirá evaluar con criterios energéticos la modificación tecnológica del sistema de suministro de energía eléctrica en la Refinería Hermanos Díaz.

Tareas de la investigación

1. Realización del diagnóstico del estado actual del sistema de distribución de 6 kV a la refinería Hermanos Díaz.
2. Análisis de la situación actual de las líneas eléctricas y el impacto que estas generan en los problemas medioambientales existentes.
3. Propuestas de variantes del sistema de distribución de 6 kV que contribuyan a la modernización de la infraestructura de estas redes.
4. Estudio de factibilidad de las variantes de distribución propuestas.
5. Definición de la modernización de la variante seleccionada.
6. Propuestas de cambios de la sección del conductor de las líneas eléctricas que mitiguen los impactos que se generan en el proceso productivo, mediante el método de la selección por criterios económicos y ecológicos.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

1.1. Introducción

Mientras las poblaciones humanas siguieron siendo pequeñas y su tecnología modesta, su impacto sobre el medio ambiente fue solamente local. No obstante, al ir creciendo la población, mejorando y aumentando la tecnología, aparecieron problemas más significativos y generalizados. El rápido avance tecnológico producido tras la edad media culminó en la Revolución Industrial, que trajo consigo el descubrimiento, uso y explotación de los combustibles fósiles, así como la explotación intensiva de los recursos minerales de la Tierra. Fue con la Revolución Industrial cuando los seres humanos empezaron realmente a cambiar la faz del planeta, la naturaleza de su atmósfera y la calidad de su agua. Hoy, la demanda sin precedentes a la que el rápido crecimiento de la población humana y el desarrollo tecnológico someten al medio ambiente está produciendo un declive cada vez más acelerado en la calidad de éste y en su capacidad para sustentar la vida(Chales *et al.*, 2007).

La refinería Hermanos Díaz es también uno de los primeros culpables de la contaminación de los 11,9 km² de la bahía de Santiago de Cuba. Esta industria produce diariamente 278 t de gasolina automotor, gas oil de Vacío 530 t, la kerosene + Diesel 1069 t y el gas licuado con un promedio de 7 t/día.

1.2. Eficiencia energética en redes de distribución de media tensión

Dado el elevado coste de la energía eléctrica y las dificultades que existen para cubrir la demanda mundial de electricidad y el efecto nocivo para el medio ambiente que supone la producción masiva de electricidad se impone la necesidad de aplicar la máxima eficiencia energética posible en todos los usos que se haga de la energía eléctrica.

La eficiencia energética es la relación entre la cantidad de energía consumida de los productos y los beneficios finales obtenidos. Se puede lograr aumentarla mediante la implementación de diversas medidas e inversiones a nivel tecnológico, de gestión y de hábitos culturales en la comunidad.

Eficiencia es un concepto que ha arraigado en la concepción del diseño de varios procesos y que, en la actualidad, ha adquirido una relevancia asociada al impacto del incremento de los costos de recursos baratos, tanto directamente en dinero como en impacto ambiental, como la energía. La necesidad de su optimización requiere de una definición clara.

La eficiencia es la óptima utilización de los recursos disponibles para la obtención de resultados deseados: A mayor eficiencia menor será la cantidad de recursos que se emplearan, logrando mejor optimización y rendimiento.

La relevancia adquirida por el impacto ambiental de la producción de energía obliga a considerar la Eficiencia Energética más ligada a su aspecto ambiental (Carballo Mogueira, 2005).

1.2.1. Enlace Eficiencia Energética-Ecoeficiencia.

En este ámbito, el concepto Eficiencia Energética se refiere básicamente a hacer un buen uso de la energía para, junto con el desarrollo de energía renovables y la utilización de tecnologías menos agresivas con el medio, tratar de frenar el cambio climático. La eficiencia energética supone la obtención de los mismos beneficios y servicios energéticos, pero con menos recursos, sin renunciar a la calidad de vida, con menos contaminación, a un precio inferior al actual, alargando la vida de dichos recursos (Ochoa, 2007).

El ámbito del desarrollo sostenible puede dividirse conceptualmente en tres partes: ecológico, económico y social. Se considera el aspecto social por la relación entre el bienestar social con el medio ambiente y la bonanza económica. El triple resultado es un conjunto de indicadores de desempeño de una organización en las tres áreas.

El objetivo del desarrollo sostenible es definir proyectos viables y reconciliar los aspectos económico, social, y ambiental de las actividades humanas; "tres pilares" que deben tenerse en cuenta por parte de las comunidades, tanto empresas como personas naturales (Carballo Mogueira, 2005):

- **Sostenibilidad económica:** se da cuando la actividad que se mueve hacia la sostenibilidad ambiental y social es financieramente posible y rentable.
- **Sostenibilidad social:** basada en el mantenimiento de la cohesión social y de su habilidad para trabajar en la persecución de objetivos comunes. Supondría, tomando el ejemplo de una empresa, tener en cuenta las consecuencias sociales de la actividad de la misma en todos los niveles: los trabajadores (condiciones de trabajo, nivel salarial, etc.), los proveedores, los clientes, las comunidades locales y la sociedad en general.
- **Sostenibilidad ambiental:** compatibilidad entre la actividad considerada y la preservación de la biodiversidad y de los ecosistemas, evitando la degradación de las funciones fuente y sumidero. Incluye un análisis de los impactos derivados de la actividad considerada en términos de flujos, consumo de recursos difícil o lentamente renovables, así como en términos de generación de residuos y emisiones. Este último pilar es necesario para que los otros dos sean estables.

1.2.2. Generalidades de las redes eléctricas de distribución.

La Red de Distribución de la Energía Eléctrica o Sistema de Distribución de Energía Eléctrica es la parte del sistema de suministro eléctrico cuya función es el suministro de energía desde la subestación de distribución hasta los usuarios finales (medidor del cliente). Se lleva a cabo por los Operadores del Sistema de Distribución. Los elementos que conforman la red o sistema de distribución son los siguientes:

- Subestación de Distribución de casitas: conjunto de elementos (transformadores, interruptores, seccionadores, etc.) cuya función es reducir los niveles de alta tensión de las líneas de transmisión (o subtransmisión) hasta niveles de media tensión para su ramificación en múltiples salidas.
- Circuito Primario.
- Circuito Secundario.

Las líneas de distribución están formadas por líneas aéreas, por cables soterrados o la combinación de ambos, como es el caso que analizaremos en este trabajo (Ministerio de Energía y Minas, 2010).

Las zonas más urbanizadas de las ciudades a nivel mundial cuentan con un suministro de energía eléctrica basado en redes de distribución subterráneas debido a sus indudables ventajas con respecto a las redes aéreas, estos beneficios pueden resumirse de la manera siguiente:

- ✓ Mayor confiabilidad.
- ✓ Mayor seguridad.
- ✓ Mejor imagen urbana.
- ✓ Menor impacto medio ambiental.

Estas ventajas se evidencian desde el propio instante de la proyección y/o construcción de las redes, como se expone a continuación:

En las redes aéreas los alimentadores primarios, ramales, transformadores, interruptores, seccionalizadores y demás componentes están soportados por estructuras que los mantienen separados de tierra a la altura establecida por las normas, mientras que en las redes soterradas los componentes se hallan bajo tierra, los conductores pueden hallarse situados en conductos o directamente enterrados y los transformadores, interruptores, seccionalizadores, etc. se hallan en cámaras que pueden encontrarse en edificios o comercios existentes o bien bajo tierra. Por tanto, un sistema aéreo es más propenso a sufrir mayor número de averías como consecuencia del viento, las lluvias o accidentes de todo tipo, aunque la reparación y localización de averías es mucho más sencilla que en un sistema soterrado (Turner, 2007).

La elección de uno u otro sistema depende de un gran número de factores, las consideraciones económicas son el principal factor de decisión, pues el costo de un sistema soterrado puede alcanzar de 5 a 10 veces el costo de un sistema aéreo, pero un sistema aéreo puede tener una vida útil de 25 años, mientras que un sistema soterrado puede alcanzar los 50 años.

Es importante resaltar que el costo de las instalaciones subterráneas ha disminuido de manera importante a lo largo de los años, debido a la aparición de nuevos productos y

equipos y aunque este suele ser superior al de un sistema aéreo, el costo anual de operación puede ser inferior.

La distribución subterránea tiene tradición histórica, técnica y económica. De modo general, los sistemas de distribución se instalan bajo tierra cuando se puede justificar el costo adicional de una instalación subterránea(BCN, 2012).

La situación de la red eléctrica en la refinería Hermanos Díaz de Santiago de Cuba, se caracteriza por la existencia de:

- Una red eléctrica descapitalizada, con muchos años de explotación, alimentada por dos fuentes de energía desde la Central termoeléctrica (RENTE), con grandes pérdidas en líneas y en transformación.
- La red eléctrica soterrada actual presenta una gran problemática desde el punto de vista técnico y medioambiental ya que su Imagen industrial está muy deteriorada debido a la cantidad de desechos contaminantes que se encuentran dentro de las canales, erosión de los suelos en sus alrededores, etc.
- Imposibilidad de realizar nuevas redes soterradas primarias (nuevos circuitos) por las características defectuosas que presenta actualmente casi todo el trazado.

1.3. Descripción general del proceso productivo de la refinería

La Refinería “Hnos. Díaz” está diseñada para procesar Petróleo Crudo de importación o mezclado con Crudo Nacional, con la finalidad de obtener los siguientes productos: Petróleo Combustible, Diesel, Kerosene, Turbo Combustible, Nafta pesada, Nafta Ligera, Gasolina, Gas Licuado y Gas Combustible.

Para la obtención de estos productos se utilizan diferentes unidades. La Unidad de Destilación Atmosférica es la encargada de fraccionar el petróleo crudo, en la Columna de Destilación Atmosférica, después de ser este precalentado en el Horno F-101.

Todos los productos antes mencionados se extraen de la torre atmosférica y antes de enviarse a los tanques de almacenaje se les extrae el calor a través de

intercambiadores de calor, aprovechando gran parte del calor residual para precalentar el inyectado a los Hornos.

El fondo de la torre atmosférica es procesado en la Unidad de Vacío, donde se fracciona nuevamente en la columna de Destilación al Vacío para extraer Diesel de Vacío (VGO) y fue lextapesado; el VGO se utiliza como materia prima en el Cracking de la Refinería Níco López para obtener Gasolina y Diesel y él fue lextapesado se utiliza como combustible en Hornos y Calderas o como materia prima para producir Asfalto.

Los Destilados Medios que son la Kerosene y el Diesel pueden ser utilizados directamente o ser procesado en la unidad desulfuradora, en función del contenido de azufre que contengan. El Turbo Combustible tiene que ser desulfurado debido a ser más riguroso en cuanto a las especificaciones de calidad.

La Nafta puede utilizarse para la exportación o utilizarse como materia prima para la producción de Gasolina en la Unidad de Reformación Catalítica.

La Nafta Ligera se procesa en un Bloque de Estabilización para obtener el Gas Licuado y el Gas Combustible es un subproducto que se aprovecha como combustible en Hornos y Calderas, de no ser así puede utilizarse como mezcla con las gasolinas.

Todos los productos después de alcanzar la temperatura especificada son almacenados en el Área de Tanques, donde una vez certificada la calidad son comercializados.

La Refinería dispone además de una unidad de Facilidades Auxiliares donde se produce el vapor necesario para todas las actividades productivas o el aire de necesario para el proceso productivo.

1.4. Breve descripción del esquema eléctrico actual

El suministro eléctrico de la refinería de petróleo “Hermanos Díaz”, consta de dos transformadores trifásicos. Las características principales de estos son las siguientes:

- 1T - Transformador, trifásico (TDH-16000/110-75 T1). Capacidad 16 MVA, Conexión Y/ Δ , 110/6,3 kV.
- 2T - Transformador, trifásico (TDH-16000/110-75 T1). Capacidad 16 MVA, Conexión Y/ Δ , 110/6,3 kV.

Estos, operan independientes en régimen normal, al igual que las barras KPY-6 kV, las secciones de las barras a 440 V, de las KTP y de las WCY.

Las unidades o empresas que toman energía de los transformadores que se encuentran en la Subestación Principal Reductora (SPR) son: Refinación, Facilidades auxiliares, Empresa de mantenimiento, Servicios de refinería, Empresa de GEOSER, Empresa Distribuidora, Cuba – Lub.

