



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

**MODELO DE GESTIÓN ENERGÉTICA PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL CONSUMO DE ENERGÍA EN LA
PLANTA MARIQUITA ECOPETROL S.A.**

John Marlon Salazar Correa

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingenierías, Departamento de Ingeniería Industrial
Manizales, Colombia

2011

**MODELO DE GESTIÓN ENERGÉTICA PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL CONSUMO DE
ENERGÍA EN LA PLANTA MARIQUITA ECOPETROL S.A.**

John Marlon Salazar Correa

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título
de:

Magíster en Ingeniería Industrial

Director:

JOSE SAMUEL RAMIREZ CASTAÑO

Ingeniero Eléctrico, Msc.

Línea de Investigación:

Gestión de la Energía Eléctrica

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Industrial

Manizales, Colombia

2011

*A mis hijos, a mis padres, a todos
aquellos que aportaron su estímulo para
hacer realidad este proyecto... Mi logro
es la victoria concretada gracias a
ustedes.*

Contenido

LISTA DE FIGURAS	6
LISTA DE TABLAS.....	8
RESUMEN	9
ABSTRACT.....	10
JUSTIFICACIÓN.....	11
INTRODUCCIÓN	13
1. CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.	18
1.1 OPERACIÓN REMOTA DE SISTEMAS DE TRANSPORTE POR DUCTOS.	18
1.2 SISTEMA DE TRANSPORTE SALGAR - CARTAGO.	21
1.3 CARACTERÍSTICAS DEL PERFIL TOPOGRÁFICO Y SU INFLUENCIA SOBRE EL TRANSPORTE DE PRODUCTOS REFINADOS POR EL SISTEMA SALGAR – CARTAGO.....	24
1.4 GENERALIDADES OPERACIONALES DE LA PLANTA MARIQUITA.	25
1.5 COMPARATIVOS DE CONSUMOS ENERGÉTICOS CON LAS PLANTAS FRESNO Y HERVEO.....	29
2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.	31
2.1 ETAPA N° 1.	31
2.2 ETAPA N° 2	32
2.3 ETAPA N° 3	32
2.4 ETAPA N° 4	33
2.5 ETAPA N° 5	33
3. RESULTADOS.	35
3.1 DIAGNÓSTICO DE LA OPERACIÓN ACTUAL DEL SISTEMA SALGAR - CARTAGO	35
3.2 COMPARATIVO DE LOS DATOS ASOCIADOS AL CONSUMO ELÉCTRICO DE LA PLANTA MARIQUITA MEDIANTE ANÁLISIS ESTADÍSTICO.	37
3.2.1 <i>Tratamiento de Datos con Pruebas No Paramétricas.</i>	38
3.2.2 <i>Correlación de los Datos.</i>	38
3.3 ALTERNATIVA PROPUESTA PARA ALCANZAR MEJORES PRÁCTICAS EN EFICIENCIA ENERGÉTICA.	41
3.3.1 <i>Retirar actual variador de velocidad y operar con válvula de control.</i>	42
3.3.2 <i>Ventajas</i>	43
3.3.3 <i>Desventajas</i>	43
4. CONCLUSIONES	46
5. RECOMENDACIONES.....	48
6. ANEXOS.....	50
7. BIBLIOGRAFÍA.....	54

Lista de figuras

Figura 1: arquitectura típica del SCADA. Fuente: Pemex (Pág. 18).

Figura 2: Control SCADA unidad eléctrica Planta Mariquita. Fuente: ECOPETROL S.A. (Pág. 19).

Figura 3: Diagrama de líneas del proceso de bombeo Planta Mariquita. Fuente: ECOPETROL S.A. (Pág. 21).

Figura 4: perfil topográfico del sistema Salgar – Cartago. Fuente: Ecopetrol S.A. (Pág. 23).

Figura 5: Unidad de bombeo principal Planta Mariquita. Fuente: Ecopetrol S.A. (Pág.25).

Figuras 6(a) y 6(b): relación de potencia activa y reactiva – producto Biodiesel 2%. Fuente: Ecopetrol S.A (Pág. 26).

Figuras 7(a) y 7(b): relaciones de potencia activa y reactiva – producto Gasolina Motor. Fuente: Ecopetrol S.A. (Pág. 27).

Figura 8: Comparativo de consumo energético Plantas Mariquita y Fresno. Fuente: Elaboración propia. (Pág. 29).

Figura 9: Etapas de la metodología propuesta a través del método científico. Fuente: elaboración propia. (Pág. 30).

Figura 10: diagrama de dispersión para el análisis de correlación entre potencia activa y reactiva. Fuente: SPSS. (Pág. 39).

Figura 11. Diagrama de correlación para las diferentes alternativas. Fuente: SPSS. (Pág. 44)

Lista de tablas

Tabla 1: características físicas de productos refinados. Fuente: Ecopetrol S.A. (Pág. 22).

Tabla 2: prueba de Kolmogorov – Smirnov aplicada a la potencia activa y reactiva. Fuente: SPSS (Pág. 37).

Tabla 3. Coeficientes de correlación de Pearson. Fuente: SPSS (Pág. 37).

Tabla 4: Coeficientes del grado de correlación de Spearman. Fuente: SPSS (Pág. 38).

Tabla 5: Resultados Estudio adelantado por el Departamento de Ingeniería y Confiabilidad de la Vicepresidencia de Transporte. Fuente: Ecopetrol S.A. (Pág. 41).

Tabla 6. Cálculos Hidráulicos para las válvulas con diámetros de cuatro y seis pulgadas, comportamiento con producto Biodiesel. Fuente: Grupo interdisciplinario - Ecopetrol. (Pág. 43).

Resumen

Es una necesidad del grupo empresarial ECOPETROL asegurar el aspecto ambiental orientado a consolidar su imagen, haciendo énfasis en la producción limpia y responsable con el medio ambiente, garantizando la consolidación de ECOPETROL como empresa de reconocimiento en sostenibilidad y estrategia ambiental; en las áreas de la Vicepresidencia de Transporte y más específicamente en la Gerencia de Poliductos, se dispone de varios sistemas de distribución de productos refinados del petróleo (gasolina, biodiesel, otros) a través de ductos o poliductos que requieren de sistemas de bombeo para hacer llegar los productos a las estaciones de distribución o terminales, mayoritariamente haciendo uso de equipos eléctricos y algunos equipos de combustión que demandan un alto consumo energético, que es traducido también en un equivalente de emisiones atmosféricas. Hablando en términos de ecoeficiencia, la empresa requiere plantear alternativas de reducción de consumos en procura de una operación sustentable.

Finalmente esta propuesta busca plantear un modelo de gestión energética para la optimización del consumo de energía, aplicado en las Planta de bombeo de productos refinados ubicada en el municipio de Mariquita, instalación asociada al sistema Salgar – Cartago de la Gerencia de Poliductos, Vicepresidencia de Transporte ECOPETROL. Se realizará con un comparativo del consumo de energía eléctrica bajo el esquema de operación actual, contra el comparativo del consumo en condiciones de operación ideal reflejado en las estrategias de reducción de paros de bombeo por factores operacionales y la programación del transporte de productos refinados por ductos. El impacto final se verá reflejado en la medición de la reducción de los costos de operación y el beneficio ambiental de la reducción del consumo de energía eléctrica, asociado a las emisiones indirectas de Gases de Efecto Invernadero (GEI).

Palabras clave: Poliducto, Bombeo, Optimización, Ecoeficiencia, Refinados, GLP.

Abstract

It is a business group ECOPETROL need to ensure environmental considerations aimed at consolidating its image, emphasizing cleaner production and responsible with the environment by ensuring the consolidation of recognition as a company Ecopetrol in sustainability and environmental strategy, in the areas of Vice President of Transportation and more specifically in the Management of Pipelines, there are several distribution systems refined petroleum products (gasoline, biodiesel, etc.) through pipelines or pipelines that require pumping systems to deliver products to the distribution stations or terminals, mostly making use of electrical equipment and some combustion equipment that require high energy consumption, which is also translated into an equivalent of atmospheric emissions. In terms of eco-efficiency, the company needs to propose alternatives for reducing consumption in pursuit of a sustainable operation. Finally, this proposal seeks to propose a management model to optimize energy consumption, applied to the pumping plant refined products located in the town of Mariquita, installation associated with the system out - Cartago Management of Pipelines, Vice President of Transportation Ecopetrol. Will be conducted with a comparison of energy consumption under the current operating schedule, against the comparative consumption in ideal operating conditions reflected in the strategies for reducing pumping strikes operational factors and programming transportation of refined products pipeline . The final impact will be reflected in the measurement of reduced operating costs and environmental benefits of reducing energy consumption associated with the indirect emissions of greenhouse gases (GHGs).

Keywords: Pipeline, Pumping, Optimization, Eco-efficiency, refinement, LPG.

Justificación

La carencia de un método para la cuantificación de emisiones directas de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en las Plantas pertenecientes al sistema Salgar – Cartago de la Gerencia de Poliductos, vicepresidencia de transporte ECOPETROL, reflejan la necesidad de censar los consumos energéticos y traducirlos en equivalentes de emisiones atmosféricas; el alcance no va sólo hasta la consolidación de esa información, se pretende elaborar un modelo de gestión energética para optimizar el consumo de energía eléctrica, identificando los aspectos que generan pérdidas en los sistemas de bombeo, en este caso analizado para la Planta Mariquita; esto incluye los consumos de los motores de alta, media y baja tensión.

El impacto esperado se debe traducir en la reducción de costos de operación reflejados en el valor de barril transportado por kilómetro para el sistema Salgar – Cartago, y reducción de costos de mantenimiento de los equipos eléctricos asociados a la Planta Mariquita. Los resultados que genera este modelo servirán como base para ser aplicados en otros sistemas que presentan las mismas características del sistema Salgar – Cartago, tal como el sistema Salgar – Mansilla.

ECOPETROL debe generar trimestralmente un reporte de sostenibilidad basado en la metodología del Global Reporting Initiative (GRI), donde se especifica entre otras cosas el consumo eléctrico y su equivalente en emisiones de GEI; este reporte aplica para todas sus instalaciones, pero se presenta una gran necesidad en asegurar la precisión de los datos reportados dado que en algunos casos se hacen estimaciones de los consumos. El modelo planteado generará un valor agregado permitiendo un registro más exacto de los datos reales, reduciendo el grado de incertidumbre del reporte, asegurando la calidad del mismo y aportando paralelamente al cumplimiento de la Ley SOX¹, obligatorio para la permanencia de las compañías que cotizan en la Bolsa de Valores de Nueva York (NYSE).

¹ La **Ley Sarbanes Oxley** nace en Estados Unidos con el fin de monitorear a las empresas que cotizan en la Bolsa de valores de Nueva York (NYSE), evitando que las acciones de las mismas sean alteradas de manera dudosa, mientras que su valor es menor. Su finalidad es evitar fraudes y riesgo de bancarrota, protegiendo al inversor

El modelo igualmente aportará información acerca del desempeño del sistema caso del estudio para proponer alternativas de repotenciación de equipos y su viabilidad económica y operativa, es decir, puede arrojar datos que permitan considerar la puesta en marcha o no de un proyecto de reposición de equipos para aportar a un posible estudio de factibilidad.

Título: MODELO DE GESTIÓN ENERGÉTICA PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL CONSUMO DE ENERGÍA EN LA PLANTA MARIQUITA ECOPETROL S.A.

Title: ENERGY MANAGEMENT MODEL FOR OPTIMIZATION OF ENERGY CONSUMPTION IN PLANT MARIQUITA ECOPETROL S.A.