Al desaparecer la tensión en una de las dos barras denominadas KPY-6 kV, se desconectará automáticamente el interruptor de entrada y se efectuará el cierre del interruptor de sección (transferencia automática de alimentación).

Los consumidores más importantes (primera categoría), cuentan con una tercera fuente de alimentación para casos de emergencias (turbogenerador con tensión 440 V). Los consumidores eléctricos principales son: motores eléctricos de las bombas, ventiladores, aspiradores de humo, válvulas eléctricas, aparatos de enfriamiento por aire, deshidratadores eléctricos, alumbrado eléctrico e instrumentos de control y automatización.

En cuanto a la seguridad del suministro eléctrico, todos los consumidores eléctricos de la planta pertenecen a la primera y segunda categoría.

Los circuitos operativos KPY-6 de alimentación de los bloqueos tecnológicos, alumbrado de emergencia de salas de control y luces aéreas de protección pertenecen a un grupo particular de la primera categoría.

Los materiales empleados en las instalaciones exteriores son todos a prueba de explosión. Todos los materiales, equipos eléctricos y cables son tropicalizados.

1.5 Situación ambiental actual relacionada con el sistema eléctrico

La explotación de estas subestaciones y de las redes eléctricas que las integran se inicia en el año 1980 por lo que tienen algo más de 30 años de explotación ininterrumpida con el consiguiente grado de desgaste. Lo anterior, unido a la falta de un mantenimiento adecuado y oportuno por carencia de recursos materiales y financieros, así como las condiciones de operación a las que están sometidas estas instalaciones, hacen que se encuentren fuera de servicio una parte importante de estas, disminuyendo significativamente la confiabilidad, seguridad y flexibilidad de las mismas.

Se hace inaplazable la modernización del equipamiento actual con tecnología obsoleta y elevado grado de desgaste, para garantizar un eficiente y seguro funcionamiento del sistema; esta modernización abarca la Subestación Principal Reductora (SPR) e instalaciones de suministro eléctrico desde esta hasta los diferentes Centros de Carga de 6 kV, incluyendo la modernización de estos últimos.

Los transformadores existentes poseen una sustancia dentro del aceite llamada BPCs o sovtol-10 el cual es un compuesto orgánico polihalogenado con alto grado de toxicidad, dañino para la salud humana y para el medio ambiente.

Las canales de cables soterradas se encuentran en muy mal estado, encontrándose en ellas residuos sólidos de diferentes características arrastrado por las aguas pluviales, además de existir derrames de petróleo en su cercanía el cual también deja su huella en el deterioro del aislamiento de los conductores, donde la penetración de los gases es la principal preocupación ya que en el año 2003 ocurrió una explosión que originó grandes daños a la instalación y al equipamiento instalado, sin causar pérdida humana. Véase fotos del estado de canales en anexos¹.

El aislamiento eléctrico de los conductores se degrada con el tiempo, pero si existen agentes contaminantes que lo afecten, este se deteriora con mayor rapidez.

CAPÍTULO 2. DIAGNÓSTICO TECNOLÓGICO Y ESTUDIO DE FACTIBILIDAD EN EL SISTEMA ELÉCTRICO DE LA REFINERÍA "HERMANOS DÍAZ"

2.1. Introducción.

La búsqueda de fiabilidad, rentabilidad, optimización o mejora de eficiencia, es hoy en día y cada vez más, objeto de investigaciones y preocupación para la industria. A causa del aumento de los costes globales y de las restricciones medioambientales, las empresas han de lograr producir sus productos afectando lo mínimo posible al medioambiente y reducción al máximo las pérdidas y los costes.

El constante aumento del consumo de energía y la creciente preocupación con respecto a las emisiones de gases de efecto invernadero, da una relevancia a la búsqueda de nuevas estrategias para mejorar la eficiencia de los sistemas de distribución de energía (Romedenne Lagrange, 2008).

La necesidad de aumentar la capacidad de la red, por el sostenido incremento de la demanda, y relajar las restricciones sobre la configuración de la red, los cables de última generación (VOLTAINÉ) es una alternativa a considerar como una eficiente forma de distribución de la energía eléctrica.

2.2. Niveles de tensión y frecuencia de las redes de medio y bajo voltaje

- Redes de media tensión: 6000 V
- Redes de fuerza de baja tensión: 440 V con neutro aislado.
- Redes de alumbrado: 440/220-127 V, con neutro puesto a tierra.
- Frecuencia de la corriente alterna 60 Hz.

Subestaciones

En calidad de los dispositivos de distribución 6 kV son tomados los dispositivos de distribución completos denominados por proyecto rusokPY2-6-20T3. Las subestaciones de transformadores 6/0,44 kV son tipo completas КТП-MT. Los transformadores contienen aceite aislante no combustible. Los dispositivos de arranque y protección de

440 V se ubican sobre los paneles de grandes bloques de control (WCY). Con el fin de elevar la seguridad de la explotación en cuanto al peligro de explosión e incendios, los pisos en la subestación se levantan a la cota de +1,2 m y el fondo de los canales de cables a la cota de +0,00m, es decir, que sean más altas que la cota del terreno adyacente.

Redes de alimentación y distribución

Los conductores de fuerza y control son de alma de cobre, con aislamiento a base de papel impregnado en aceite, con cubierta protectora de plomo y capa de PVC. Los conductores principales a 6 kV, desde la subestación principal reductora hasta los transformadores de centro de carga se encuentran soterrados.

2.3. Deterioro del aislamiento de los conductores

Los conductores eléctricos son a la vida de una sociedad moderna, lo que los vasos sanguíneos son a la vida de un individuo: sin ellos la civilización actual no podría existir.

La variedad de conductores eléctricos diferentes que se emplean es enorme y son utilizados para el transporte, distribución y uso de la energía eléctrica.

Los conductores eléctricos se clasifican por su función primordial en:

- Cables de energía
- Cables de comunicación
- Cables para señalización
- Alambre magneto

Los cables de energía tienen como función primordial transportar la misma desde las fuentes de generación hasta los puntos de consumo, donde la energía pueden ser transformada para su utilización en luz, calor, movimiento, etc.(CONDUMEX, 2012).

Existen cinco causas básicas para la degradación del aislamiento de los conductores, la fatiga eléctrica, fatiga mecánica, fatiga térmica, los ataques químicos y la contaminación

ambiental. Estas interactúan entre si y ocasionan un espiral gradual de declinación en la calidad del aislamiento.

Dentro de los problemas más visibles que afectan a los conductores y que están dentro de las cinco causas se encuentran: las sobretensiones y las bajas tensiones; los daños mecánicos que ocurren por paros, arranque frecuentes y la vibración resultante al operar la máquina; la afectación por vapores corrosivos, la suciedad, los derrames de petróleo y de aceites, todos ellos reducen la efectividad del aislamiento. La mayoría de las maquinarias del proceso productivo están diseñadas para trabajar en régimen permanente, al arrancar o parar varias veces una maquinaria se incurre en fatiga térmica y por otra parte, la contaminación ambiental que existe en la refinería alcanza una multitud de agentes que van desde la humedad, agentes químicos, polvo, agua, etc.; que provoca la ruptura y en muchos casos cortocircuitos. (Jones *et al.*, 2002)

Líneas eléctricas

Las líneas eléctricas aéreas están en mal estado (incluyendo los postes) y cercanas a los accesos por donde cruzan con bastantes frecuencias los trabajadores, estas son las fuentes más comunes de campos electromagnéticos las cuales generan un impacto negativo sobre el aire y la salud humana.

A continuación relacionaremos algunas de las averías más significativas que han ocurrido en los últimos meses y como está el estado técnico de las instalaciones, los equipos y materiales eléctricos.

- ✓ Barra fuera de servicio.

En la Sección #2, los paneles desde el 22 hasta el 36 (de números pares) de la sala de 6 kV de la Subestación Principal Reductora (Título 43) están fuera de servicios producto a un incendio en una de las celdas de la sección 2.

- ✓ Interruptores de 6 kV fuera de servicio.

En la Sección #2, los Interruptores correspondientes a los paneles desde el 22 hasta el 36 están fuera de servicio producto a una avería producida en una línea de proceso.

✓ Líneas fuera de servicio alimentadas por la SPR- Título 43.

Todas las líneas que a continuación se relacionan están fuera de servicio producto a que existe mella (ponche) en su aislamiento, dado fundamentalmente por la presencia de agentes contaminantes permanentes alrededor de estos, presencia de roedores, lo que han provocado constantes cortocircuitos y calentamiento excesivos.

- Una línea de alimentación del título 44 (Panel 29)
- Dos línea de alimentación del título 6 (Panel 21 y Panel 24)
- Dos línea de alimentación del título 17 (Panel 17 y Panel 22)
- Una línea de alimentación del título 5 (Panel 28)

✓ Líneas fuera de servicio que alimentan las subestaciones intermedias o centros de carga.

Estas líneas están fuera de servicio producto al calentamiento por sobrecarga, lo que trajo consigo ponche en el aislamiento.

- Una línea desde el título 6 hasta el título 40
- Una línea desde el título 44 hasta el título 56

✓ Estado Técnico de Líneas y equipos fundamentales alimentados a 6 kV.

El estado técnico de algunas líneas y equipos fundamentales están en un alto grado de deterioro, provocando el calentamiento de las mismas y que con frecuencia ocurran disparos en los interruptores que las gobiernan. En la tabla 2.1 y 2.2 se reflejan las líneas principales que van desde la SPR y alimentan las diferentes subestaciones reductoras (SR) dañadas por la acción del medio y por la falta de mantenimiento planificado (MP).

Tabla 2.1. Líneas dañadas por la acción del medio y la falta de mantenimiento planificado (MP)

Nº	Desde SPR	Hasta SR	Comentario
1	Título 43	Título 4	Una línea de 3x70mm ² dañada
2	Título 43	Título 5	Una línea de 3x70 mm ² dañada
3	Título 43	Título 6	Dos líneas de 3x150 mm ² dañadas
4	Título 43	Título 17	Dos líneas de 3x70 mm ² dañadas
5	Título 43	Título 2	Una línea de 3x120 mm ² dañada
6	Título 43	Título 31	Una línea de 3x120 mm ² fuera de servicio
7	Título 43	Título 42	Una línea de 3x70 mm ² fuera de servicio
8	Título 43	Motor P-1	Línea de 3x35 mm ² dañada
9	Título 6	Título 40	Una línea de 3x70 mm ² dañada
10	Título 44	Título 56	Una línea de 3x70 mm ² dañada

Tabla 2.2. Equipamiento dañado por la acción del medio y la falta de MP

Nº	Equipo	Lugar	Comentario
1	Transformador 1600 kVA	Título 4	Dañado
2	Motor C-302	Título 6	Dañado
3	Motor P-1	Título 23	Dañado

Se ha podido apreciar que son cuantiosos los daños que sufre el sistema eléctrico interno de la refinería producto de los desechos contaminantes, que sobre el medio ambiente se producen con el proceso tecnológico.

Se dice que hay impacto ambiental cuando una acción o actividad produce una alteración, favorable o desfavorable, en el medio o en alguno de los componentes del medio.

Las líneas de distribución eléctrica son instalaciones lineales que afectan los recursos naturales y socioculturales. En general, mientras más larga sea la línea, mayores serán los impactos ambientales sobre los recursos naturales, sociales y culturales (Gallipoliti, 2011). Estas generan impactos ambientales que hoy día ya pueden cuantificarse según se expone a continuación.

2.4. Impactos ambientales potenciales generados por las líneas eléctricas soterradas

Construir una línea eléctrica no es nada sencillo. Tiene un gran trabajo de ingeniería, que busca la solución más adecuada técnica, ambiental y socialmente.

En determinadas ocasiones, cuando las líneas eléctricas de media tensión pasan por zonas urbanas o industrias o cuando las condiciones técnicas lo aconsejan, estas pueden ser soterradas.

Las líneas de media tensión soterradas se pueden instalar bajo el terreno en tres tipos de canalizaciones: directamente enterrados en zanjas, en tubo de polietileno rodeados de hormigón y, en casos especiales, en una galería. El soterramiento de las líneas de media tensión en entornos naturales supone un incremento del impacto ambiental en comparación con una línea aérea, además de las dificultades técnicas y el aumento del tiempo y del coste de ejecución (BCN, 2012).

En el aspecto metodológico se analiza la totalidad de los impactos que la construcción de líneas eléctricas soterradas ocasiona sobre los factores del medio físico y natural. Por ello, se le ha considerado en este trabajo para analizar el impacto ambiental que su construcción y operación pueden ocasionar sobre los distintos factores del ambiente (agua, suelo, aire, vegetación, fauna, entre otros).