Objetivo General.

Realizar un análisis de la situación energética en la Planta de bombeo Mariquita, con el propósito de obtener un modelo de gestión energética, conjunto armónico y óptimo de soluciones que establezcan guías para un menor gasto energético.

Objetivos Específicos.

- Realizar un diagnóstico del consumo de energía eléctrica en la Planta Mariquita, en las condiciones actuales.
- Obtener un comparativo del esquema actual de consumo frente a una alternativa de eficiencia energética planteada, en términos de costos, generando como valor agregado ahorros hasta del 10%.
- Definir parámetros para la optimización del uso de energía eléctrica en la Planta Mariquita, reflejados en mejores prácticas de operación de los equipos de bombeo.

Introducción

El término de gestión energética se viene desarrollando desde finales de la década de los 80's, inicialmente abordando aspectos de iluminación y refrigeración en edificios y grandes conglomerados. Cuando se trata de ahorro de energía, gestión de la energía es el proceso de seguimiento, control y conservación de la energía en un edificio, fábrica o cualquier otra instalación. Generalmente, esto implica los siguientes pasos:

- Medición de su consumo de energía y toma de los datos.
- Búsqueda de oportunidades para ahorrar energía, y la estimación de la cantidad de energía que se puede aprovechar.

Normalmente se analizan los datos de medidores o contadores de energía para encontrar y cuantificar los desperdicios energéticos, y también se podría investigar el ahorro de energía que se podría hacer mediante la sustitución de equipos (alumbrado, aires acondicionados, motores eléctricos, electrodomésticos, entre otros), tomar medidas para captar las mejores oportunidades para ahorrar energía (es decir, la lucha contra el desperdicio energético y el reemplazo o la modernización del equipamiento ineficiente).

A través de los años fueron surgiendo muchos proyectos de gestión energética, pero fueron perdiendo importancia en algunos casos y en otros fueron olvidados. Pero nuevamente se da un impulso a todas estas iniciativas a nivel mundial, cobrando especial importancia el impacto ambiental que produce el uso ineficiente de la energía, las sanciones y estímulos que en muchos casos aplica en algunos países y la sostenibilidad financiera de las empresas o entidades involucradas. Al crearse la necesidad de intervenir en acciones de mejora a los procesos productivos, fueron surgiendo iniciativas orientadas a la protección y reducción del impacto en el medio ambiente (nuevas alternativas

energéticas, nuevos materiales, automatización, control y monitoreo de los procesos, legislación más estricta, otras acciones encaminadas a normalizar los aparatos productivos). Es así como empiezan a manejarse algunos términos como “ecoeficiencia”² para dar mayor relevancia al tema de gestión energética.

Se han realizado interesantes investigaciones en el tema de gestión energética, tal como el caso de estudio que desarrollaron en la empresa Serbia de producción de automóviles “Zastava”³. Para esta empresa se realizó un “análisis crítico del sistema de gestión energética existente (matriz energética), y de los principios de una organización con gestión de energía efectiva (con un administrador y un equipo de energía en su estructura) de la política de gestión de la energía”⁴. Se distinguen los elementos del sistema de gestión energética en la empresa en conjunto con el departamento de ingeniería mecánica de la Universidad de Kragujevac (Serbia). Se realiza una exposición de temas críticos de gestión energética a través de la matriz energética cuyos componentes son:

- La política de gestión de la energía.
- La organización.
- La motivación de la dirección.
- Sistemas de seguimiento, vigilancia e información.
- La sensibilización de la dirección/formación y promoción.

² "Proporcionar bienes y servicios a un precio competitivo, que satisfaga las necesidades humanas y la calidad de vida, al tiempo que reduzca progresivamente el impacto ambiental y la intensidad de la utilización de recursos a lo largo del ciclo de vida, hasta un nivel compatible con la capacidad de carga estimada del planeta".

³ Es un conglomerado industrial serbio radicado en la ciudad de Kragujevac, 86 km al sureste de Belgrado. Sus principales países de exportación pertenecen a Europa del Este. La firma fabrica artefactos militares y armas personales que se basaron en diseños rusos o alemanes, bajo el nombre Armas Zastava. En los años 1970 incrementó su producción de automóviles y comenzó su exportación, comercializados bajo la marca Yugo

⁴ Development of energy management system – Case study of Serbian car manufacturer. Dušan Gordić, Milun Babić, Nebojša Jovičić, Vanja Šušteršič, Davor Končalović, Dubravka Jelić. University of Kragujevac, Faculty of Mechanical Engineering Kragujevac, Sestre Janjić 6, 34000 Kragujevac, Serbia

- La inversión.

Dicha matriz expone el estado de los esfuerzos en gestión energética previo a la aplicación de las intervenciones de mejora; de acuerdo a los niveles de cualificación en la matriz se detectaron hallazgos tales como que no había una política de gestión energética claramente definida, no existían roles definidos dentro de la misma, baja motivación de los empleados en el tema, los informes eran realizados por el jefe de mantenimiento de otro departamento ajeno al área donde se realiza el estudio, los acercamientos informales eran utilizados para la promoción de la eficiencia energética y las inversiones sólo se hacían en proyectos de bajo presupuesto.

Para la iniciación del sistema de gestión energética era clave el compromiso de la administración, se continuó con la etapa del auditor de energía con tareas de inspecciones, toma de mediciones, comparativo de consumos y de costos, finalmente en esta etapa se concluye que el consumo de energía en la fábrica es alto, comparado con consumos energéticos del mismo proceso en fábricas norteamericanas. La siguiente etapa fue la identificación de medidas de conservación de la energía y el desarrollo del plan de acción (se detectan por ejemplo motores de pobre eficiencia, obsoletos y sobredimensionados para los procesos en donde funcionaban). La etapa final se refiere a la implementación, monitoreo y evaluación de medidas de ahorro energético. En su totalidad no se habían aplicado todos los propósitos del sistema de gestión energética, se habían generado ajustes a partir de su implementación mostrando resultados efectivos.

Otro caso de estudio es el que se llevó a cabo en una empresa de inyección de plástico moldeado en Alemania (Schlieter, Juhirsch, & Niggemann, 2010) del sector de la pequeña y mediana empresa, en donde se plantea un modelo de referencia para alcanzar la certificación DIN EN 16001⁵, basado en un sistema de gestión que consta de cuatro aspectos integrados: Modelo de referencia, algoritmos, sensores – medidores y lineamientos para la integración organizacional. El modelo de referencia hace parte de un método basado en modelación; esa modelación busca una implementación de estrategias que generen beneficios tanto en costos como en aplicación de objetivos enfocados a la

⁵ DIN EN 16001 es el sistema para la gestión de la energía y la eficiencia energética en Alemania, la norma fue introducida en enero de 2010.

gestión de la energía. Los modelos de referencia de procesos generados fueron desarrollados para procesos estratégicos de gestión energética y para procesos operativos, en donde la parte operativa está definida en procesos transversales y procesos de producción. Los resultados arrojados por el modelo de referencia fueron la inclusión de las principales tareas propuestas por la norma DIN EN 16001 y la inclusión de los procesos para abordar el consumo y el déficit de eficiencia; caso concreto se identificó un programa de control deficiente en uno de los procesos productivos, donde se verificó que uno de los procesos de secado transcurría por fuera del ciclo donde el rendimiento energético era más eficiente, se realizó el cambio en el programa de control sin que se requiriera inversión y se generó un ahorro energético del 10%.

También se han generado otras experiencias en Colombia, como se expone en el artículo “El MGIE, un modelo de gestión energética para el sector productivo nacional” (Campos Avella, Prías Caicedo, Quispe Oqueña, Vidal Medina, & Lora Figueroa, 2008); el artículo hace referencia al proceso de implementación del MGIE (Modelo de Gestión Integral de la Energía) a través de las etapas de:

- Decisión estratégica (actividades: caracterización energética de la empresa, compromiso de la alta dirección, alineación de estrategias, definición y conformación de la estructura técnica organizacional).
- Instalación del SGIE en la empresa (actividades: establecimiento de los indicadores del sistema de gestión, identificación de las variables por centros de costos, definición de los sistemas de monitoreo, diagnóstico energético, vigilancia tecnológica e inteligencia competitiva, plan de medidas de uso eficiente de la energía, actualización y validación de la gestión organizacional de SGIE, preparación del personal, elaboración de la documentación del SGIE, auditoría interna al SGIE).
- Operación del sistema de gestión integral de la energía en la empresa (actividades: seguimiento y divulgación de indicadores, seguimiento y evaluación de buenas prácticas de operación, mantenimiento, producción y coordinación, implementación de programas y proyectos de mejora, implementación del plan de entrenamiento y

evaluación del personal, chequeos de gerencia, ajustes del sistema de gestión, evaluación de resultados).

Este modelo fue aplicado en tres empresas: Biofilm S.A., Cerrejón S.A. y Faggrave S.A.; finalmente se destaca que el MGIE se encuentra formado por tres etapas de desarrollo: decisión estratégica, instalación y operación, que garantizan la adquisición de la cultura, la tecnología y el nivel organizacional requerido para una gestión energética integral y sostenible en el tiempo. Se resalta que el MGIE constituye una tecnología de gestión de baja inversión y gran impacto sobre los costos de producción y productividad empresarial, con las demás bondades que aporta en términos de reducción de costos y competitividad.

Para ECOPETROL, el tema de gestión de la energía eléctrica es clave no sólo por los beneficios en la optimización de costos, bienes y servicios que se involucran; también es clave cuando se orienta hacia el tema de sostenibilidad ambiental, donde se trata de reducir las emisiones indirectas de gases de efecto invernadero (aquellas que son aportadas por el uso y producción de energía eléctrica producida por calderas y unidades termogeneradoras, utilizando como insumo para producirla combustibles basados en carbón o derivados del petróleo). Con el propósito de cuantificar y consolidar esta información de emisiones, entre ellas las emisiones indirectas, ECOPETROL ha desarrollado el Sistema de Gestión de Emisiones Atmosféricas (SIGEA); otro objeto que tiene este sistema es el de ayudar a identificar focos de consumo energético alto, cuantificar su aporte en emisiones de gases de efecto invernadero y transmitir esos datos a las áreas implicadas para adelantar propuestas de reducción y optimización de la energía eléctrica.

1. Contextualización de la investigación.

El área objeto de estudio y de aplicación se ubica en la Planta ECOPETROL Mariquita, también conocida como estación La Parroquia; dicho estudio está orientado a determinar alternativas más eficientes en el uso de la energía eléctrica para el desarrollo de la operación principal de la Planta, que es el reimpulso de los diferentes productos que están siendo transportados por ducto con criterios de seguridad, confiabilidad, protección de la calidad de los combustibles, oportunidad en las entregas a los clientes consignatarios o clientes mayoristas (Terpel, Brio, Velogás, entre otros), costos de operación bajos y protección a la integridad de las personas y del medio ambiente.

1.1 Operación Remota de Sistemas de Transporte por Ductos.

Considerando los criterios citados, se aborda el tema energético como caso de estudio ya que el mismo es un tema transversal para varios de ellos, es decir, el tema energético afecta o influye directamente en la calidad de los productos, los costos de operación, la confiabilidad de los sistemas, el menor uso de energía y por consiguiente menor impacto al ambiente y la oportunidad en la entrega de productos.