Durante las distintas etapas de la construcción de una línea eléctrica soterrada se generan básicamente impactos de transformación de áreas, es decir, se modifican aspectos morfológicos del relieve, estructura y conformación de las capas subterráneas,

uso y calidad del suelo, distribución de flora y fauna y la calidad del aire fundamentalmente(Canga, 2009).

De manera particular y en relación con los elementos ambientales afectados se destaca lo siguiente:

La calidad del agua puede verse afectada durante las etapas de construcción y de operación. En la primera, los principales parámetros que pueden modificarse son los sólidos disueltos y en suspensión y los nutrientes (debido a los movimientos de tierra) así como las grasas e hidrocarburos (por vertidos accidentales en las zonas de almacenamiento y maquinaria pesada). Durante la etapa de operación los principales contaminantes son los derivados de la deposición de las emisiones atmosféricas, principalmente partículas polvo en suspensión y sedimentable.

Estas también influyen de forma negativa en la erosión de los suelos, la desestabilización de taludes, generación de residuos sólidos y materia inerte y en la remoción de la cobertura vegetal(Pérez *et al.*, 2004).

2.5. Impactos ambientales potenciales generados por las líneas áreas

Los impactos ambientales negativos de las líneas de transmisión son causados por la construcción, operación y mantenimiento de las mismas.

Las causas principales de los impactos que se relacionan con la construcción del sistema incluyen las siguientes: el desbroce de la vegetación de los sitios, los derechos de vía, la construcción de los caminos de acceso, los cimientos de las bases y las subestaciones.

La operación y mantenimiento de la línea de distribución incluye el control químico o mecánico de la vegetación dentro del derecho de vía y, en cuanto, a la reparación y mantenimiento de la línea. Estas actividades, más la presencia física de la línea misma, pueden causar impactos ambientales(Gallipoliti, 2011).

Las redes de distribución eléctrica y además los aparatos eléctricos son las fuentes más comunes de campos electromagnéticos del entorno cotidiano (IBERDROLA, 2010).

2.6. Estudio de las variantes a utilizar

La realización del estudio de las variantes a proponer se realiza mediante las búsquedas de informaciones y datos necesarios para evaluar la red eléctrica soterrada existente. Entre ellos el diagrama monolineal general actual de la refinería y los diagramas monolineales de cada una de las subestaciones reductoras, los cuales brindan las informaciones necesarias para conocer los resultados obtenidos en la instalación existente en cuanto a capacidad y diámetro de los conductores. En la tabla 2.4 se muestra las características de cargas máximas de diseños por cada Centro de Distribución y la designación dada por los especialistas de Rusia en el proyecto original.

Tabla 2.4 Cargas Máximas de diseño por Centros de Distribución

Nº	Centro de Carga		Pmáx [kW]	Qmáx [kVAR]	Cos φ
	T□-17		708	207	0,96
1	P□-6	Título 6	1986	852	0,92
	T□-6	Asfalto	903,3	253,8	0,96
	T□-40	Estación frigorífica	481,5	293,4	0,85
	T□-59	Subestación	800	400	0,89
2	P□-31		1465,9	732,2	0,894
	T□-31	Dispacher	729,5	386,1	
	T□-3	Azúfre	296,4	86,5	0,96
	T□-19	Casa de Bombas 2	440	259,6	0,86
3	P□-2				
	T□-2	Combinada 2	3768	2274,8	0,86
	T□-1	Combinada 1	205	110,8	0,88
4	P□-56		886,9	500	0,87
	T□-56	Subestación	545,4	297,8	0,88
	T□-20	Casa de Bombas 3	440	259,6	0,78
	T□-35	Bomba Contra Incendio	535	274	0,89
5	P□-44	Muelle 1	2105	1125	0,88
	T□-44	Separador de Aceite	1452	705	0,9
	P□-56	Subestación	886,9	500	0,87
6	T□-42	Subestación	822,4	516,5	0,85
7	T□-4	Hidrógeno	1097	242	0,98
8	T□-5	Nitrógeno	978,1	301	0,96
9	T□-23	Bomba de Agua de Enfriamiento	430	277,78	0,84
10		Combinado de Lubricantes	4360,1	1629	0,94
11	T□-43	SPR	14391	5286	0,94

Se conoce además los índices de consumo, los costos promedio y el costo total de la energía en la refinería en los años 2012 y 2013, los cuales están reflejados en la tabla 2.5 y 2.6.

Tabla 2.5 Datos eléctricos de consumo 2012 - 2013

Mes	Año 2012			Año 2013		
	Consumo	Costo Promedio	Costo total	Consumo	Costo Promedio	Costo total
	MW-h	\$/MW-h	Facturado (\$)	MW-h	\$/MW-h	Facturado (\$)
enero	1173	0,99	116738	1097	0,122	133934
febrero	2132	0,77	163126	1697	0,115	194647
marzo	2504	0,69	172897	2447	0,113	274626
abril	2447	0,69	169614	2281	0,118	277681
mayo	2412	0,78	187012	1898	0,119	225135
junio	1159	0,86	100200	763	0,129	98045
julio	1813	0,8	144670	1772	0,113	200029
agosto	2010	0,9	180715	1974	0,12	235913
septiembre	2090	0,9	188609	1982	0,124	244860
octubre	2193	0,8	176807	1856	0,116	214506
noviembre	1621	0,9	145794	1589	0,118	187502
diciembre	1701	0,88	149820	1879	0,117	219843

Se conoce además que la alimentación hasta los centros de distribución o carga se realizó con multiconductores de cobre de tres vías tipo BBI, 10kV máx., con aislamiento a base de papel impregnado en aceite, con cubierta protectora de plomo y capa de PVC.

- (tít. 2): 23x185 mm²)
- (tít. 6): (3x150 mm²)
- (tít. 31): (3x120 mm²)
- (tít. 44): (3x150 mm²)

Con los datos obtenidos y la situación crítica que presentan las canales de cables soterradas se propone para el estudio dos variantes del trazado de las redes eléctricas desde la subestación principal hasta los centros de distribución o subestaciones secundarias.

- Variante I. La traza de la red de distribución aérea mediante bandejas soportadas a través de una estacadas tecnológica que se fabricará para este fin, la cual no sigue la traza de la existente, sino que busca nuevas trazas, tratando de ser lo más racional y económico posible.
- Variante II. La traza de la red de distribución soterrada a través de canales seguirá la misma traza existente, para lo que se necesita un trabajo de levantamiento y desmantelamiento de la existente, para tender tuberías plásticas de PVC y embeberla en hormigón.

Se realizó el levantamiento eléctrico de todas las cargas que corresponden a cada Centro de Distribución (CD), se calcularon las pérdidas de energía por los conductores de alimentación de los CD:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}U} \quad (1.1)$$

$$S_c = \frac{I}{J_{ec}} \quad (1.2)$$

$$P = I^2 RL \quad (1.3)$$

$$E = 3 \cdot I^2 R \cdot L \cdot 24 \cdot 365 \quad (1.4)$$

I: Corriente (A)

S: Potencia aparente (kW)

S_c : Sección de los conductores (mm²)

J_{ec} : Densidad económica = 1.8

P: Pérdidas de potencia (kW)

R: Resistencia (ohm/Km)

L: Longitud del conductor (Km)

Obteniendo los resultados deseados, según se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 2.6 Levantamiento eléctrico de todas las cargas que corresponden a cada centro de distribución.

	Sección (mm ²)	Corriente (A)	Resistencia (ohm/Km)	Longitud (Km)	Pérdidas potencia (kW)	Variación de Energía (kWh/año)
Título 44	120	96.22	0.46	0.7	2.98	78314.4
Título 6	120	181.86	0.46	0.88	7.85	206298
Título 56	35	60.62	0.85	0.21	0.65	17082
Título 2	120	192.45	0.27	0.47	1.45	38106
Título 4	70	96.22	0.46	0.61	2.59	68065.2
Título 11	35	60.62	0.85	0.61	1.90	49932
Título 5	70	96.22	0.46	0.85	3.61	94870.8
Título 42	70	96.22	0.46	0.2	0.85	22338
Título 31	95	156.84	0.33	0.61	4.95	130086
CUBALUB	120	288.67	0.17	0.88	12.46	327448.8

En los casos de las líneas de los CMDT (Título 44, Título 6 y CUBALUB) las secciones calculadas son superiores a la de diseño, por lo que va a existir un ahorro de energía en estas líneas por procesos resistivos menores. Donde en su mayoría las secciones de los conductores coinciden con la de diseño, según se muestra en la siguiente tabla:

Utilizando la ecuación (1.2) se obtuvo:

Tabla 2.7 Secciones de los conductores calculada y de diseño.

CMDT	Sección de diseño (mm ²)	Sección Calculada (mm ²)
Titulo 44	95	120
Titulo 6	120	120
Título 56	35	35
Título 2	120	120
Título 4	70	70
Título 11	35	35
Título 5	70	70
Título 42	70	70
Título 31	95	70
CUBALUB	120	185

Se buscó el tipo de conductor apropiado para este tipo de ambiente y sus características eléctricas.

Para la selección del conductor se tienen en cuenta todos los parámetros necesarios según el tipo de voltaje a utilizar y las características del sistema de suministro con el apoyo del catálogo de cables para media tensión, en el cual se transcribe parte del contenido de la norma UNE 21127: "Tensiones normales" donde se muestra que por encima de los 1000 V de tensión nominal, se establecen tres categorías de tensión.

En general tenemos más o menos claro que los cables tienen una intensidad máxima admisible en régimen permanente y se conocen las tablas en las que deben consultarse los valores para cada sección de cable. Suele haber más dudas sobre la tensión máxima admisible en los cables en régimen permanente.

Suele ser menos necesario la tensión máxima porque en general los valores nominales son superiores a las tensiones de la instalación pero es conveniente saber qué valor tope puede soportar cada cable de forma continua, especialmente en redes de MT.

La norma UNE 21127 nos define los valores nominales en corriente alterna (no se recogen valores de continua) asignados a cables a partir de 1 hasta 30 kV

U: tensión nominal eficaz a frecuencia industrial, entre cada conductor y la pantalla o la cubierta, para la que se han diseñado el cable y sus accesorios.

Um: tensión máxima eficaz a frecuencia industrial, entre dos conductores cualquiera, para la que se han diseñado el cable y sus accesorios. Es el valor eficaz más elevado de la tensión que puede ser soportado en condiciones normales de explotación, en cualquier instante y en cualquier punto de la red. Excluye las variaciones temporales de tensión debidas a condiciones de defecto o a la supresión brusca de cargas importantes.

En la tabla 2.8 se muestra la primera categoría de tensión donde se encuentra el nivel de voltaje empleado en este trabajo.

Tabla 2.8 .Tensión nominal y máxima que soportan los cables desde 1 a 30 kV

	Niveles de tensión						
Tensión nominal (U) kV	3	6	10	15	20	25	30
Tensión máxima (Um) kV	3,6	7,2	1,2	17,5	24	30	36

La tensión nominal del cable debe ser apropiada para las condiciones de operación de la red en la que el cable va a ser instalado. Para facilitar la selección del cable las redes de sistemas trifásicos se clasifican en tres categorías (Sistems, 2009):

Categoría A

Comprende aquellos sistemas en los que el conductor de cualquier fase que pueda entrar en contacto con tierra, o con un conductor de tierra, es desconectado del sistema en un tiempo inferior a un minuto.

Categoría B

Comprende las redes que, en caso de defecto, solo funcionan con una fase a tierra durante un tiempo limitado. Este período, para los cables que nos ocupan, suelen ser de una hora y no debe superar en ningún momento las ocho horas. Además la duración total de defectos a tierra durante un año no debe superar las 125 horas.

Categoría C

Comprende todas las redes no incluidas en las categorías A y B.

Por tanto, la elección de la tensión nominal de un cable se efectúa en relación con la duración máxima del eventual funcionamiento con una fase a tierra, prescindiendo de que el sistema sea con neutro a tierra o con neutro aislado.

El sistema de la empresa analizada se clasifica dentro de la categoría B, por lo que le corresponde un sistema de voltaje nominal a 6 kV.