Para la actividad de transporte por ductos, se cuenta con herramientas automatizadas para el monitoreo y supervisión de instalaciones, equipos y sistemas ligados a la misma; es así como en ECOPETROL se cuenta con un sistema SCADA (Control Supervisorio y Adquisición de Datos) aplicado a sus líneas de transporte por ductos, a sus instalaciones

de bombeo y rebombeo, y a sus instalaciones terminales. La filosofía del SCADA pretende facilitar la gobernabilidad de los sistemas asociados a él, con información en tiempo real y con acción inmediata sobre los mismos dependiendo de la confiabilidad en las comunicaciones. En la figura 1 se observa la arquitectura de un sistema SCADA.

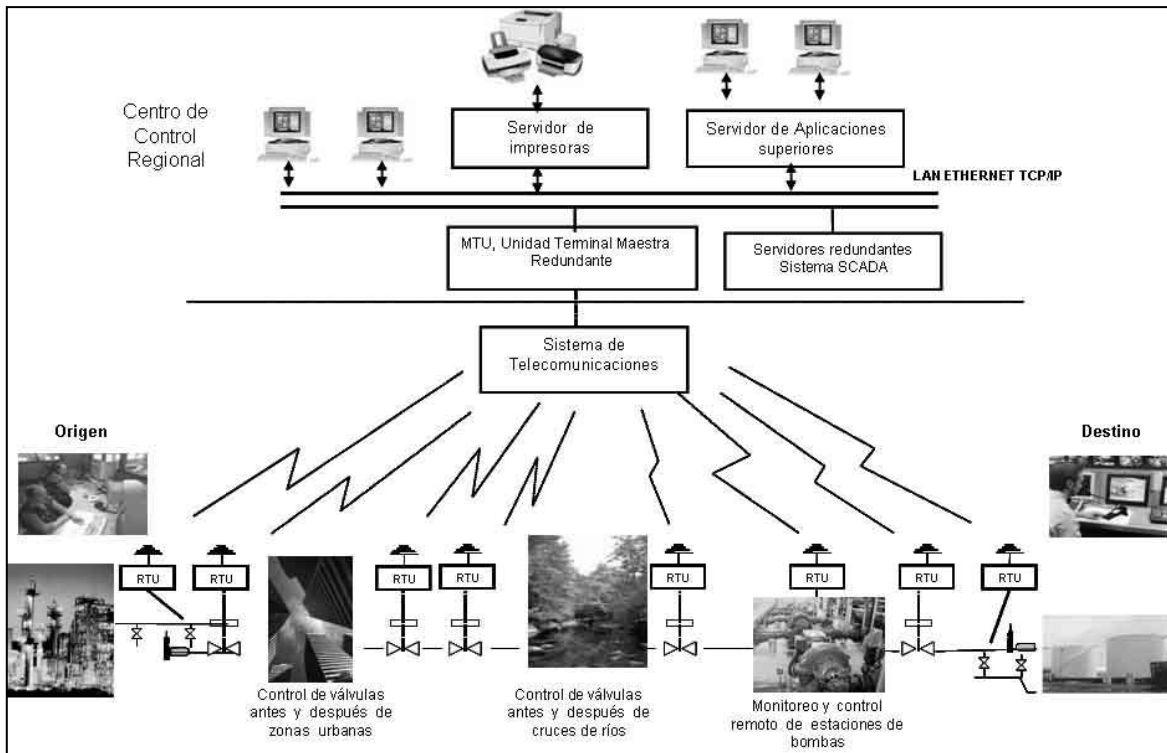


Figura 1: arquitectura típica del SCADA. Fuente: Pemex

En el caso ECOPEPETROL, con el sistema SCADA se cumplen los siguientes objetivos:

- Coordinar y controlar el cumplimiento de los planes y programas de transporte y mantenimiento de oleoductos y poliductos a cargo de la Vicepresidencia de Transporte, garantizando así el cumplimiento de los compromisos adquiridos.
- Definir e implementar los sistemas óptimos operacionales (EEO) conforme a los parámetros de calidad, cantidad y oportunidad en cada uno de los sistemas, con el fin de asegurar el abastecimiento e incrementar el buen uso y utilización de los recursos existentes.

- Coordinar la de nuevos esquemas operacionales y operaciones especiales, con la finalidad de asegurar el abastecimiento de hidrocarburos.
- Generar y coordinamos acciones encaminadas a la reducción sostenible de pérdidas de hidrocarburos dentro de la red de transporte de ductos, con base en el análisis de resultados de los sistemas de detección de fugas.
- Gestionar y dar seguimiento a los acuerdo de operación y mantenimiento de aplicaciones avanzadas de apoyo y soporte del sistema SCADA.
- Asegurar las condiciones operativas necesarias para el desarrollo de los programas de mantenimiento tanto programados como no programados que tengan afectación en el normal funcionamiento de la operación de transporte por ductos de la Vicepresidencia de transporte.

Actualmente en ECOPEPETROL se monitorean con el sistema SCADA el 100% de los sistemas de transporte por ductos, de los cuales se gobiernan el 70% desde el Centro de Control de Operaciones – CCO ubicado en la ciudad de Bogotá, específicamente en la Gerencia de Operación Centralizada de la Vicepresidencia de Transporte. En la figura 2 se aprecia la visualización del control de parámetros SCADA para la unidad eléctrica de la Planta Mariquita.

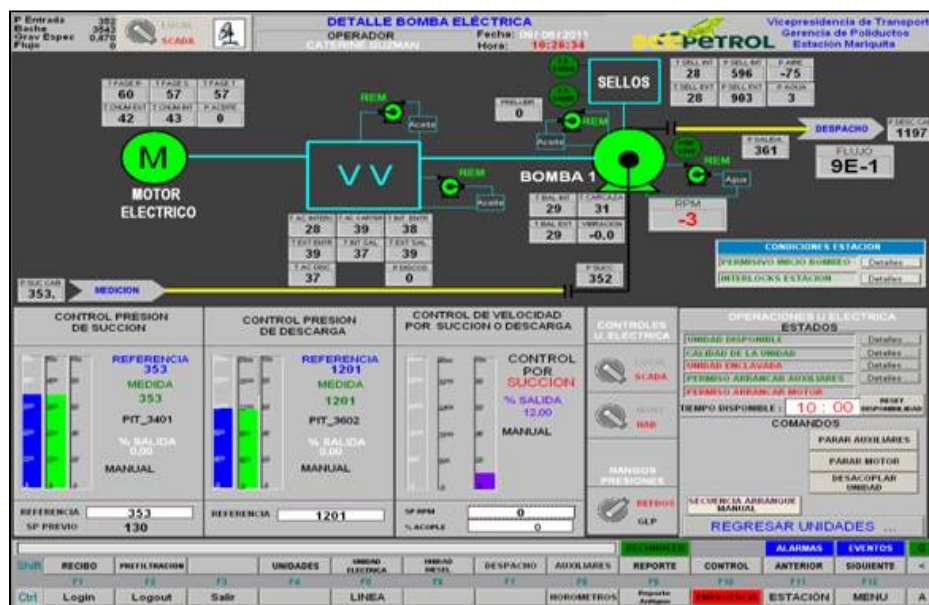


Figura 2: Control SCADA unidad eléctrica Planta Mariquita. Fuente: ECOPEPETROL S.A.

1.2 Sistema de Transporte Salgar - Cartago.

El sistema Salgar – Cartago, también conocido como el Oleoducto de Caldas (ODECA), entró en operación a partir del año 1968 iniciando desde la Planta Puerto Salgar, con las Plantas Mariquita, Fresno, Herveo, Manizales, Pereira y Cartago; las Plantas Mariquita, Fresno y Herveo cuentan con unidades principales de bombeo compuestas por bombas centrífugas multietapas impulsadas por un motor eléctrico de 1500 HP ubicado en la Planta Mariquita y motores eléctrico de 1000 HP ubicados cada uno en las Plantas de Fresno y Herveo; el control del sistema en la Planta Mariquita se realiza por presión de succión y el control de revoluciones por minuto (R.P.M.) del motor eléctrico mediante un variador hidrodinámico de velocidad; en la Plantas Fresno y Herveo el control del sistema se realiza con el control de presión de succión de las unidades y por flujo, haciendo uso de una válvula de control de presión. El objeto del motor de 1500 HP y del variador de velocidad en la Planta Mariquita se debe a que hasta el año 1994 se realizaban entregas al paso desde esta instalación hacia la población de Mariquita, en donde se encuentra una instalación de almacenamiento mayorista propiedad de la compañía Terpel. El control del sistema se realizaba anteriormente de manera local, interactuando entre las diferentes estaciones a través de un sistema de comunicaciones de voz, para regular las variables y alinear los parámetros de bombeo, posteriormente en el año 2000 se inicia con el proceso automatización SCADA para este sistema, paso previo a la incorporación de la operación remota.

En la figura 3 se puede apreciar un esquema de configuración para las líneas de proceso que involucran la operación de bombeo en la Planta Mariquita. Cabe anotar que existen en todas las Plantas una unidad de bombeo como respaldo, que constan de motores Diesel acoplados a un incrementador⁶ de velocidad y a una bomba de similares características; estas unidades entran en funcionamiento ante una eventual falla del suministro de fluido eléctrico, en mantenimientos preventivos y correctivos de las unidades eléctricas, y cuando

⁶ Un incrementador de velocidad es un dispositivo mecánico que se encuentra acoplado a un eje rotatorio y que en su interior posee componentes que permiten el acople directo a otro elemento que gira solidario al mismo eje, aumentando el número de vueltas que realiza de acuerdo a la relación del equipo (Ejemplo: relación 1:3)

se presentan algunas restricciones por el paso de algún producto por el sistema, que genere alguna restricción hidráulica perjudicial para los equipos eléctricos, por ejemplo, el paso de Biodiesel en horas del día donde la temperatura ambiente incrementa la presión en el poliducto.

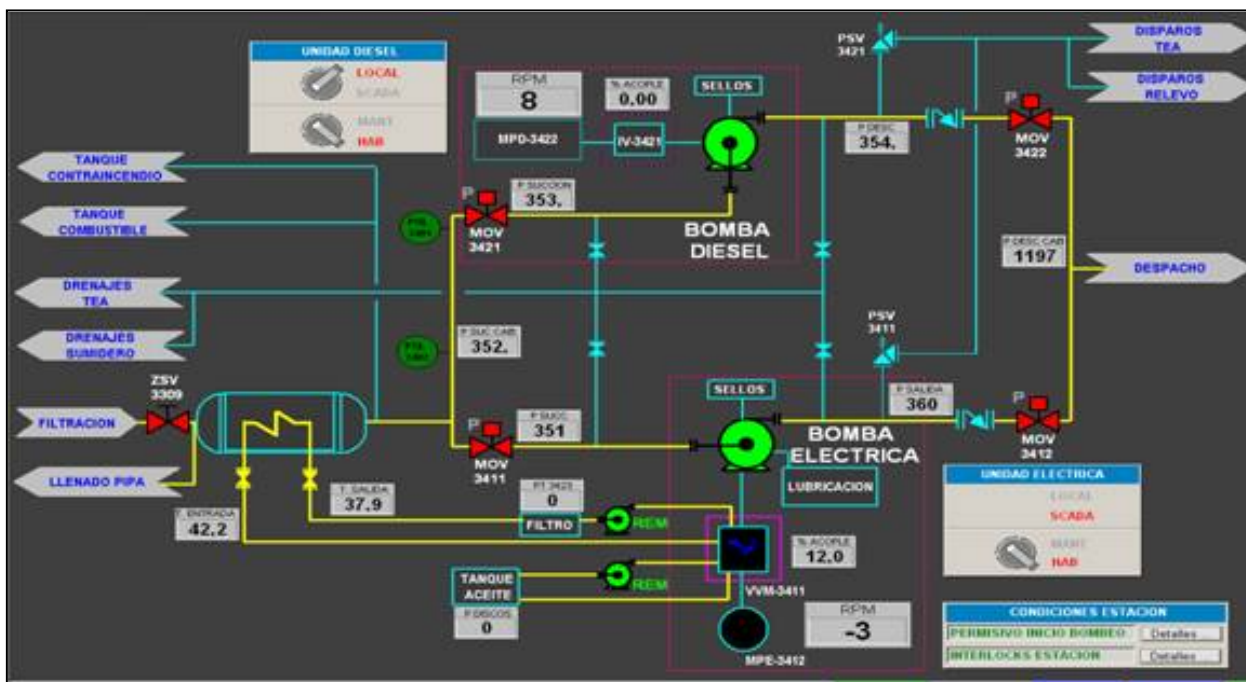


Figura 3: Diagrama de líneas del proceso de bombeo Planta Mariquita. Fuente: ECOPETROL S.A.

A partir de la entrada en operación del sistema Salgar – Neiva, las entregas de productos refinados a la Planta mayorista Terpel Mariquita son realizadas desde este sistema, como consecuencia se toma la decisión por parte de ECOPETROL para eliminar el punto de entrega desde la Planta Mariquita, causando una disminución crítica del flujo que era gobernado por el variador de velocidad, generando a su vez un consumo de energía alto debido a que la potencia del motor debía ser regulada por intermedio del variador, es decir, al manejarse anteriormente un flujo mayor con la configuración de variador

(alrededor de 1.400 barriles /hora), se reduce la rata de flujo⁷ para el sistema eliminando la entrega en Mariquita (flujo desciende a 1.000 barriles hora).

La disminución de la rata de flujo asocia como consecuencia el desperdicio de una alta cantidad de energía, que es disipada en el variador⁸ de velocidad hidrodinámico en forma de calor, gracias a que la energía mecánica que produce el motor se fracciona en el rozamiento de los discos que acoplan la unidad de bombeo. Adicionalmente se presentan otras situaciones de carácter hidráulico de la dinámica del sistema, originado por el tipo de productos que son transportados por el poliducto. La dinámica del sistema es compleja considerando la topografía que se asocia al mismo, debiendo vencer alturas de hasta 3.800 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.), manteniendo una presión para los productos en este punto por encima de la presión de vapor; en la tabla 1 se reflejan las características relevantes para la operación de los productos que son transportados por el sistema Salgar – Cartago:

PRODUCTO	GRAVEDAD ESPECÍFICA (Agua = 1)	PRESIÓN DE VAPOR
G.L.P	0.552	120 psi
GASOLINA MOTOR	0.743	< 8 psi
GASOLINA EXTRA	0.725	< 8 psi
B2 (BIODIESEL 2%)	0.82	< 1 psi

Tabla 1: características físicas de productos refinados (fuente: Ecopetrol S.A.).

⁷ La rata de flujo es el flujo nominal de operación en un sistema de transporte por ductos, dadas algunas condiciones de estabilidad de variables tales como la presión del sistema, la temperatura y la densidad del producto transportado

⁸ Un variador de velocidad hidrodinámico, es un dispositivo que se encarga de regular la proporción de giro del eje de un motor haciendo uso de unos discos de acople que se encuentran inmersos en un recipiente de aceite

1.3 Características del Perfil Topográfico y su Influencia Sobre el Transporte de Productos Refinados por el Sistema Salgar – Cartago.

En la figura 4 se refleja el perfil topográfico del sistema Salgar – Cartago, se observan entonces la disposición de las estaciones a lo largo de los 225 kilómetros de recorrido del ducto desde la estación inicial Puerto Salgar hasta la estación terminal Cartago; las Plantas Salgar, Mariquita, Fresno y Herveo son las únicas que tienen unidades de bombeo ya que los productos cuando vencen el punto más alto del poliducto, alto de la Romelia, ubicado a 3.788 m.s.n.m. en el parque de los nevados, bajan por efecto de la gravedad hacia las demás estaciones del poliducto. La inversión energética más grande se realiza entonces en las Plantas que poseen las unidades de bombeo, para el caso de estudio Planta Mariquita, es el punto más crítico de consumo respecto a la cantidad de producto bombeado y a las características de los mismos, comparado con el consumo de energía asociado a las unidades de bombeo.

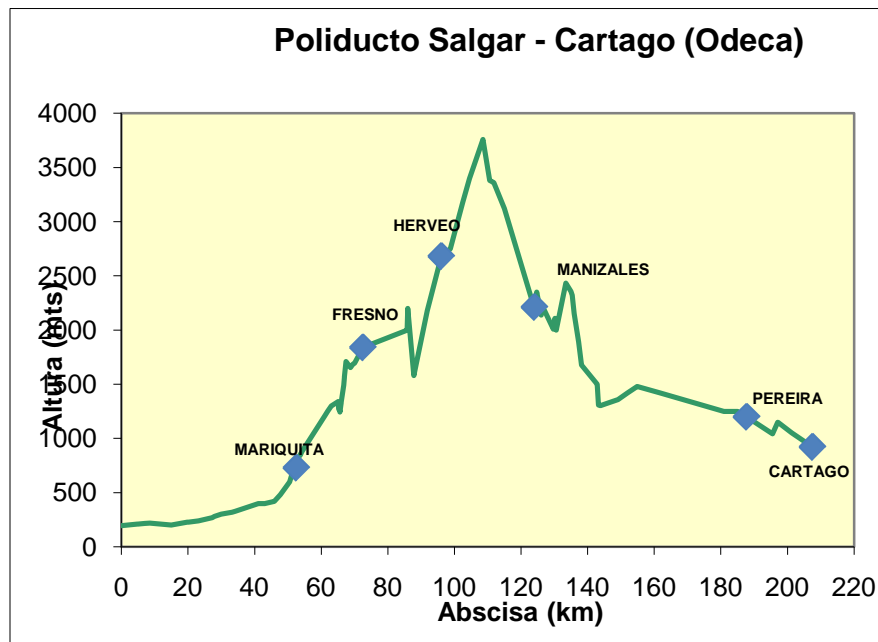


Figura 4: perfil topográfico del sistema Salgar – Cartago (Fuente: Ecopetrol S.A.).

Los diámetros de tubería varían entre las 6 y 8 pulgadas dependiendo del tramo del poliducto, e influye a nivel de parámetros de operación (presiones máximas tolerables), asociado a la topografía y a la altura sobre el nivel del mar.

1.4 Generalidades Operacionales de la Planta Mariquita.

El papel que cumple la Planta Mariquita para el sostenimiento de la operación del Poliducto Salgar – Cartago es fundamental, pues si esta instalación no existiera, se demandaría un mayor gasto energético en las demás instalaciones de bombeo, haciendo necesario unos equipos más robustos y potentes, pero adicional a eso la capacidad operativa eléctrica debería ser mejorada para soportar la carga de los mismos. En síntesis, se tiene justificado a nivel de rendimiento hidráulico del sistema la subsistencia de la Planta Mariquita.

La Planta Mariquita es la encargada de recibir los productos provenientes de la Planta Salgar, manteniendo unas variables estandarizadas de presión y flujo que conservan la línea empaquetada, es decir, las variables físicas del comportamiento del sistema permanecen en un estado estable, contrario por ejemplo a que la línea se trabajara con rangos de presión por fuera de las especificaciones, causando transientes dinámicos del fluido transportado, que a su vez provocan paros de bombeo y averías de los equipos, adicionalmente a las sobrepresiones a que son sometidos los ductos. Seguido estos mismos productos son reimpulsados hacia la Planta Fresno ubicada aguas abajo de la Planta Mariquita; para este efecto se deberán considerar los mismos aspectos de parametrización de variables críticas de presión y flujo. La unidad principal de la Planta Mariquita (ver figura 5) se compone de los siguientes elementos: Motor marca ASGEN de 1.500 HP (caballos de fuerza) con alimentación de 6.300 V (voltios); variador de velocidad hidrovicoso marca Philadelphia con intercambiador de calor para refrigeración

del aceite; bomba centrífuga⁹ de once (11) etapas marca Byron-Jackson. Estos equipos presentan una obsolescencia crítica pues vienen operando por más de treinta años, sujetos a los programas regulares de mantenimiento predictivo y correctivo.

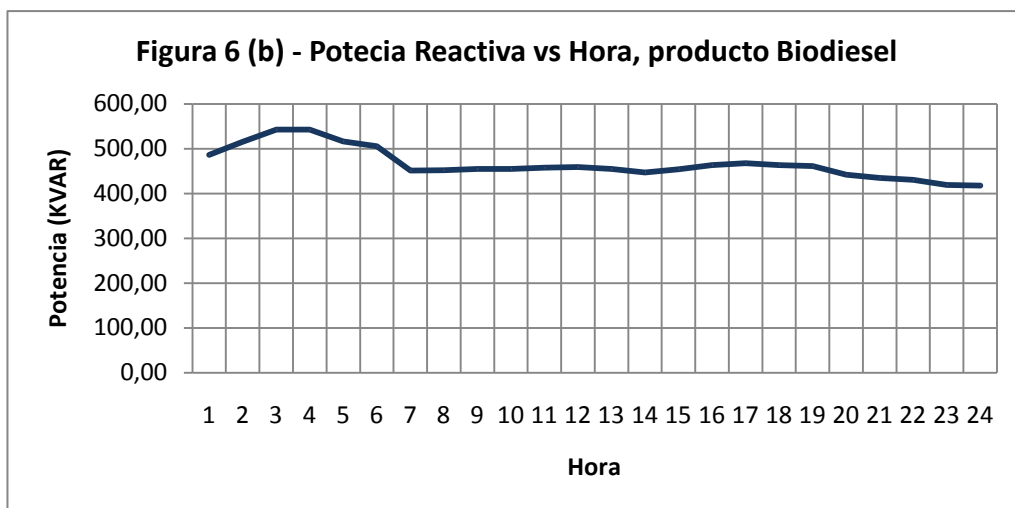
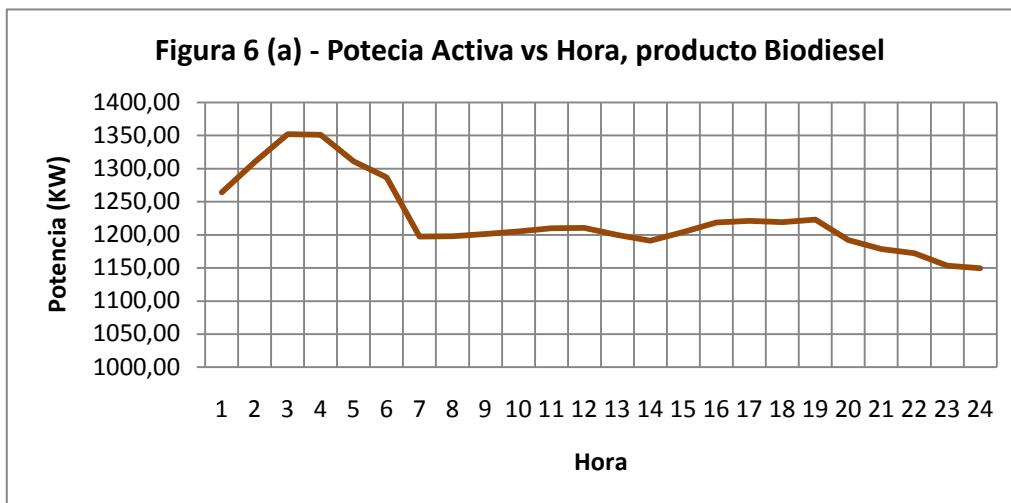


Figura 5: Unidad de bombeo principal Planta Mariquita. Fuente: Ecopetrol S.A.