Los cables VOLTANELE seleccionados, de media tensión están concebidos para ser utilizados en el transporte de energía, cualquiera que sea la forma de instalación. En instalaciones aéreas a la intemperie, en comparación con las líneas de conductores desnudos sobre aisladores proporcionan, entre otras ventajas, la supresión del peligro de contactos accidentales, una mayor garantía de continuidad en el servicio, entre otras muchas más aplicaciones que justifican su creciente aceptación (Sistems, 2008).

2.7. Estudio de factibilidad técnico económico (EFTE) realizado

La construcción de una nueva red eléctrica y la reconstrucción de la ya existente exigen inversiones monetarias a las cuales se les denomina inversiones capitales K . Estas inversiones contemplan la compra de los materiales y equipos indispensables, el aseguramiento del transporte de los mismos hasta el lugar de destino, así como su montaje, etc. Las inversiones pueden ser considerables y alcanzar decenas y cientos de millones de pesos.

Sin embargo es bueno saber que los gastos en la red no se limitan solamente a las inversiones capitales. Para garantizar el trabajo seguro de la red es indispensable realizar revisiones periódicas y el mantenimiento de sus elementos

Durante la circulación de la corriente por los elementos de la red (líneas, transformadores, etc.), se producen las pérdidas de energía y para cubrir estas pérdidas, se consume combustibles anualmente. En la compra de este combustible se gastan determinados recursos, por lo que deben ser efectuados algunos gastos generales, que a menudo llamamos costos anuales de explotación C los que pueden alcanzar el orden de los millones de pesos.

Las magnitudes de las inversiones capitales y los costos anuales de explotación dependen de muchos factores: extensión de la red, los voltajes nominales y esquemas elegidos, los equipos utilizados, la ejecución constructiva de los elementos de la red, las condiciones locales, etc.

Los costos anuales de explotación de la red se pueden calcular mediante la siguiente expresión.

$$C = C_L + C_{se} + C_{Ae} \quad (1.5)$$

Donde:

C_L : Costo de explotación de las líneas

C_{se} : Costo de explotación de las subestaciones.

C_{Ae} : gastos para compensar las pérdidas de potencia y de energía eléctrica.

$$C_L = \frac{aL}{100} K_L \quad (1.6)$$

$$C_{se} = \frac{a_{se}}{100} K_{sL} \quad (1.7)$$

Cuando se conoce la magnitud de los costos anuales de explotación C , puede ser determinado su valor específico C_e , referido a la cantidad de energía recibida por los consumidores de la red considerada durante un año E_{an} , es decir:

$$C_e = C / E_{an} \quad (1.8)$$

El estudio prevé las inversiones de modernización del Centro de Distribución de 6 kV, para el sostenimiento de las producciones, y realiza el cálculo de dos variantes de trazas para la alimentación eléctrica desde la Subestación Principal Reductora hasta los Centros de Cargas de 6 kV, antes indicadas.

✓ Incidencia de avería

En octubre del 2003 ocurrió una explosión en las canales de alimentación de motores de la planta producto de una fisura en la pared de la canal de concreto, que permitió la entrada de un escape de gas y en presencia de fallo de un cable se originó una chispa provocando el accidente. Esto originó que se decidiera por parte de la dirección de la refinería llenar de arena las canales de cables para minimizar los riesgos de aparición de otro accidente similar. Esta decisión ciertamente imposibilita la reparación o cambio de cualquier cable averiado dentro de la canal llena de arena.

2.8. Parámetros eléctricos para la evaluación económica

- Nivel de tensión

El nivel de tensión que se utilizará será 6000 Volts, 3 fases, 60 Hz.

- Suministro de energía

El suministro eléctrico hasta los diferentes Cuadros de Distribución de Media Tensión (CDMT) 911 (tít. 2), 912 (tít. 6), 913 (tít. 31), 914 (tít. 56), 915 (tít. 44) y 916 (CUBALUB) se realizará a partir de la Subestación Principal Reductora (SPR) 901 (tít. 43) de 110-6 kV mediante una doble alimentación.

- Cargas eléctricas.

Las cargas eléctricas la constituyen las diferentes subestaciones de transformación (ST) y motores eléctricos alimentados desde cuadros de distribución a un voltaje de 6 kV.

- Fuerza y control

El sistema de fuerza está constituido básicamente por Cuadros de Distribución de Media Tensión (CDMT) y comprende concretamente la alimentación eléctrica a las diferentes subestaciones de transformación (6/0,44 kV), así como la alimentación a los motores que operarán con un voltaje de 6 kV.

Los motores tendrán una protección individual por relé del tipo UR M-60 con contactor magnético al vacío.

Los alimentadores tendrán una protección individual por relé del tipo SR 750.

- Canalizaciones

Variante 1 (aérea):

La distribución eléctrica desde la subestación principal hasta los diferentes centros de carga será aérea y se realizará mediante bandejas de aluminio de varios niveles de 450x100 mm, las cuales irán a través de estacadas tecnológicas diseñadas para tales efectos.

Variante 2 (soterrada):

La distribución eléctrica desde la subestación principal hasta los diferentes centros de carga será soterrada aprovechando las trazas existentes y se realizará mediante conduit de PVC de 4" embebidos en hormigón, por lo que se considerará el trabajo de desmantelamiento de la traza existente.

- Cables y conductores

La alimentación hasta los centros de carga se realizará con multiconductores de cobre de tres vías tipo HM, 10kV máx., aislamiento XLPE, armadura engargolada de aluminio,

cubierta semiconductor tejida, cubierta exterior de PVC, de color rojo, similar a VOLTAINE 10kV_{máx.}

- 911-CDMT (tít. 2): (3x185 mm²)
 - 912-CDMT (tít. 6): (3x150 mm²)
 - 913-CDMT (tít. 31): (3x95 mm²)
 - 915-CDMT (tít. 44): (3x95 mm²)
-
- Aterramiento tecnológico

Se conectarán al sistema de tierra existente en la planta todas las partes metálicas de objetos y equipos (columnas, bandejas metálicas, tuberías metálicas y transformadores) a través de un conductor de cobre trenzado recubierto de PVC de 70 mm².

Debe verificarse, mediante mediciones, el sistema de tierra de las distintas áreas de la refinería.

En la tabla 2.8 se muestran los resultados obtenidos del estudio de factibilidad técnico económico. Para este estudio se utilizaron software de cálculos computacionales y los resultados más significativos se pueden ver en los anexos 2.

Tabla 2.8 Resultados obtenidos del estudio de factibilidad técnico económico (análisis de Variantes)

Parámetros a medir	Variante I área	Variante II soterrada
Tasa de interés	15%	15%
Tasa interna de retorno (TIR)	19,96	16,57
Valor actualizado neto (VAN)	2990	1064
Periodo de recuperación de la inversión (PRI)	2 años 7 meses	6 años 3 meses

Con lo que se puede concluir la viabilidad del proyecto de la Variante I y los beneficios que se obtendrán con su implementación.

2.9. Beneficio ambiental de la modernización

Después de analizada la variante más económica se plasman algunos de los beneficios ambientales más significativos que se obtienen al implementar dicha variante.

- Líneas, canalizaciones y conductores

Con la sustitución de las líneas áreas que existen desde un poste a otro y de las soterradas en fosos de cables con alto grado de contaminación, se elimina el impacto ambiental negativo sobre el aire y sobre la salud humana, al evitar la aparición de un campo eléctrico y magnético que puntualmente perturba el campo electromagnético.

Cada país establece sus propias normas nacionales relativas a los campos electromagnéticos. Sin embargo la mayoría de estas normas nacionales se basan en las recomendaciones de la Comisión Internacional de Protección contra las Radiaciones no Ionizantes (ICNIRP). Ver tabla 2.9 con los límites de exposición.

Tabla 2.9. Límites de exposición recomendados por ICNIRP para frecuencias de 50 y 60Hz

Límites de exposición.	Campo eléctrico. (V/m)	Campo magnético (A/m)
Límites de exposición para la población.	5000	80
Límites de exposición ocupacional.	10 000	400

Se sustituirán las canales de cables soterradas y para ello se pretende realizar una moderna red de distribución aérea mediante estacadas con bandejas, capaz de soportar y conducir los cables de alimentación de 6 kV desde la subestación principal

hacia las demás subestaciones, de forma tal que permita garantizar la estabilidad del suministro eléctrico y reparar de forma rápida y fácil los alimentadores en presencia de falla de los mismos y la selección correcta para la sustitución de los cables existentes por los más idóneos, económica y ecológicamente con lo que eliminarán todos los inconvenientes antes mencionados y la exposición de los trabajadores a los efectos de los campos electromagnéticos producidos por las líneas eléctricas y a las emisiones de CO₂ que estos aportan al medio ambiente.

- Canalizaciones.

Se propone realizar la distribución eléctrica mediante bandejas de aluminio de 600x100 mm y de 300x100 mm, con tapas, utilizando las estacadas tecnológicas existentes e incorporando otras nuevas, aprovechando los espacios vacíos y colocando soportería para su sujeción.

Estas bandejas proporcionan grandes ventajas con su instalación pues:

1. Brindan máxima protección frente a contactos indirectos.
2. Evita los puntos calientes y los arcos eléctricos.
3. Evita las corrientes de fugas.
4. Mínimo mantenimiento.

Las mismas también aportan grandes beneficios en su aplicación tales como:

1. Mayor seguridad eléctrica para las personas.
2. Mayor seguridad para la instalación
3. Ahorro sustancial en el costo de mano de obra y de mantenimiento.

- Conductores

Se propone que todo el cableado para la fuerza y el control se realice con multiconductores VOLTAIN, tipo HM, de cobre, armado, aislamiento XLPE3, armadura engargolada de aluminio o de cobre, cubierta exterior de PVC, teniendo en cuenta los voltajes máximos de aislamiento en dependencia de los niveles de voltaje utilizados,

con número de vías indicados para cada caso, estos son más baratos y especiales para este tipo de ambiente.

Los cables seleccionados proporcionan la máxima seguridad para su instalación y para las personas.

- ✓ No propaga el incendio. Prueba de norma NMX-J-93 (NFC 32-070).
- ✓ Tiene una buena rigidez dieléctrica
- ✓ Bajo factor de pérdidas
- ✓ Excelente resistencia de aislamiento.
- ✓ Mínima emisión de humos densos y oscuros en caso de incendio, facilitando la salida de personas y las labores de rescate y extinción del fuego.
- ✓ Mínima generación de gases tóxicos y corrosivos en caso de incendio, reduciendo el riesgo de intoxicación y los daños a bienes materiales.
- ✓ Son deslizante, por lo que disminuye hasta 5 veces el esfuerzo de jalado en los cables en tubo conduit, facilitando la instalación y evitando daños al aislamiento.
- ✓ Resistente al calor, humedad, aceites, grasas y productos químicos.
- ✓ Pasa la prueba de resistencia a baja temperatura (-25 °C) (UL).
- ✓ Fácil identificación de conductores.
- ✓ La intensidad máxima admisible en servicio permanente en un cable eléctrico aislado está determinada, entre otros parámetros, por la temperatura máxima que el aislamiento del cable puede soportar sin sufrir un deterioro apreciable de su vida útil.

- Sistema eléctrico

Se propone además la remodelación del sistema eléctrico, utilizando todos los materiales a prueba de explosión según los requerimientos y para la designación del equipamiento se utilizaran los criterios de diseños más modernos.

El suministro eléctrico se realiza a partir de la subestación principal de 110-6 kV mediante una doble alimentación hasta las diferentes subestaciones (títulos), es bueno aclarar que se ha estudiado a fondo la distribución actual del sistema eléctrico de la refinería, llegando a la conclusión de que se puede eliminar una o dos subestaciones

que no son necesarias y que conllevan a un ahorro significativo de materiales que se revierte en dinero. Ver diagrama monolineales generales antes y después de la modernización en anexos 2.

De todo lo anteriormente planteado en este capítulo podemos concluir que modernizar las redes de distribución de la refinería, no solo traería consigo un beneficio económico, sino también medio ambiental ya que se erradicarían todos los inconvenientes antes relacionados con respecto a la distribución de energía y al proceso tecnológico.

Para el desarrollo de este trabajo se hizo el análisis de las líneas de Media Tensión en el título 44, teniendo en cuenta su distribución antes y después con la propuesta de remodelación, lo cual nos da una visión de los ahorros económicos y ecológicos que habrá en la refinería toda vez que se analicen cada una de las líneas de distribución de media tensión (MT) que alimentan las demás subestaciones. Ver diagrama monolineal título 44 en anexos 2.