El principal factor de consumo energético se localiza en esta unidad, ya que mientras los demás motores de 1.000 Hp instalados en las Plantas de Fresno y Herveo con válvula de control presentan unos consumos entre 350.000 KWh/mes (kilovatios-hora/mes) y 420.000 KWh/mes, la Planta Mariquita está generando unos consumos entre 450.000 KWh/mes y 530.000 KWh/mes, a causa del motor más potente cuya velocidad está controlada por el variador hidrovicoso de discos, que acopla parcialmente el eje del motor a la bomba centrífuga multietapas. El efecto que genera el acople parcial del variador hidrovicoso es similar al efecto que presenta el acelerar un vehículo de transmisión mecánica, con un velocidad engranada y sin soltar el pedal del embrague, causando de igual manera calentamiento de las piezas y reducción de la vida útil, así como el desaprovechamiento de la energía aplicada.

⁹ Una bomba centrífuga consiste en un impulsor que produce una carga de presión por la rotación del mismo dentro de una carcasa o voluta. Las diferentes clases de bombas se definen de acuerdo con el diseño del impulsor, el que puede ser para flujo radial o axial

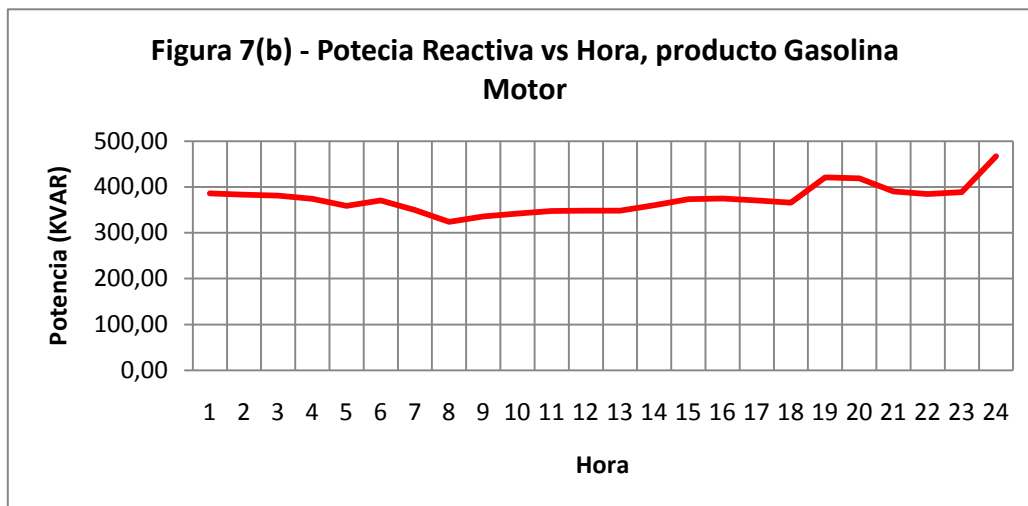
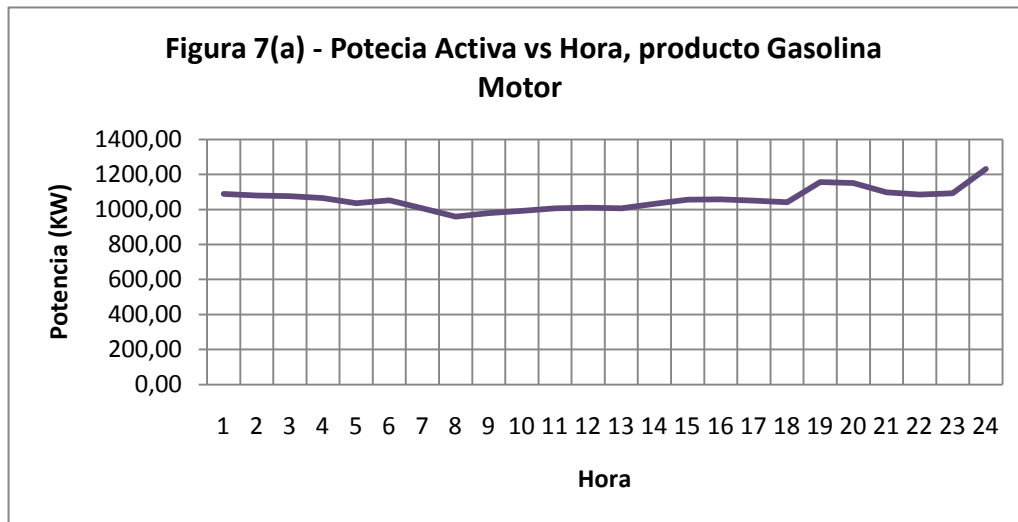
En las figuras 6 (a) y 6 (b) se observan las curvas de demanda diaria de potencia activa y reactiva en el transporte de Biodiesel al 2% para la Planta Mariquita:



Figuras 6(a) y 6(b): relación de potencia activa y reactiva – producto Biodiesel 2%. Fuente: Ecopetrol S.A.

De acuerdo a lo que se observa en la figura 6 (b), el porcentaje promedio de potencia reactiva que se demanda en el transporte de biodiesel es del 38%, lo que muestra una carencia de eficiencia en el esquema energético empleado; para hacer un comparativo con otro producto más liviano, por ejemplo la Gasolina Motor o Corriente, observamos el comportamiento en las figuras 7(a) y 7(b); en el caso de la Gasolina Motor se produce una reducción de la potencia activa y reactiva debido a que es un producto más liviano que el

Biodiesel, y el correspondiente de potencia activa frente a la reactiva es del 35 % aproximadamente.



Figuras 7(a) y 7(b): relaciones de potencia activa y reactiva – producto gasolina motor. Fuente: Ecopetrol S.A.

Para efectos de consumo se plantea la relación del factor de potencia empleado para determinar la eficiencia del consumo de energía; quiere decir esto que el factor de potencia, con valores entre 0 y 1, deberá estar lo más cerca posible al valor 1 para no generar mayores consumos de corriente. Para determinar el factor de potencia medio de estos ejemplos acudimos a la siguiente fórmula:

$$f.d.p. = \cos (\tan^{-1} KVAR / KW)$$

Donde:

- KVAR potencia reactiva (Kilovoltiamperios).
- KW, potencia activa (Kilovatios).

Aplicando la fórmula, los resultados para el caso de Biodiesel con una potencia activa promedio de 1217,3 KW y una potencia reactiva promedio de 462,9 KVAR nos da como resultado un factor de potencia medio de 0.934; para el caso de Gasolina Motor con una potencia activa promedio de 1058,7 KW y una potencia reactiva promedio de 373,5 KVAR nos da como resultado un factor de potencia medio de 0.943; estos valores se encuentran dentro de los márgenes de 0.9 y 1.0. En el anexo 1 se encuentra la base de datos empleada para realizar este análisis.

1.5 Comparativos de Consumos Energéticos con las Plantas Fresno y Herveo.

Teniendo en cuenta que las Plantas Mariquita, Fresno y Herveo cumplen la misma función de reimpulsar los productos hacia la zona del eje cafetero, teóricamente se considera un consumo idéntico de energía utilizada; para el caso de estudio analizado se realiza un comparativo, como se observa en la figura 6, del consumo de energía para igual franja horaria y con el mismo producto en línea, en este caso Biodiesel, que presenta una mayor inversión energética:

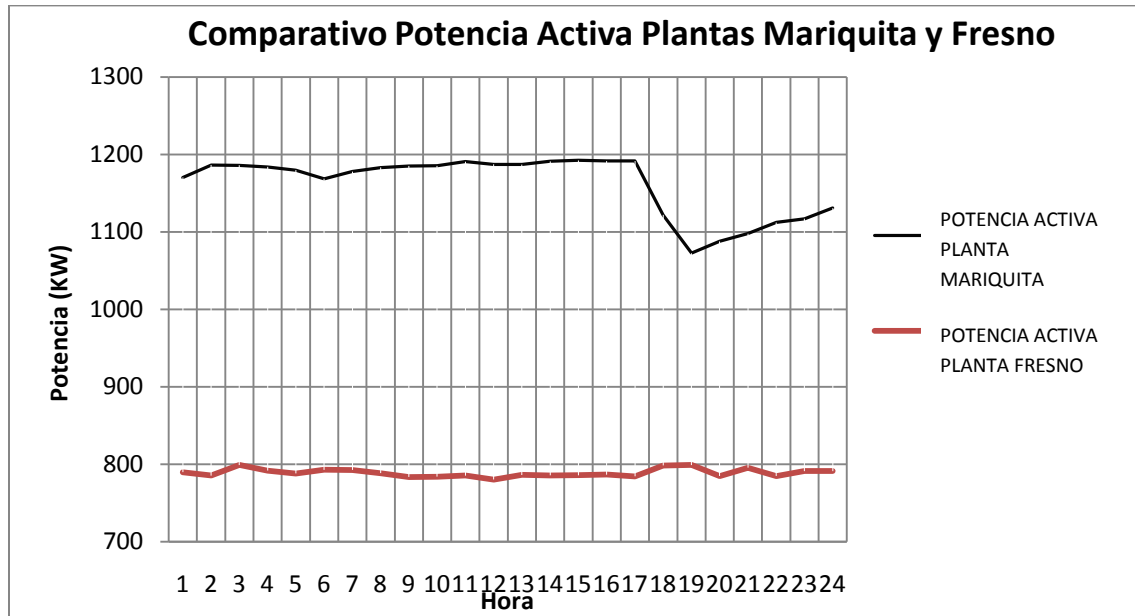


Figura 8: Comparativo de consumo energético Plantas Mariquita y Fresno. Fuente: Elaboración propia.

Al poseer un motor eléctrico de mayor potencia en la Planta Mariquita, se evidencia la diferencia en el consumo respecto a una Planta como Fresno, con una diferencia promedio hasta del 32 % en el consumo.

Bajo este escenario se puede plantear que con una propuesta de mejoramiento del desempeño energético en el consumo de la Planta Mariquita, se pueden lograr unos costos de operación más ajustados que se verán reflejados finalmente en el margen de utilidades por prestación del servicio de transporte de productos refinados por el sistema Salgar - Cartago, Vicepresidencia de transporte ECOPETROL S.A.

2. Metodología de la Investigación.

Por medio de la aplicación del método científico se realiza la elección del enunciado del problema que motiva esta investigación, a partir de la figura 9 se muestra el proceso de la metodología aplicada. Los aspectos de identificación estarán limitados por los límites de batería o fronteras operativas de la Planta Mariquita, conservando una estructura integral en el sondeo inicial de la identificación de necesidades.