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS ECOLÓGICO Y ECONÓMICO DE LA MODERNIZACIÓN DE LAS LÍNEAS ELÉCTRICAS EN LA REFINERÍA

3.1. Introducción

El gran ahorro económico que puede suponer utilizar secciones de conductores superiores a las obtenidas por criterios técnicos y como además puede contribuir a reducir enormemente las emisiones de CO₂, las desarrollaremos en este capítulo, que para el caso de las líneas de MT se da la circunstancia de que al no ser usual que domine el criterio de la caída de tensión, instalar secciones mayores conlleva una gran recompensa económica.

Dentro de las características generales que hay que tener en cuenta para la elegir un cable de media tensión tenemos:

- Empleo, con indicación del tiempo de permanencia previsto para la instalación
- Condiciones de instalación: fija o móvil
- Tensión de servicio efectiva en voltios (cc, ca, trifásica o monofásica, etc.)
- Número y sección de los conductores, corriente en amperios o datos para su determinación (potencia en kVA, o kW y $\cos \phi$), servicio continuo o intermitente.
- Normas o especificaciones a que el cable debe responder.
- Longitud total necesaria del cable y metraje de cada pieza.
- Diámetro exterior máximo del cable.

Se usará en el análisis tres criterios o métodos para la determinación de la sección del conductor, ellos son:

- Criterio de la sección por intensidad máxima admisible.
- Criterio por sección económica
- Criterio por sección ecológica.

Se aborda cada uno de estos criterios para obtener una mayor información de la selección de los conductores de las líneas.

3.1.1. Criterio de selección por intensidad máxima admisible por calentamiento

La determinación de la sección por intensidad máxima admisible en servicio se realiza según la norma UNE 21-144, "Cálculo de la intensidad admisible en los cables aislados en régimen permanente". La intensidad admisible en un cable para corriente alterna puede deducirse de la expresión que da el calentamiento del conductor por encima de la temperatura ambiente.

Calculada la corriente máxima permanente a transportar y conocidas las condiciones de instalación, la sección se determina mediante la tabla IX bis (Tabla para cables armados, en anexos 3). Esta tabla permite elegir la sección de los conductores en base a la corriente máxima admisible para los diversos valores de tensión de servicio. Se ha tomado en consideración el caso de la instalación al aire donde:

- Temperatura del aire, 40 °C
- Un cable tripolar
- Disposición que consienta una eficaz renovación del aire.

La temperatura máxima de trabajo de los cables VOLTALINE está prevista en 90°C y la temperatura ambiente que rodea al cable ha sido supuesta en 40 °C para la instalación al aire, tal como ya se ha expuesto (Sistemas, 2009).

En el caso de estudio se calculará una aproximación a la intensidades admisibles, se hará a régimen permanente, ya que el cálculo es más sencillo y solo se pretende dar un orden de valores a las pérdidas eléctricas.

En el ejemplo se ha tomado como referencia los cables que deben alimentar la subestación o título 44, la cual posee una potencia instalada (P_{inst}) de 2959 kVA, con voltaje nominal de 6 kV, instalación al aire en bandejas perforadas con una longitud de 0,7 km de línea, circuito único en la canalización. Tiempo de trabajo 8760 horas. Tipo continuo.

$$Intensidad = \frac{P_{instalada} (kW)}{\sqrt{3} \times U}; A \quad (1.9)$$

$$Intensidad = \frac{2959000 (kW)}{\sqrt{3} \times 6000} = 285 A \quad (1.10)$$

Por las características de la instalación y del medio se utilizan cables de cobre, aislado con polietileno reticulado (XLPE), apantallado, con alambre de cobre de 16 mm, armado y con cubierta VEMEX. Ejemplo: Cu VOLTAINE H VEMEX 3x95/16 mm²

3.1.2. Criterio de la selección por sección económica

Se parte del supuesto de que la línea está sometida a un cierto patrón de consumo diario, representando la intensidad en función de las horas del día.

Hay que recordar que la temperatura de un conductor recorrido por una corriente I responde a la fórmula:

$$T = T_{amb} + (T_{max} - T_{amb}) \left(I / I_{max} \right)^2 \quad (1.11)$$

Donde:

T_{amb}: temperatura ambiente de la instalación (estándar de 40 °C para instalaciones al aire)

T_{máx}: temperatura máxima que puede soportar el conductor (90 °C para cables VOLTAINE)

I: intensidad que recorre el conductor

I_{máx}: intensidad máxima que puede recorrer el conductor en las condiciones de la instalación

Una vez calculada la temperatura, se puede obtener la resistencia del cable.

$$RT = R_{20} [1 + \alpha (T - 20)] \quad (1.12)$$

Donde:

RT: valor de la resistencia del conductor en Ω/km

R20: valor de la resistencia del conductor a 20 °C (valor típicamente tabulado).

α : coeficiente de variación de resistencia específica por temperatura del conductor en °C-1 (0,00392 para Cu y 0,00403 para Al)

T: temperatura real del conductor (°C)

Se calcula la energía de pérdida (EP) en la resistencia eléctrica en una línea trifásica por efecto Joule (suponiendo el neutro totalmente descargado), durante un año.

$$EP = \frac{3 \cdot R \cdot I^2 \cdot L \cdot t}{1000} \quad (1.13)$$

R: resistencia en Ω/km

I: intensidad en A

L: longitud de la línea en km

t = tiempo en h

Y el costo de estas pérdidas suponiendo una tarifa media de 0,09 \$/kW.h por:

$$C_{p95} = Ep / \text{año} \times \text{Tarifa media } \$/\text{kWh} = 32544\$ \quad (1.14)$$

En estas condiciones de la tabla IX del catálogo de MT para este tipo de cable se deduce que este conductor puede soportar 300 A. Se acepta que igualmente esta sección responde con suficiencia a la caída de tensión máxima y a las solicitaciones a cortocircuitos que se pueden presentar en la línea. Ver tabla IX en anexos 3

Se supone que la línea está sometida al patrón de consumo diario, representando la intensidad en función de las horas del día. La Figura 3.1 muestra el diagrama diario típico de la carga activa de la refinería, que trabaja con dos turnos.

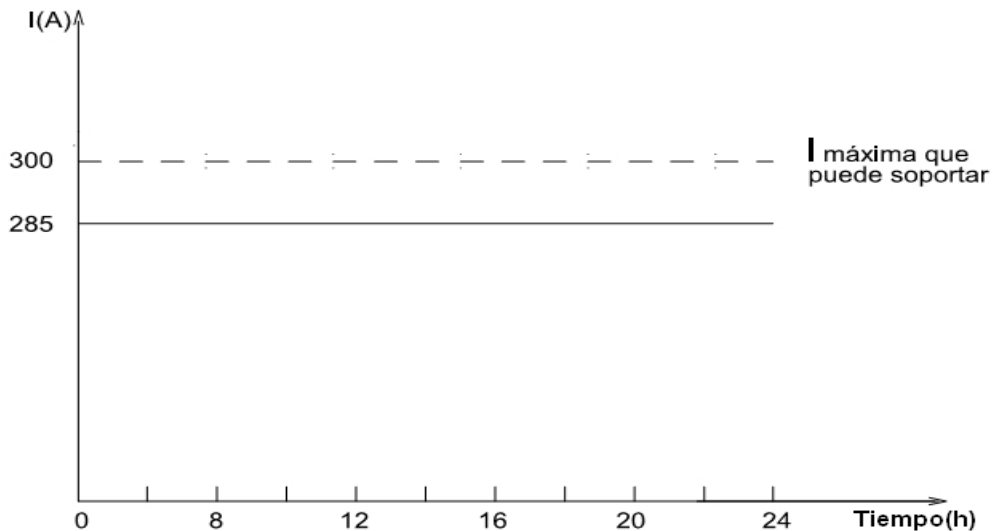


Figura 3.1. Diagrama diario típico de la carga activa.

Se calculan las pérdidas resistivas que hay en el cable considerando la temperatura del conductor para obtener la resistencia del cable cuando es recorrido por 285 A.

Cálculo de la resistencia a la temperatura real del conductor de 95 mm^2 de Cu cuando es recorrido por 285 A, conociendo que la temperatura de un conductor recorrido por una corriente I se puede obtener por la formula (1.11)

Siendo

T_{amb} -temperatura ambiente de la instalación (40°C en nuestro caso)

$T_{\text{máx}}$ -temperatura máxima que puede soportar el conductor (90°C para el Cu)

I ----intensidad que recorre por el cable todo el tiempo de operación (285 A)

$I_{\text{máx}}$ —intensidad máxima que puede recorrer por el cable en las condiciones de instalación (300 A)

$$T_{95} \text{ a } 285 = 40^{\circ}\text{C} + (90^{\circ}\text{C} - 40^{\circ}\text{C})(285 \text{ A}/300 \text{ A}) = 85,1^{\circ}\text{C}$$

Una vez calculada la temperatura del cable durante todo el tiempo de operación, se obtiene la resistencia del cable por la formula (1.12)

Donde:

R_T —Valor de la resistencia del cable en Ω/km

R_{20} -- Valor de la resistencia del cable a 20°C (valor típicamente tabulado. Ver Tabla III Anexos 3)

Al cable de 95 mm^2 de cobre le corresponde una resistencia de $0,193\Omega/\text{km}$

A —Coeficiente de variación de resistencia específica por temperatura del cable en $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ($0,00392\text{Cu}$)

T - temperatura real del cable ($^{\circ}\text{C}$)

$$R_{95} \text{ a } 85,1^{\circ}\text{C} = 0,193 \times (1 + 0,00392 \times (85,1^{\circ}\text{C} - 20)) = 0,24 \Omega/\text{km}$$

Luego se calcula la energía perdida en la línea por efecto joule con cable de 95 mm^2 durante un año por la formula (1.13), donde se parte del supuesto que por la línea circulan 285A durante todo el año.

$$E_{p95} = 3 \times 0,242 \times (285)^2 \times 0,7 \times 24 \times 365 / 1000 = 361\,600 \text{ kWh/año}$$

El costo de estas pérdidas a una tarifa de $0,09 \text{ \$/kW}$ de acuerdo con la fórmula (1.14)

$$C_{p95} = 361\,600 \text{ kWh/año} \times 0,09 \text{ \$/kWh} = 32\,544 \$$$

Para 30 años de vida útil se estima que:

$$C_{p95}=32544\$ \times 30=976320\$$$

Al aumentarla sección del cable se observa un incremento del precio del mismo y un ahorro de energía al tener menores pérdidas resistivas (efecto Joule).

Siguiendo el mismo procedimiento de cálculo que el realizado para el cable de 95 mm² a los cables de 120 a 240 mm², los resultados son los siguientes.

Tabla 3.1. Cálculo de las temperaturas.

Sección	120	150	185	240
Temperatura a 285 °C	75.1	66	60	54

Tabla 3.2. Cálculo de las resistencias según la tabla III del anexo 1.

Temp. Secc.	75.1	66	60	54
120	0.186	0.042	0.176	0.173
150	0.150	0.146	0.143	0.140
185	0.120	0.016	0.114	0.011
240	0.091	0.211	0.087	0.085

Nota: Las resistencias a utilizar son las que están marcadas de color negro oscuro.

Tabla 3.3. La energía que se pierde en la línea por efecto Joule para todos los cables durante un año, cuando circula por ellos a 285 A será:

Resistencia	0.186	0.146	0.114	0.085
Secc.	120	150	185	240
Energía	277924.008	218155.404	170340.521	127008.283
Costo de Pérdidas	25013	19634	15331	11431
Ahorro de Energía	7530	12910	17213	21113
Vida Útil	225924	387300	516400	633397

Por tanto el ahorro de energía (no consumido en la línea) en un año con las nuevas secciones será la diferencia entre lo gastado con la sección de 95 mm² y lo gastado con la sección de mayor diámetro que le supera en el análisis.

En la tabla 3.6 se muestran los resultados obtenidos al aplicar el criterio económico desde la sección de 95 mm² que es la seleccionada por densidad de corrientes y las demás secciones de 120 a 240 mm².

3.1.3. Criterio de la selección por sección ecológica

Ahora que ya existen cifras publicadas sobre las emisiones de CO₂ por kg de cable fabricado podemos cuantificar la importante reducción de las mismas por instalar secciones de cable superiores a las obtenidas por criterios técnicos al reducirse las pérdidas resistivas en los conductores. En la mayoría de los casos esto lleva aparejado un importante ahorro económico como se explica más adelante con un ejemplo (Romedenne Lagrange, 2008).

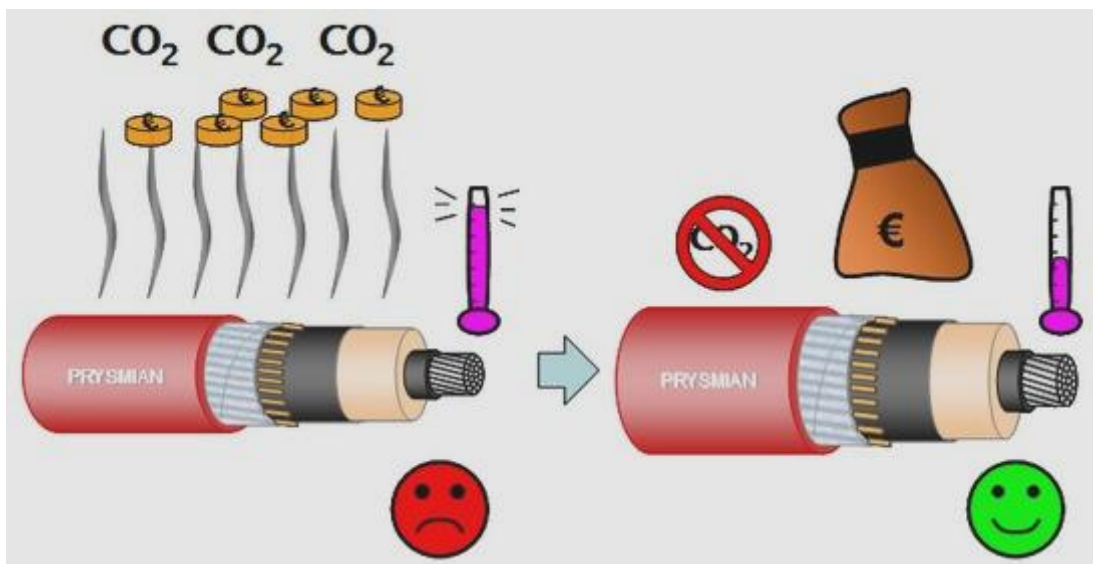


Figura 3.2. Emisiones de CO₂ en función del diámetro del conductor

El Factor de Emisión (FE) de CO₂ de la actividad eléctrica se define por la producción de CO₂ en kilogramos que se genera para producir 1kWh de energía. Recientemente la

Asociación española de fabricante de cables y conductores eléctricos y de fibra óptica (FACEL) ha publicado una tabla con los valores de emisiones de CO₂ por kg de cable fabricado, los cuales se muestran en tabla 3.4

Tabla 3.4. Generación de CO₂ media por cada kW/h eléctrico generado

	kg CO₂ emitidos /kg cable fabricado
Cables de energía de baja tensión con conductor/es de cobre	0,327
Cables de energía de baja y media tensión con conductor/es de aluminio	0,408
Resto de cables de energía y/o cables especiales	0,356
Cables de telecomunicaciones	0,417
Hilos esmaltados	0,585

Toda vez que a estas alturas se tienen disponibles valores de emisiones de CO₂ aproximados por kg de cable de MT de cobre fabricado (datos de FACEL) se puede ver si el aumento de sección es ecológico o no, sin más que comparar la emisiones por la instalación de un cable más pesado frente al ahorro de emisiones por tener menos pérdidas resistivas en la línea.

Con los datos que se disponen ya se consigue poner números a las emisiones por fabricación del cable y por pérdidas resistivas. En este último caso algunas fuentes apuntan a un valor en torno a 0,39 kg CO₂/kWh eléctrico, teniendo en cuenta el costo de la energía nacional.

Al retomar las operaciones realizadas por el método económico, se tiene la energía que se pierde en la línea con cable de 95 mm² y con las demás secciones empleadas en este ejemplo.

$$E_{p95}=361600\text{kWh/año} \times 30 \text{ años}=10848 \ 001 \ \text{kWh}$$

$$E_{p120}=277924 \ \text{kWh/año} \times 30 \text{ años}=8337720 \ \text{kWh}$$

$$E_{p150}=218 \ 155 \ 404 \ \text{kWh/año} \times 30 \text{ años}=6544662\text{kWh}$$

$$E_{p185}=170340,521 \ \text{kWh/año} \times 30 \text{ años}=5110215\text{kWh}$$

$$E_{p240}=127008,283 \ \text{kWh/año} \times 30 \text{ años}=3810248 \ \text{kWh}$$

La diferencia será la energía ahorrada en 30 años:

$$EPA= E_{p95}- E_{p120}=2510281 \ \text{kWh}$$

$$EPA= E_{p95}- E_{p150}=4 \ 303 \ 339 \ \text{kWh}$$

$$EPA= E_{p95}- E_{p185}=5 \ 737 \ 785 \ \text{kWh}$$

$$EPA= E_{p95}- E_{p240}=7 \ 037 \ 753 \ \text{kWh}$$

Con los datos de la tabla 3.4 se puede poner número a las emisiones de CO₂ por pérdidas resistivas en 30 años de vida de la línea.

$$\text{Emisiones CO}_2 \ (95-120)=2510 \ 281\text{kWh} \times 0,356 \ \text{kgCO}_2/\text{kWh}=893 \ 660 \ \text{kgCO}_2$$

$$\text{Emisiones CO}_2 \ (95-150)=4303 \ 339 \ \text{kWh} \times 0,356 \ \text{kgCO}_2/\text{kWh}=1531 \ 988 \ \text{kgCO}_2$$

$$\text{Emisiones CO}_2 \ (95-185) =5 \ 737 \ 785\text{kWh} \times 0,356 \ \text{kgCO}_2/\text{kWh}=2042 \ 651 \ \text{kgCO}_2$$

$$\text{Emisiones CO}_2 \ (95-240)=7 \ 037 \ 753\text{kWh} \times 0,356 \ \text{kgCO}_2/\text{kWh}=2505 \ 440 \ \text{kgCO}_2$$

Con los datos obtenidos del catálogo Prysman para cables de media tensión tenemos:

Tabla 3.5 Peso y diámetro exterior del cable de cobre VOLTAINÉ tipo HM

Sección (mm ²)	Diámetro exterior (mm)	Peso kg/km	Peso para 0.7 km
3x35	48,8	5085	3559
3x50	52,0	5864	4104
3x70	56,5	7075	4900
3x95	60,3	8330	5831
3x120	64,0	9535	6674
3x150	66,7	10620	7434
3x185	71,7	12485	8739
3x240	79,7	16127	11288

Con los datos de la tabla 3.5 se determina el peso del cable que existe en exceso en la línea de 0,7 km del ejemplo para cada tipo de conductor, teniendo en cuenta las fases y el neutro más la protección.

$$\text{Para } 95 \text{ mm}^2 = (4 \times 5831 \text{ kg/km} + 4104 \text{ kg/km}) = 27428 \text{ kg}$$

$$\text{Para } 120 \text{ mm}^2 = (4 \times 6674 \text{ kg/km} + 4104 \text{ kg/km}) = 30800 \text{ kg}$$

$$\text{Para } 150 \text{ mm}^2 = (4 \times 6674 \text{ kg/km} + 4900 \text{ kg/km}) = 31596 \text{ kg}$$

$$\text{Para } 185 \text{ mm}^2 = (4 \times 8739 \text{ kg/km} + 5831 \text{ kg/km}) = 40787 \text{ kg}$$

$$\text{Para } 240 \text{ mm}^2 = (4 \times 11288 \text{ kg/km} + 6674 \text{ kg/km}) = 51826 \text{ kg}$$

Si se compara con las emisiones por fabricación de cables más pesado frente a 95 mm². El cable de MT de cobre supone una emisión de 0,356 kgCO₂/kg cable.

$$\Delta \text{Peso cable}_{120-95} = 30800 - 27428 = 3372 \text{ kg cable}$$

$$\Delta \text{Peso cable}_{150-95} = 31596 - 27428 = 4168 \text{ kg cable}$$

$$\Delta \text{Peso cable}_{185-95} = 40787 - 27428 = 13359 \text{ kg cable}$$

$$\Delta \text{Peso cable}_{240-95} = 51826 - 27428 = 24398 \text{ kg cable}$$

Por lo que las emisiones por fabricación de cable en exceso serán:

$$\text{Emisiones CO}_2 \text{ para } 95 = 27428 \text{ kg cable} \times 0,356 \text{ kgCO}_2/\text{kg cable} = 9\,764,36 \text{ kgCO}_2$$

$$\text{Emisiones CO}_2 \text{ para } 120-95 = 3372 \text{ kg cable} \times 0,356 \text{ kgCO}_2/\text{kg cable} = 1\,200,43 \text{ kgCO}_2$$

$$\text{Emisiones CO}_2 \text{ para } 150-95 = 4168 \text{ kg cable} \times 0,356 \text{ kgCO}_2/\text{kg cable} = 1\,483,8 \text{ kgCO}_2$$

$$\text{Emisiones CO}_2 \text{ para } 185-95 = 13359 \text{ kg cable} \times 0,356 \text{ kgCO}_2/\text{kg cable} = 4\,755,8 \text{ kgCO}_2$$

$$\text{Emisiones CO}_2 \text{ para } 240-95 = 24398 \text{ kg cable} \times 0,356 \text{ kgCO}_2/\text{kg cable} = 8\,685,6 \text{ kgCO}_2$$

Podemos concluir que calculando la corriente admisible que circula normalmente por un conductor y determinando si está es la sección económica o no, se puede calcular la sección más ecológica de las redes eléctricas en un sistema dado.

Tabla 3.6. Resumen por criterio económico

Sección	mm²	1x50	1x70	1x95	1x120	1x150	1x185	1x240
Coste aproximado	\$/m	4,7	6,7	8,6	10,7	13,3	16	21
R a 20 °C (UNE en 60226)	Ω/km			0,193	0,153	0,124	0,00991	0,00754
R con I=285 A	Ω/km			0,242	0,186	0,146	0,114	0,085
Temp.del cable con I=285 A	°C			85,1	75,15	66	60	54
Peso del cable	kg/km		7075	8330	9535	10620	12485	16127
Costo aprox. Línea (3F+N+Protecc.)	\$			27370	33250	41930	50820	66290
Δcosto cable respecto a 95 mm ²	\$			0	5880	8680	8890	15470
Pérdida resistiva (30 años)	kWh			10 848 001	8 337 720	6 544 662	5 110 215	3 810 248
Costo de las pérdidas resistivas (30 años)	\$			976 320	750 394	589 019	459 919	342 922
Ahorro eléctrico respecto sección 95 mm ² (30 años)	\$			0	225 925	387 301	516 401	633 398
Dif. /ahorro eléct. y Δcosto cable respecto a 95 mm ²	\$			0	220 045	378 621	507 511	617 928
Amortiz económ.	años			-	0,78	0,67	0,5	0,73

*neutro igual sección que las fases y conductor de protección, sección mitad.

Como se aprecia la sección económica (185 mm²) reporta 507 511\$ dado que esta es la diferencia entre el ahorro eléctrico y el incremento de coste del cable respecto a la sección de 95 mm².