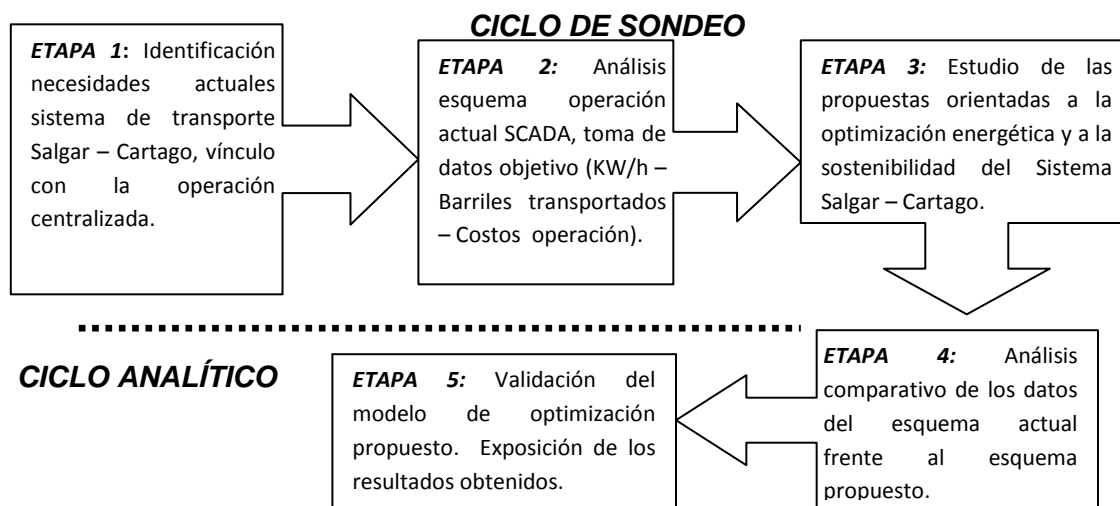


Figura 9: Etapas de la metodología propuesta a través del método científico. Fuente: elaboración propia

2.1 Etapa N° 1.

Se tiene previsto un análisis del estado de operación actual del sistema Salgar – Cartago bajo las condiciones de operación remota, realizando un sondeo tipo entrevista a los

operadores de las plantas del sistema y a los operadores remotos que se ubican en el Centro de Control de Operaciones (CCO) en la ciudad de Bogotá. En esta etapa se generarán unos insumos que permitirán orientar el desarrollo de las etapas subsiguientes por lo que es elemento clave la rigurosidad que se aplique en las entrevistas, en la recolección de información y en la revisión de instructivos y procedimientos operativos. Una gran fortaleza en este aspecto es el sistema integral de gestión que rige en ECOPETROL, toda vez que existe un sistema de acceso a la información actualizado según los parámetros del mismo sistema.

2.2 Etapa N° 2

Se pretende consolidar una base de datos que contendrá los elementos básicos del análisis comparativo, que consiste en: consumo kilovatios por hora (Kw/h) para la Planta Mariquita en el mes, cantidad de barriles transportados en el mismo período, tipo de producto transportado en el período de comparación y costos fijos y variables asociados al mantenimiento y al funcionamiento de la infraestructura. Los datos de mayor énfasis en el análisis serán los de consumo energético frente al número de barriles transportados. Se generarán algunos datos que no serían coincidentes, es decir, en algunos momentos y por causas operacionales la línea estará detenida, o la unidad principal eléctrica estará detenida y se estará bombeando con la unidad Diesel de respaldo, entre otras situaciones. Para contrarrestar ese efecto se realizará un seccionamiento de datos por horas de funcionamiento, pero siempre conservando el esquema de datos simultáneos (lectura de energía y cantidad de barriles transportados con horas coincidentes), el dato de interés es el que se ubica entre la franja horaria con tarifa alta y la otra franja horaria con tarifa baja de energía.

2.3 Etapa N° 3

Se compone de un estudio de propuestas que pretenden exponer alternativas al tema de unidades de bombeo, entendiendo estas como la piedra angular del desempeño energético del sistema Salgar – Cartago, puesto que son las entidades que representan el mayor consumo en cada Planta. Dentro de las propuestas se contemplaría el uso por ejemplo de

variadores de frecuencia o la aplicación integral del formato de bombas con válvulas de control para las tres Plantas (actualmente la Planta Mariquita posee variador hidromecánico, Plantas Fresno y Herveo poseen válvula de control). La propuesta se hace extensiva a otros elementos de consumo energético que se encuentran en esas instalaciones (motores, aires acondicionados, iluminación, entre otros), donde se evalúa su impacto en términos de consumo y factor de utilización. Los valores de potencia activa¹⁰ y potencia reactiva¹¹ son referencia básica en términos de costos de operación del sistema.

2.4 Etapa N° 4

Se plantea un análisis comparativo de los datos del esquema actual de operación frente al esquema propuesto de acuerdo al modelo de optimización planteado, el mayor énfasis de los resultados será traducido en costos de operación con el objeto de exponer de exponer las bondades del modelo propuesto. Como valor agregado en esta etapa se genera igualmente un análisis de datos concerniente a la reducción de consumos energéticos, apuntando a la estrategia de la empresa de aportar al SIGEA. Para este efecto se hará uso de herramientas estadísticas de modo que la fiabilidad de los datos analizados esté soportada en un estudio riguroso del comportamiento de los mismos.

2.5 Etapa N° 5

Es la de presentación de resultados y estos van más enfocados en términos económicos y de reducción de gases de efecto invernadero (GEI) frente a la validación a realizarse del modelo propuesto. Estos resultados expondrán los costos de operación optimizados que son el reflejo de las modificaciones realizadas al esquema vigente y en donde se integran todos los componentes; igualmente los datos de reducción de consumo energético se verán sustentados dentro del Sistema de Gestión de Emisiones Atmosféricas (SIGEA).

¹⁰ **Potencia activa.** Es la potencia que representa la capacidad de un circuito para realizar un proceso de transformación de la energía eléctrica en trabajo.

¹¹ **Potencia reactiva.** A pesar del nombre, no es energía con significado termodinámico, no se puede transformar en trabajo.

Estas etapas se clasifican para este caso de estudio en el ciclo de sondeo, orientado a manera de diagnóstico de la situación, y el ciclo analítico expresado como las acciones operativas para la obtención de resultados.

3. Resultados.

El presente capítulo expone la implementación de herramientas estadísticas para dar tratamiento a los datos recopilados durante el proceso de análisis de la información, realiza la evaluación del comportamiento de los mismos y la posterior validación de los resultados.

3.1 Diagnóstico de la operación actual del sistema Salgar - Cartago

La operación remota del sistema Salgar - Cartago se realiza siguiendo los criterios de programación del despacho de productos refinados, provenientes de las refinerías¹² de Barrancabermeja y Cartagena; estos productos son almacenados en grandes centros logísticos y se destinan a las regiones según la demanda de combustibles. El mercado de los combustibles es muy dinámico y dependiente de muchos factores, entre los factores más influyentes están:

- Temporadas del año: El mercado incrementa o disminuye la demanda de combustibles, por ejemplo, fechas de semana santa, periodos vacacionales de principio, mitad y fin de año, fines de semana festivos, otras fechas.

¹² Una refinería es una instalación que tiene la capacidad de procesar mediante varias operaciones químicas y físicas, el petróleo recibido desde los centros de producción; el resultado de estos procesos son producto de la refinación del petróleo y sus derivados

- Incremento en los precios de los combustibles: Los precios están sujetos a los decretos emitidos por el Ministerio de Minas y Energía y decretos de sobretasas en los combustibles emitidos por las alcaldías y gobernaciones.
- Existencias de producto en los tanques de almacenamiento de los clientes mayoristas: La capacidad de almacenamiento restringe el tránsito de productos en la línea, puesto que en algunas ocasiones no hay cupos de almacenamiento de productos refinados para el volumen transportado, ocasionando la parada del sistema y generando pérdidas económicas para ECOPETROL.

La Gerencia de Operación Centralizada (GOC) de la Vicepresidencia de Transporte ECOPETROL S.A. es la dependencia encargada de generar acciones, encaminadas a contrarrestar las dificultades relacionadas con estos factores; el encargado en esta dependencia de aplicar los planes de acción para dar sostenibilidad a la operación es el programador de refinados, funcionario que tiene a cargo las relaciones con los clientes, realiza los requerimientos de productos a las refinerías y divulga el programa de bombeo a todos los entes involucrados.

Bajo este escenario, la confiabilidad de los procesos de transporte por ductos es esencial para el cumplimiento de las entregas de productos refinados a los clientes con los criterios de calidad, oportunidad y cantidad; el esquema operativo debe estar configurado de manera tal que se generen los menores paros de bombeo posibles. El Centro de Control de Operaciones (CCO) ubicado en la ciudad de Bogotá, es el área operativa encargada de gobernar las operaciones de todos los sistemas de transporte por ductos, haciendo uso de una plataforma SCADA que permite la manipulación de variables en las Plantas por comunicación vía satélite y microondas.

Localmente la operación de las Plantas es supervisada por operadores que tienen a su cargo el seguimiento de las variables críticas del proceso, manteniendo la dinámica del sistema sin afectar a otras Plantas asociadas a los sistemas de transporte de los hacen parte. Con la entrada de la operación remota, los operadores locales tienen la tarea de informar sobre cualquier anomalía del sistema; en caso de contingencias operativas poseen la potestad de tomar el control de los sistemas para ser operados de forma manual.

Algunas veces se presentan situaciones de carácter operativo que no permiten el desempeño eficiente de los sistemas de bombeo, para el caso del sistema Salgar - Cartago por ejemplo se generan consumos de energía muy altos debido a condiciones como el tipo de producto que se transporta en determinado horario; para ser más específicos

3.2 Comparativo de los Datos Asociados al Consumo Eléctrico de la Planta Mariquita mediante Análisis Estadístico.

Considerado el escenario actual de operación y conforme al consumo que se registra, se toman las lecturas del monitoreo de consumo energético de las variables de potencia activa y reactiva (ver anexo 1), con el objetivo de determinar la dependencia entre ambas, conforme se está transportando un producto específico, para nuestro caso se toman los datos de los productos que presentan mayor resistencia al desplazamiento por su gravedad específica. Haciendo uso del programa estadístico SPSS13, realizamos una prueba para determinar la distribución de los datos seleccionados aplicando el test de Kolmogorov – Smirnov, debido a que se maneja gran cantidad de datos; las hipótesis para esta prueba se muestran a continuación:

Ho= Las variables se distribuyen de manera normal

Hi= las variables no se distribuyen de manera normal

Como se muestra en la tabla 2, la significancia $< 0,05$; entonces se rechaza Ho, por consiguiente los datos no se distribuyen de manera normal.

Es necesario entonces, tomar pruebas de carácter no paramétrico para realizar los análisis de correlación entre las variables.

¹³ IBM Corporation

3.2.1 Tratamiento de Datos con Pruebas No Paramétricas.

Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra

		Potencia Activa (KW)	Potencia Reactiva (KVAR)	Corriente (A)
N		96	96	96
Parámetros normales ^{a,b}	Media	1116,2340	407,2674	103,9063
	Desviación típica	127,78036	67,54172	12,30582
	Absoluta	,149	,149	,166
Diferencias más extremas	Positiva	,093	,103	,113
	Negativa	-,149	-,149	-,166
Z de Kolmogorov-Smirnov		1,457	1,463	1,624
Sig. asintót. (bilateral)		,029	,028	,010

a. La distribución de contraste es la Normal; b. Se han calculado a partir de los datos.

Tabla 2. Test de Kolmogorov-Smirnov. Fuente: SPSS.