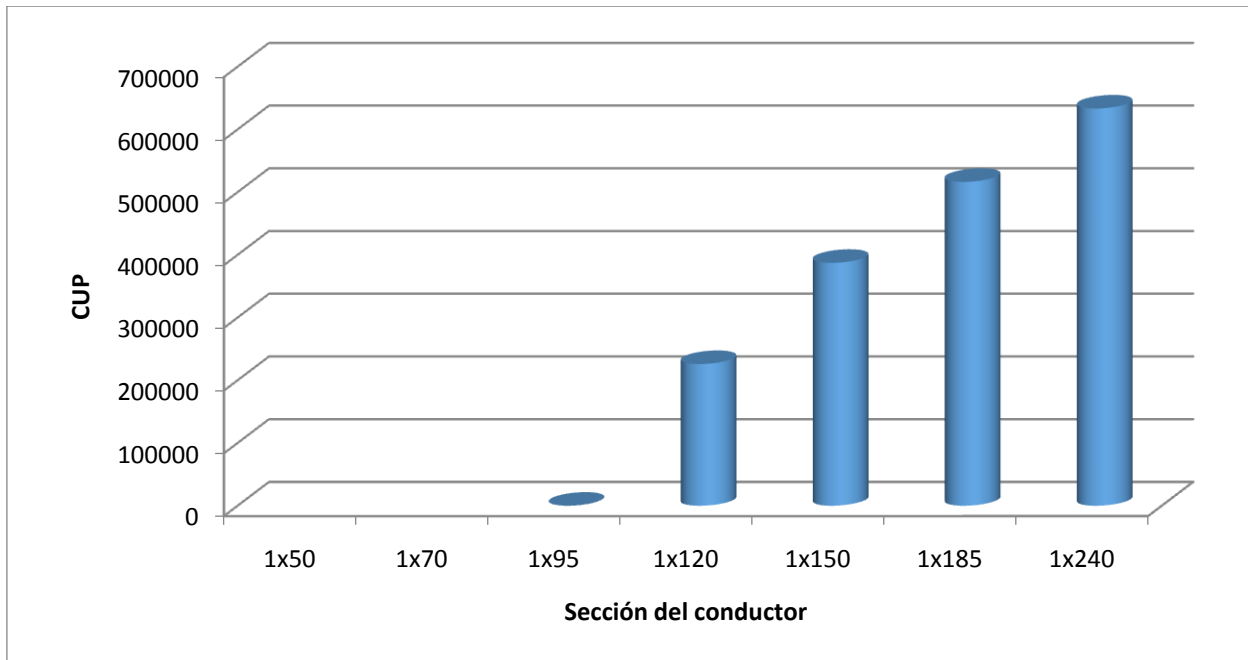


Figura 3.2. Ahorro de energía eléctrica por sección económica.

El plazo de amortización de la sección económica sería:

$$516\,401 \$ / 30 \text{ años} = 17\,213 \$/\text{años}$$

$$8\,890 \$ / 17\,213 \$/\text{año} = 0,5 \text{ años.}$$

Es decir a los cinco meses se ha pagado el incremento de precio del cable de sección de 185 mm² respecto a 95mm² con el ahorro de energía eléctrica no perdida. A partir de ese momento el saldo empieza a ser positivo y se comienza a ver el ahorro que llegará a ser de 507 511 \$ al cabo de los 30 años de vida de la línea.

Tabla 3.7 Resumen por criterio ecológico.

Sección	Diámetro exterior.	Peso	Peso para 0.7 km	Δ Peso cable	CO2 emitidos por fabricación del cable de la línea	CO2 emitidos por pérdidas resistivas (30 Años) respecto a 95 mm ² .	Amortización ecológica.
(mm ²)	(mm)	Kg/km	Kg/km	kg cable	kg	kg	Días
3x35	48,8	5085	3559				
3x50	52,0	5864	4104				
3x70	56,5	7075	4900		0		
3x95	60,3	8330	5831	27428	9764,36	0	
3x120	64	9535	6674	3372	1200,43	86366,25	5,0732
3x150	66,7	10620	7434	4168	1483,8	1531989	0,3535
3x185	71,7	12485	8739	13359	4755,8	2042652	0,8498
3x240	79,7	16127	11288	24398	8685,6	2505440	1,2653

Por lo que las emisiones por fabricación de 13359 kg en exceso, para satisfacer la sección económica de 185 mm² son de 4 755,8 kgCO₂

Por utilizar la sección económica (185 mm²) y no la técnica de 95 mm² se reduce las emisiones de CO₂ 429,5 veces. Por lo que la sección económica se revela como aliada del medio ambiente por las importantes reducciones que se ha podido valorar.

En la figura 3.3 se observa cómo se comporta las reducciones de las emisiones de CO₂ por la fabricación de las diferentes secciones de cables analizadas en el ejemplo.

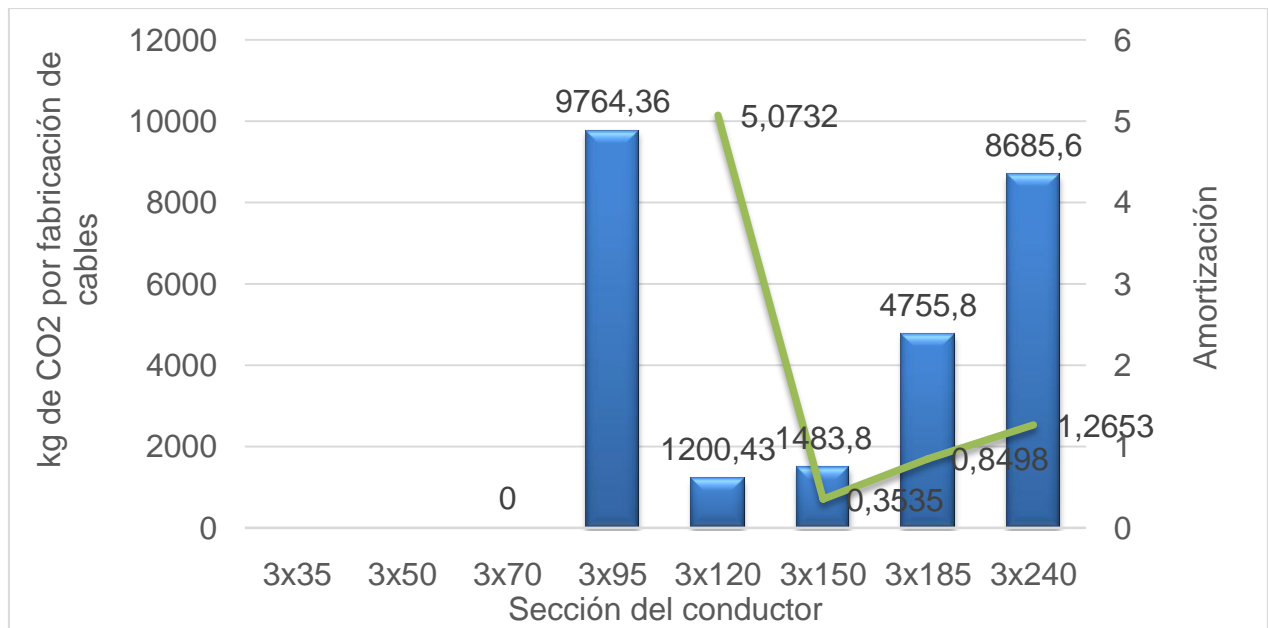


Figura 3.3. Reducción de CO₂ emitidos por fabricación de cada sección del conductor

El plazo de amortización de la sección ecológica es:

CO₂ emitidos por fabricación de cable/CO₂ emitido por pérdidas x 365 días

$$4755,8/2042651,81 \times 365 \text{ días} = 0,84 \text{ días}$$

La “**amortización ecológica**” se logra en tan solo 84 días. Es decir, en 84 días se ha ahorrado tantas emisiones de CO₂ como las que se ha gastado de más por la fabricación del cable de la sección económica 185 mm² frente a la sección técnica de 95 mm². No obstante se puede ver en la tabla de resultados que incluso solo un salto de sección, a 120 mm², conlleva un ahorro económico y a una importante reducción del impacto ambiental.

Por tanto la sección de 1x185 mm² se demuestra no sólo como económicamente mucho más interesante sino también ecológicamente.

En el ejemplo desarrollado no se ha considerado los posibles incrementos de coste de componentes ajenos al cable como conectores, tendidos, bandejas, protecciones, etc., como tampoco se ha considerado el retorno al cabo de los 30 años del interesante valor

residual (chatarra) de la mayor cantidad de cobre utilizada en los cables de sección económica frente a la sección técnica.

Si se cuantifican los beneficios que le reporta a la Refinería “Hermanos Díaz” la sección económica en cada una de sus subestaciones, los resultados le recompensan y además obtendrá otras importantísimas ventajas colaterales como:

1. Mayor vida útil de la línea al ir más descargada
2. Mejor respuesta a fenómenos transitorios
3. Posibilidad de ampliación de potencia sin cambiar el cable
4. Ahorro de emisiones de CO₂ al aire, el contribuyente número uno de los contaminantes del medio ambiente.

CONCLUSIONES

Los agentes contaminantes que emanan de la producción en la refinería Hermanos Díaz, en % superiores a las normas (ENUMERAR), deterioran el aislamiento de los conductores en la red soterrada y como consecuencia originan fallas técnicas en el servicio eléctrico.

El estudio de factibilidad técnico económico y la evaluación económico-medio ambiental de las variantes del suministro eléctrico a la refinería Hermanos Díaz demostró la no coincidencia entre la mejor opción para ambos análisis.

El aumento de sección de los conductores como mejor variante económico-medio ambiental tecnológicamente accesible, permite transmitir la energía con la disminución de pérdidas y la reducción de emisiones de CO₂ y sus efectos nocivos para la salud de la población.

RECOMENDACIONES

Para darle continuidad y extender los resultados logrados con este trabajo se recomienda que:

- Extender la investigación a la red eléctrica de baja y alta tensión de la refinería Hermanos Díaz, ya que este trabajo se desarrolla en media tensión, para determinar las reservas totales teóricas y técnicas del servicio de distribución con mayor integralidad.
- Extender la investigación en la evaluación técnico económico y medio-ambiental a otras esferas de la producción, donde los agentes contaminantes no son precisamente los hidrocarburos y el CO₂.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- BCN. 2012.** Soterramiento de líneas eléctricas. *Biblioteca del Congreso Nacional de Chile*, 25.
- CANGA, J. L. 2009.** Impacto Ambiental de las Redes Eléctricas. *Curso de Verano de la Universidad de Cantabria* [Type of Work], vol. Curso TO 1.1 Ahorro y Eficiencia Energética, pp. 22.
- CARBALLO MOGUEIRA, L. 2005.** La presencia de la concepción de producciones más limpias en la legislación ambiental Cubana. *Dirección Jurídica Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio ambiente. Capitolio nacional*, No 8.
- CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y CONTROL AMBIENTAL. 2004.** Reinspección a la bahía de Santiago de Cuba. *Revista Cubana de Medio Ambiente y Desarrollo*.
- CONDUMEX, G. 2012:** Catálogo de Conductores. In.
- CHALES, G.; E. ALDERETE ROSELL & E. FUENTES QUEVEDO. 2007.** Medidas de producción más limpia en instalaciones petroleras cubanas. *Revista Cubana de Medio Ambiente y Desarrollo*.
- DOMÍNGUEZ ONZÁLEZ, E. J.; M. SOLANO PÉREZ & P. N. BLANCO FIGUEREDO.** Influencia de la contaminación por hidrocarburos de la bahía de Santiago en las crisis de asma bronquial. 2010.
- GALLIPOLITI, V. 2011:** Impactos ambientales derivados de la construcción y operación de líneas de energía eléctrica. In. <http://cegae.unne.edu.ar>.
- GARCÍA MARTÍNEZ, J. 2010:** Impactos ambientales de las líneas e infraestructuras. In *Ecologista en acción*. <http://www.apdr.info>, p. 17.
- IBERDROLA, I. Y. C. 2010.** Estudio de impacto ambiental del proyecto de línea eléctrica Subterránea a 220 kV. *Red Eléctrica de España*, 35.
- JONES, D. O.; J. R. JOWERR; S. GRAEME & D. S. DANNER. 2002:** Guía para prueba de diagnóstico de aislamiento. In S. EDICIÓN. www.Megger.com.
- MARTIATU, L.** Impacto de emisiones estacionarias de refinerías de petróleo Cubanas y posibles soluciones. Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría", CUJAE, 2012.
- MILANÉS, C. 2003.** Análisis de fuente contaminantes a la bahía de Santiago de Cuba. *INFOMES*.
- MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS. 2010:** Norma de cable de energía en redes de distribución. In. <http://subterr/intranet2/minem.gob.pe>.
- NÁPOLES, J.; A. ABALOS; A. MARAÑÓN; I. AGUILERA, et al. 2005.** Caracterización de Suelos de la Refinería "Hermanos Díaz" Impactados con Hidrocarburos. *Revista CENIC Ciencias Químicas*, 36(Especial), 34-39.
- NC-372. 2004.** NC-372.
- OCHOA, P. A. 2007:** *Las producciones más Limpias en la Gestión Empresarial*. Centro de Estudios de Energía y medioambiente, CEEMA.
- PÉREZ, N.; A. MARAÑÓN; R. BERMÚDEZ; I. AGUILERA, et al. 2004.** Caracterización de las aguas residuales de la refinería "Hermanos Díaz". *Revista cubana de química*, xvi(1), 53-60.
- PINO ÁLVAREZ, A. M.; A. FERNÁNDEZ MÁRQUEZ & A. R. LILIANA. 2011.** Servicio Informativo sobre Producción más limpia dirigido al usuario y/o cliente, . *Revista Cubana de Medio Ambiente y Desarrollo*, (Centro Nacional para la Producción Más Limpia. Centro de Información, Gestión y Educación Ambiental).
- REPÚBLICA DOMINICANA. 2007.** Guía ambiental para proyectos de Distribución de energía eléctrica, 92.

- RODRÍGUEZ MATOS, N.2011.** Educación ambiental y desarrollo local. Un binomio de la contemporaneidad. *Revista Cubana de Medio Ambiente y Desarrollo*.
- ROMEDENNE LAGRANGE, O.** Impacto de un cable superconductor sobre la eficiencia enregética de la red eléctrica. Tesis de maestría Universidad Plitécnica de Catalunya, 2008.
- SISTEMS, P. C.2008:** Arquitectura de los cables, datos técnicos. In. <http://www.prysmian.com>.
- SISTEMS, P. C.2009:** Catálogo de cables para media tensión. In. <http://www.prysmian.es>, p. 63-84.
- TIRADO, S.** Cables eléctricos. 2009.
- TURNER, S. E.2007:** Soterrado Eléctrico en el Centro Histórico de Santiago de Cuba. In *Ciencia en su PC*. Revista electrónica MEGACEN, Centro de Información y Gestión Tecnológica de santiago de Cuba, p. 9.
- ZAMORA, E.2010:** Historia de la Industria Petrolera en Cuba. In. www.energia.inf.cu.
- ZUEV, E.1989:** *Fundamentos de Proyección de Redes y Sistemas Eléctricosd*. Editorial IPSJAE: 89 p.

Normas Consultadas

1. NC-27, 1999. "Vertimiento de aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado. Especificaciones".
2. NC-19-01-04, 1980. "Ruido. Requisitos generales higiénicos sanitarios". Establece los requisitos higiénicos sanitarios en cuanto a los aspectos generales de la protección contra el ruido, así como los términos y definiciones y la clasificación de los ruidos.
3. NC-39, 1999. "Calidad del aire. Requisitos higiénicos sanitarios".
4. NC-19-00-04, 1990. "Organización y protección de los trabajadores en materia de protección e higiene del trabajo".
5. NC-93-01-210, 1987. "Requisitos Generales para la protección de las aguas superficiales y subterráneas de la contaminación por petróleo y sus derivados, durante su transportación y almacenamiento".
6. NC-96-02-03, 1987. "Locales o áreas con peligro de explosión o incendio".
7. NC-96-02-18. "Bases de Almacenamiento de petróleo y sus derivados".
8. NC-19-02-23, 1988. Sistema de normas de protección e higiene del trabajo. estaciones compresoras de aire y gases inertes. Requisitos de seguridad.
9. [NC-93-02-203, 1986. Sistema de normas para la protección del medio ambiente. Atmósfera. requisitos generales para el muestreo del aire.](#)

10. [NC-111, 2004. Calidad del aire-reglas para la vigilancia de la calidad del aire en asentamientos humanos.](#)
11. [NC-ISO 4225 2000. Calidad del aire. Aspectos generales. Vocabulario.](#)
12. Regulación de CUPET 08, 1999. Manejo de Fondaje de Tanques de Almacenamiento de Petróleo y sus Derivados.
13. Regulación de CUPET 10, 1999. Gestión de Residuos.
14. Regulación de CUPET 11, 2001. Aspectos fundamentales para la protección de la contaminación debida a los tanques de almacenamiento de petróleo.

Anexo 1

TABLA IX bis

Intensidad máxima admisible (A), en servicio permanente, para cables aislados con XLPE (Vortalene) con armadura.

Sección nominal mm ²	Tensión nominal					
	90 °C 1,8/3 kV a 18/30 kV					
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Conductores de Cu						
10	-	-	-	-	-	-
16	115	105	100	94	100	92
25	150	140	130	120	125	115
35	180	165	155	140	150	140
50	210	200	180	165	180	165
70	265	250	225	200	220	200
95	315	300	260	235	260	235
120	360	340	295	265	295	270
150	405	385	325	295	330	300
185	460	440	360	330	370	340
240	530	510	410	375	425	395
300	600	580	450	410	480	445
400	680	-	495	450	-	-
500	775	-	540	505	-	-
630	885	-	585	545	-	-

DIÁMETROS EXTERIORES Y PESOS DE CABLES VORTALENE

Sección nominal mm ²	Ø ext. mm	Peso kg/km	Ø ext. mm	Peso kg/km	Ø ext. mm	Peso kg/km	Ø ext. mm	Peso kg/km	Ø ext. mm	Peso kg/km
	Tipo H (no armado)		Tipo FA (armado flejes Al)		Tipo MA (armado alambres acero)		Tipo HFA (armado flejes Al)		Tipo HMA (armado alambres acero)	

	Tipo H (no armado)		Tipo HF (armado flejes acero)		Tipo HM (armado alambres acero)	
Tripolares - 6/10 kV (Conductores de cobre)						
3 x 16	35.2	1995	41.0	2830	42.5	3565
3 x 25	37.7	2430	43.5	3320	46.4	4535
3 x 35	40.3	2911	46.1	3850	48.8	5085
3 x 50	43.3	3495	49.3	4520	52.0	5864
3 x 70	47.4	4435	53.8	5595	56.5	7075
3 x 95	51.2	5500	57.6	6750	60.3	8330
3x 120	54.7	6496	61.3	7850	64.0	9535
3x 150	57.4	7445	64.0	8855	66.7	10620
3 x 185	62.2	9005	69.0	10555	71.7	12485
3 x 240	68.8	11415	75.8	13145	79.8	16127
3x 300	73.3	13550	80.5	15420	84.5	18585

DIÁMETROS BAJO AISLAMIENTO DE CABLES VOLTALENE (UNIPOLARES Y TRIPOLARES)

Sección mm ²	d Cuerda mm	d' Semic. int. mm	D sobre aislamiento						
			1,8/3 kV	3,6/6 kV	6/10 kV	8,7/15 kV	12/20 kV	15/25 kV	18/30 kV
Conductor de Cu									
35	7	8	11	13	14,8	17	19	-	-
50	8,3	9,3	12,3	14,3	16,1	18,3	20,3	22,9	25,3
70	9,9	10,9	13,9	15,9	17,7	19,9	21,9	24,5	26,9
95	11,6	12,6	15,6	17,6	19,4	21,6	23,6	26,2	28,6
120	13,1	14,1	17,1	19,1	20,9	23,1	25,1	27,7	30,1
150	14,3	15,3	18,3	20,3	22,1	24,3	26,3	28,9	31,3
185	16	17	20	22	23,8	26	28	30,6	33
240	18,7	20,1	22,7	25,3	26,9	29,1	31,1	33,7	36,1
300	20,6	22	24,6	27,6	28,8	31	33	35,6	38
400	23,1	24,5	27,1	30,5	31,3	33,5	35,5	38,1	40,5
500	26,4	28,4	30,8	34,8	35,2	37,4	39,4	42	44,4

INSTALACIÓN AL AIRE:

1 - Cables instalados al aire en ambiente de temperatura distinta de 40 °C:

COEFICIENTES DE CORRECCIÓN

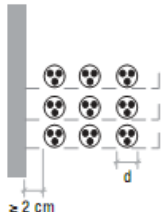
Temperatura de servicio, θ_s , en °C	Temperatura ambiente, θ_a , en °C										
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
105 (Eprotenax Compact)	1,21	1,18	1,14	1,11	1,07	1,04	1	0,96	0,92	0,88	0,83
90 (Volltalene)	1,27	1,23	1,18	1,14	1,10	1,05	1	0,95	0,89	0,84	0,78

2 - Cables instalados al aire en canales o galerías:

Se observa que en ciertas condiciones de instalación (canalizaciones, galerías, etc.) el calor disipado por los cables no puede difundirse libremente y provoca un aumento de la temperatura del aire.

La magnitud de este aumento depende de diversos factores y debe ser determinado en cada caso. Para una valoración aproximada, debe tenerse presente que la sobreelevación de temperatura es del orden de 15 °C. La intensidad admisible en las condiciones de régimen deberá, por lo tanto, reducirse con los coeficientes de la tabla anterior.

3- Coeficiente de corrección de cables trifásicos instalados al aire en canales:

		1	2	3	>3
	1	1,00	0,93	0,87	0,83
	2	0,89	0,83	0,79	0,75
	3	0,80	0,76	0,72	0,69
	>3	0,75	0,70	0,66	0,64

Agrupación de cables trifásicos o ternas de cables unipolares, con una separación inferior a un diámetro y superior a un cuarto de diámetro, suponiendo su instalación sobre bandeja perforada, es decir, de forma que el aire pueda circular libremente entre los cables.

TABLA III
Resistencia eléctrica máxima en corriente continua a 20°C en Ω/km .

Sección nominal mm^2	R máx Ω/km		Sección nominal mm^2	R máx Ω/km	
	Cobre desnudo	Aluminio		Cobre desnudo	Aluminio
10	1.830	-	120	0.153	0.253
16	1.150	1.910	150	0.124	0.206
25	0.727	1.200	185	0.0991	0.164
35	0.524	0.868	240	0.0754	0.125
50	0.387	0.641	300	0.0601	0.100
70	0.268	0.443	400	0.0470	0.0778
95	0.193	0.320	500	0.0366	0.0605

Los valores que figuran en la presente tabla están de acuerdo a la norma UNE EN 60228. Los diámetros de las cuerdas son aproximados.

TABLA VI
Resistencia a la frecuencia de 50 Hz (90 °C)



Sección nominal mm^2	Resistencia máxima en c.a. y a 90 °C en Ω/km			
	Cables Unipolares 		Cables Tripolares 	
	Cu	Al	Cu	Al
10	2.310	-	2.346	-
16	1.455	2.392	1.479	2.431
25	0.918	1.513	0.936	1.542
35	0.663	1.093	0.675	1.112
50	0.490	0.800	0.499	0.822
70	0.339	0.558	0.345	0.568
95	0.245	0.403	0.249	0.410
120	0.195	0.321	0.197	0.324
150	0.159	0.262	0.161	0.265
185	0.127	0.209	0.129	0.212
240	0.098	0.161	0.099	0.163
300	0.078	0.128	-	-
400	0.062	0.102	-	-
500	0.051	0.084	-	-

TABLA VII
Resistencia a la frecuencia de 50 Hz (105 °C)

Sección nominal mm ²	Resistencia máxima en c.a. y a 105 °C en Ω/km			
	Cables Unipolares		Cables Tripolares	
	Cu	Al	Cu	Al
10	2.446	-	2.484	-
16	1.540	2.533	1.566	2.574
25	0.972	1.602	0.991	1.633
35	0.702	1.157	0.715	1.176
50	0.519	0.847	0.528	0.087
70	0.359	0.591	0.365	0.601
95	0.259	0.427	0.264	0.434
120	0.206	0.340	0.209	0.343
150	0.168	0.277	0.170	0.281
185	0.134	0.221	0.137	0.224
240	0.104	0.170	0.105	0.173
300	0.083	0.136	-	-
400	0.066	0.108	-	-
500	0.054	0.089	-	-

Nota: La caída de tensión de la línea para el caso de corriente alterna trifásica, se calcula con la fórmula aproximada: $\Delta U = \sqrt{3} \cdot L \cdot I \cdot (R \cdot \cos \varphi + X \cdot \sin \varphi)$. Donde L , en km, es la longitud de la línea. I , en A, es la intensidad de corriente a transportar. (Se recomienda ver ejemplo de cálculo en la página 26).

TABLA XI
Intensidad de cortocircuito admisible, en amperios, en pantallas constituidas por cintas de cobre de 0,1 mm de espesor.

Diámetro medio de pantalla mm	Duración del cortocircuito, en segundos								
	0,1	0,2	0,3	0,5	1	1,5	2	2,5	3
<13,5	2350	1790	1540	1280	1020	890	820	760	720
13,5 a 27	2930	2240	1920	1600	1270	1120	1020	960	900
>27	4110	3130	2690	2250	1780	1570	1430	1340	1270

Los datos relacionados en esta tabla se han calculado de acuerdo con la Norma IEC 949. Si el cable considerado es trifásico, con las pantallas metálicas en contacto, la intensidad de retorno en un cortocircuito monofásico circularía por las pantallas de los tres conductores. Por ello, la pantalla metálica de cada fase debe ser capaz de soportar un tercio de la intensidad de cortocircuito requerida.