3.2.2 Correlación de los Datos.

Correlaciones

		Potencia Activa (KW)	Potencia Reactiva (KVAR)	Corriente (A)
Potencia Activa (KW)	Correlación de Pearson	1	,993**	,914**
	Sig. (bilateral)		,000	,000
	N	96	96	96
Potencia Reactiva (KVAR)	Correlación de Pearson	,993**	1	,935**
	Sig. (bilateral)	,000		,000
	N	96	96	96
Corriente (A)	Correlación de Pearson	,914**	,935**	1
	Sig. (bilateral)	,000	,000	
	N	96	96	96

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

Tabla 3. Coeficientes de correlación de Pearson. Fuente: SPSS

Conforme a lo que se observa en la tabla 3, la significancia es cercana a 1 de 0,993, lo que significa que existe una alta correlación entre la potencia activa y reactiva, puesto que la potencia reactiva es dependiente de la potencia activa y de acuerdo a la proporción del factor de potencia medio (f.d.p.) como se evaluó anteriormente. Los resultados se observan en la tabla 3.

Ahora se requiere medir cuál es el grado o nivel de correlación entre las variables, el cual se mide mediante el coeficiente de Spearman, donde se observa que la proporcionalidad entre ambas variables está marcada, con una significancia cercana a 1 de 0.995, como se puede observar en la tabla 4.

			Correlaciones		
			Potencia Activa (KW)	Potencia Reactiva (KVAR)	Corriente (A)
Rho de Spearman	Potencia Activa (KW)	Coefficiente de correlación	1,000	,995**	,911**
		Sig. (bilateral)	.	,000	,000
		N	96	96	96
	Potencia Reactiva (KVAR)	Coefficiente de correlación	,995**	1,000	,921**
		Sig. (bilateral)	,000	.	,000
		N	96	96	96
	Corriente (A)	Coefficiente de correlación	,911**	,921**	1,000
		Sig. (bilateral)	,000	,000	.
		N	96	96	96

** . La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

Tabla 4: Coeficientes del grado correlación de Spearman. Fuente: SPSS.

En la Figura 10, finalmente se puede observar de manera gráfica la correlación entre las variables potencia activa y potencia reactiva, con los productos Biodiesel y gasolina Motor. La alta correlación entre estas variables suponen que existe una alta proporcionalidad, entonces el objetivo es disminuir esa proporcionalidad entre la potencia activa y la reactiva acudiendo a la implementación de prácticas operativas como por ejemplo la programación del transporte de productos pesados en horarios donde las

franjas tarifarias son más económicas; a nivel estructural también se pueden tomar acciones como cambio de equipos por unos más eficientes.

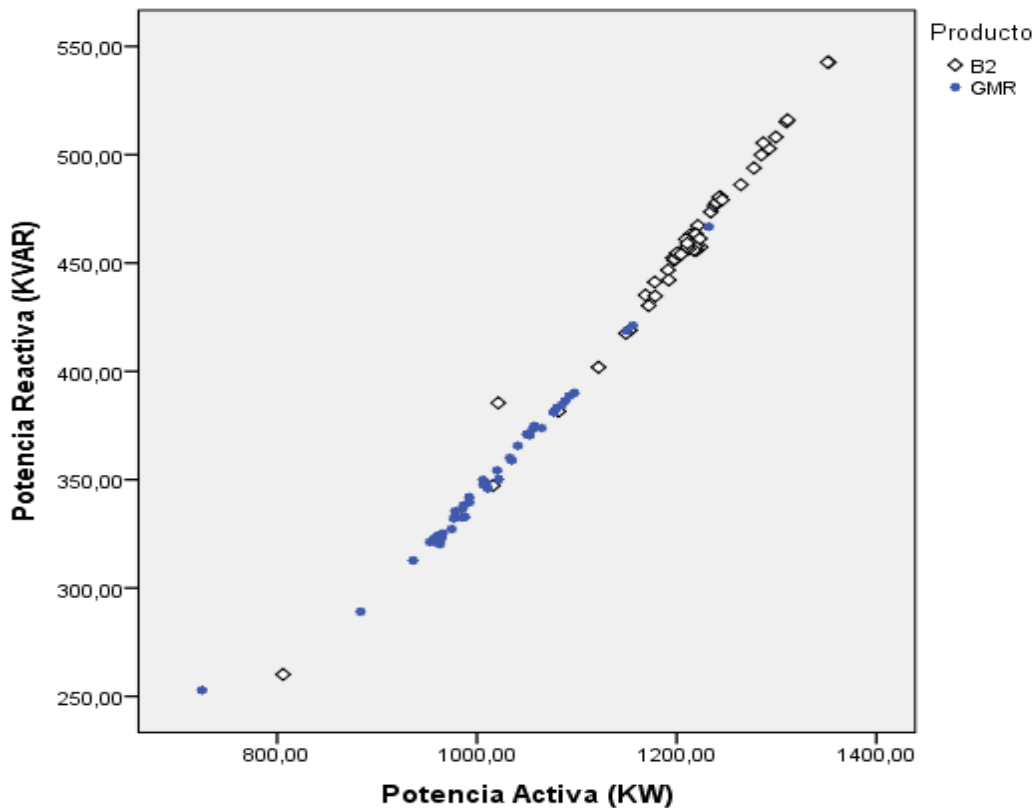


Figura 10: diagrama de dispersión para el análisis de correlación entre potencia activa y reactiva. Fuente: SPSS

La alta correlación entre la potencia activa y la potencia reactiva suponen que existe una alta proporcionalidad, entonces el objetivo es disminuir esa proporcionalidad entre la potencia activa y la reactiva acudiendo a la implementación de prácticas operativas como por ejemplo la programación del transporte de productos pesados en horarios donde las franjas tarifarias son más económicas; a nivel estructural también se pueden tomar acciones como cambio de equipos por unos más eficientes.

3.3 Alternativa Propuesta Para alcanzar mejores prácticas en Eficiencia Energética.

Realizado el análisis del consumo energético de la Planta Mariquita en el estado actual, teniendo en cuenta que el mayor impacto lo genera el motor de la unidad principal de 1.500 HP, se tiene como objeto proponer seguidamente las alternativas que se ajustan al esquema operacional del sistema Salgar – Cartago. Estas alternativas han sido estudiadas anteriormente a nivel de área técnica pero no han sido soportadas en un esquema de costos. Como base para este análisis se acude a datos suministrados por el Departamento de Ingeniería y Confiabilidad de la Vicepresidencia de Transporte, con un estudio realizado en el año 2003, soportados por el Técnico Mecánico del área ODECA - ECOPETROL Jairo Alberto Canal Rivera, donde se modelaron diferentes configuraciones de esquemas de bombeo; las alternativas se soportaron en el flujo promedio diario de bombeo y consumo promedio de potencia; los datos de ese estudio son sintetizados en la Tabla 5, haciendo énfasis en el costo por barril transportado de acuerdo al consumo estimado de las diferentes alternativas.

Este escenario de alternativas no pretende aportar como un estudio de ingeniería conceptual, pues solo hace énfasis en la instalación Planta Mariquita y no relaciona otros actores del sistema Salgar- Cartago.

Revisando la tabla se observa que la alternativa número cuatro (4) presenta un menor consumo energético para la Planta Mariquita, pero depende de las condiciones generadas por la Planta Salgar en algunos casos; este dato es esencial para poder comparar el resultado propuesto a través de unos cálculos hidráulicos que necesariamente deben incluir condiciones de las variables en la Plantas ubicadas aguas arriba y aguas abajo, es decir, las Plantas Salgar y Fresno.

ALTERNATIVA	FLUJO promedio	KW	Diferencia	KWh/bl	\$ bl trans (Dólares)	Ahorros/día	Ahorros/mes
1. Equipo Existente en Salgar y MARIQUITA con Variador y 11 etapas	24.4	622	-	25.5	91.84	-	-
2. Equipo Existente en Salgar y MARIQUITA con Variador y 9 etapas	24.4	580	42.31	23.8	85.60	149,830	4,494,892
3. Equipo Existente en Salgar y MARIQUITA con Variador y 7 etapas	24.4	536	86.03	22.0	79.15	304,635	9,139,057
4. Equipo Existente en Salgar y MARIQUITA sin Variador y 11 etapas	24.3	500	122.19	20.6	74.12	425,374	12,761,215
5. DVMX en Salgar 11 stg y MARIQUITA sin Variador y 11 etapas	26.9	555	67.62	20.6	74.26	422,042	12,661,270
6. DVMX en Salgar 10 stg y MARIQUITA sin Variador y 11 etapas	26.66	548	74.83	20.5	73.95	429,352	12,880,547
7. DVMX en Salgar 11 stg y MARIQUITA con Variador y 11 etapas	27.89	741	-118.03	26.6	95.58	-89,836	-2,695,073

Tabla 5: Resultados Estudio adelantado por el Departamento de Ingeniería y Confiabilidad de la Vicepresidencia de Transporte. Fuente: Ecopetrol S.A.

Validados los resultados se plantea entonces la siguiente propuesta:

3.3.1 Retirar actual variador de velocidad y operar con válvula de control.

Esta alternativa contempla desmontar el actual variador de velocidad y realizar el montaje de un motor eléctrico de menor capacidad de 1.500 HP a 1.000 HP con acople

directo a la bomba, manejando las variables de la estación con válvula de control y no por las revoluciones por minuto (r.p.m.) del motor actual.

3.3.2 Ventajas

- Reducción hasta de un 25 % en los valores de consumo de energía en la Planta Mariquita, sin incluir alumbrado perimetral y otros elementos eléctricos.
- Retirar un mal actor en el sistema Salgar – Cartago
- Diminución de equipos para mantenimiento en las especialidades de Electricidad, Mecánica y Controles.
- Disminución de costos por mantenimiento correctivo.
- Ejecución de la alternativa en un tiempo de 4 semanas, estimado según un cronograma planteado a partir de las facilidades inmediatas.
- En el tema de salud ocupacional se interviene un riesgo físico en la fuente al cambiar el actual motor ASGEN por uno SIEMENS, logrando reducir los valores de ruido de 104 Db (decibeles) a 96.2 Db (decibeles), con lo que se obtiene un mejor ambiente de trabajo.

3.3.3 Desventajas

Se requeriría operar sin equipo de respaldo durante la fase de la implementación de la alternativa, que puede originar algún tipo de paro de bombeo, con consecuencias en el incumplimiento al abastecimiento de combustibles para la zona del eje cafetero; sin embargo las áreas implicadas para sacar adelante esta propuesta implementarían un plan de acción que no supere las 24 horas de paro en el poliducto, para esto ubicará equipos de similares características a la unidad de respaldo Diesel que permitan únicamente realizar el cambio. Se debería realizar la compra de una válvula de control lo que aumenta los plazos en la ejecución de esta propuesta 3 meses aproximadamente. El análisis hidráulico del sistema Salgar – Cartago indica que se requeriría la consecución de una válvula de control con un diámetro entre cuatro pulgadas (4”) y seis pulgadas (6”). Para determinar esta relación se realizan los cálculos hidráulicos con la ayuda del grupo de optimización

hidráulica de la Vicepresidencia de Transporte y del Técnico Mecánico Jairo Alberto Canal, los que se plasman en la Tabla 6 para modelar los comportamientos del transporte de Biodiesel, Gasolina Motor y GLP (Gas Licuado de Petróleo) con la alternativa de las válvulas:

Producto	Flujo (BPH)	Flujo (g.p.m.)	Gravedad específica (S.G.)	Coefficiente de la válvula (Cv).	Diámetro válvula (pulgadas)	% apertura válvula	Delta P válvula (psig)	Potencia (HP)	Potencia (KW)	Energía (KWH / año)	Tarifa energía (Pesos/KWH)	Costo energía año (Miles de pesos)
Biodiesel	1000	700	0,87	95	4"	100%	47,2	19,3	14,4	113440	200	22687,9
	1000	700	0,87	165	6"	100%	15,7	6,4	4,8	37605	200	7520,9
	1000	700	0,87	81	4"	80%	65	26,5	19,8	156042	200	31208,4
	1000	700	0,87	119	6"	80%	30,1	12,3	9,2	72297	200	14459,3
	1000	700	0,87	47	4"	50%	193	78,8	58,8	463464	200	92692,8
	1000	700	0,87	58	6"	50%	126,7	51,7	38,6	304338	200	60867,5
Gasolina Motor	1000	700	0,74	95	4"	100%	40,2	16,4	12,2	96489	200	19297,7
	1000	700	0,74	165	6"	100%	13,3	5,4	4,1	31986	200	6397,1
	1000	700	0,74	81	4"	80%	55,3	22,6	16,8	132726	200	26545,1
	1000	700	0,74	119	6"	80%	25,6	10,5	7,8	61494	200	12298,7
	1000	700	0,74	47	4"	50%	164,1	67	50	394211	200	78842,2
	1000	700	0,74	58	6"	50%	107,8	44	32,8	258862	200	51772,4
G.L.P.	1000	700	0,555	95	4"	100%	30,1	12,3	9,2	72367	200	14473,3
	1000	700	0,555	165	6"	100%	10	4,1	3	23989	200	4797,8
	1000	700	0,555	81	4"	80%	41,4	16,9	12,6	99544	200	19908,8
	1000	700	0,555	119	6"	80%	19,2	7,8	5,8	46120	200	9224
	1000	700	0,555	47	4"	50%	123,1	50,3	37,5	295658	200	59131,6
	1000	700	0,555	58	6"	50%	80,8	33	24,6	194147	200	38829,3

Tabla 6. Cálculos Hidráulicos para las válvulas con diámetros de cuatro y seis pulgadas, comportamiento con productos GLP, Gasolina Motor y Biodiesel. Fuente: grupo interdisciplinario - Ecopetrol.

La mejor alternativa la presenta la instalación de una válvula de 6 pulgadas pues representa el menor gasto energético que se verá reflejado en costos de operación. Esta tendencia se puede observar en la figura 11:

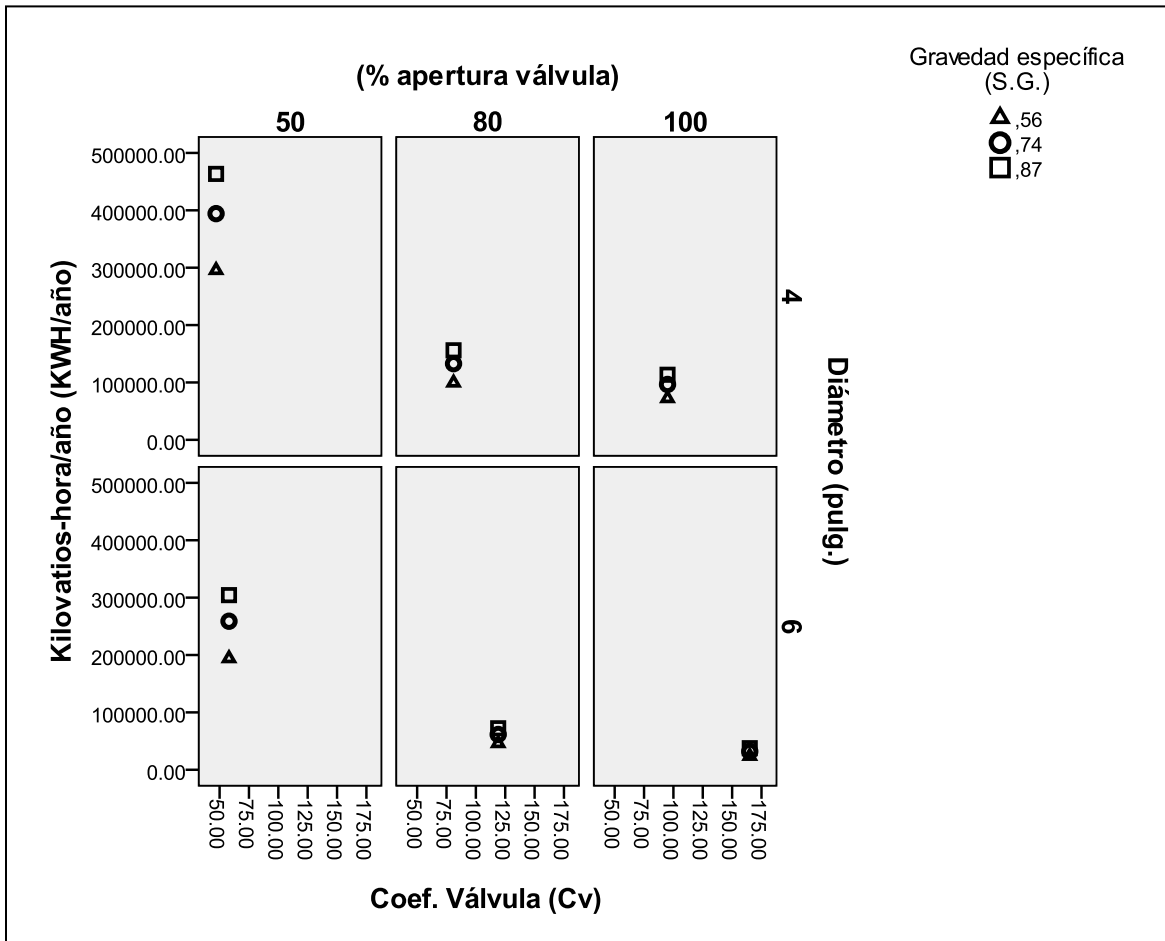


Figura 11. Diagrama de correlación para las diferentes alternativas. Fuente: SPSS

Es claramente notable la demanda energética con la válvula de 4 pulgadas, frente al consumo energético de la válvula de 6 pulgadas. El propósito de la válvula de control es el de reemplazar la acción que ejecuta un variador de velocidad en un sistema de bombeo de productos por ducto, realizando una acción de contrapresión o caja cuando se está desplazando producto a través del ducto desde otra unidad funcional que se encuentra aguas arriba del sistema, a una distancia considerable y con los efectos que pueda generar el perfil topográfico sobre el comportamiento hidráulico del sistema.

4. Conclusiones

Realizado el análisis de la situación energética en la Planta de bombeo Mariquita ECOPETROL, se obtuvo un análisis en el que se pudo ejecutar un estudio base donde se determina que el modelo de gestión energética planteado, puede generar ahorros significativos.

Las condiciones del consumo de energía eléctrica en la Planta Mariquita, luego del diagnóstico en las condiciones actuales, reflejan que la operación posee problemas de eficiencia en el uso de recursos involucrados.

Al obtener el comparativo del esquema actual de consumo frente a la alternativa de eficiencia energética planteada, se esperan ahorros entre el 15% al 18% en costos de energía, que representan alrededor de doscientos millones (\$180.000.000) anuales.

El costo de mantenimiento (repuestos, insumos, disposición de residuos y ejecución horas-hombre) podría representar un ahorro anual estimado en veintitrés millones de pesos (\$23.000.000).

La confiabilidad de la operación se verá beneficiada en cuanto la instalación propuesta de la válvula de control con diámetro 6 pulgadas; presentaría una menor frecuencia de intervención por mantenimiento preventivo y correctivo, menor impacto ambiental por la eliminación del uso de aceite de variador, y la simplificación de las líneas de proceso implicadas, pues el retiro del variador hace innecesario el uso del intercambiador de calor que ayuda a refrigerar el aceite que recircula en el variador.

Definidos los parámetros para la optimización del uso de energía eléctrica en la Planta Mariquita, es posible ajustar en las condiciones actuales planes de acción inmediatos enfocados en la operación de los equipos actuales, teniendo como base la programación de los productos refinados que se van a desplazar a través del poliducto Salgar - Cartago. Estas acciones se verán reflejadas en mejores prácticas de operación de los equipos de bombeo.

Los métodos de sintonía de algoritmos de control también favorecen la optimización de los sistemas, particularmente para el Poliducto Salgar - Cartago se tiene una verificación periódica de la sintonía de los lazos de control, en la Plata Mariquita aplica para el variador de velocidad; conforme se van desgastando los discos el algoritmo se regula automáticamente, sin embargo en el tiempo se va acumulando un error residual que con la instalación de un sistema de válvula de control sería casi nulo.

5.Recomendaciones

Los resultados del análisis realizado representan un insumo importante para presentar propuestas concretas de mejora, en la infraestructura instalada para la ejecución del servicio de transporte por ductos en la Planta Mariquita. La necesidad de reducir el consumo energético, influye en varios aspectos relevantes dentro de los indicadores de gestión que maneja ECOPETROL en todos sus negocios, particularmente en la Vicepresidencia de Transporte y en la Gerencia de Poliductos; dentro de los indicadores clave de gestión se encuentran los de indicadores de gestión financiera y los indicadores de impactos ambientales. Es así como la alternativa presentada de reemplazar el motor y variador de velocidad de la Unidad de Bombeo principal Planta Mariquita, para instalar un motor menos potente, más eficiente y acompañado de una válvula de control, genera mucho beneficios tanto económicos, como otros intangibles que son la mayor disponibilidad confiabilidad de los equipos en operación.

Otros elementos que pueden aportar a la reducción del consumo energético en la Planta Mariquita están relacionados con otros equipos asociados a la operación y que impactan altamente el incremento de la potencia reactiva, como las luminarias que tienen un alto grado de obsolescencia y pueden ser cambiadas por otra tecnología más eficiente en el consumo.

Es necesario replantear la programación del transporte de productos refinados por el sistema Salgar - Cartago, de manera que se aprovechen los márgenes horarios en donde la tarifa de energía impacte, es decir, programar el transporte de productos pesados como el Biodiesel dentro de las franjas horarias comprendidas entre las 10 PM y las 6 AM; esta práctica requiere un estudio más riguroso de la dinámica de programación de despacho de los diferentes productos refinados del petróleo que son transportados por el sistema Salgar - Cartago.

Se tiene soporte suficiente para realizar la propuesta del cambio de motor y variador actualmente instalados en Planta Mariquita por válvula de control y motor menos potente, con argumentos expresados en términos de costos y confiabilidad. Se aconseja de igual

manera que la propuesta se remita al área de desarrollo de transporte (Ingeniería), con el propósito de recibir un aval a nivel de proyecto, para posteriormente ser validado ante la Vicepresidencia de Transporte ECOPETROL S.A.

6. Anexos.

Anexo A. datos del muestreo Planta Mariquita ECOPETROL S.A. para potencia activa y reactiva, de acuerdo al producto transportado

PRODUCTO	FLUJO	VOLTAJE	AMPERAJE	E. ACTIVA	E. REACTIVA	TARIFA
B2	1054,91	6304,00	113,00	1223,92	457,40	182,74
B2	1025,71	6270,00	112,00	1219,33	455,71	183,84
B2	1028,67	6317,00	112,00	1218,61	456,19	183,91
B2	1050,88	6336,00	113,00	1219,33	457,64	183,99
B2	1041,79	6332,00	112,00	1217,40	455,95	188,52
B2	1043,85	6331,00	112,00	1211,61	456,44	187,18
B2	1053,88	6321,00	113,00	1234,07	473,58	188,10
B2	1041,79	6266,00	116,00	1237,93	476,48	187,15
B2	1027,67	6289,00	117,00	1239,38	477,45	186,69
B2	1072,12	6309,00	115,00	1239,86	477,93	189,99
B2	1120,60	6294,00	119,00	1243,73	480,59	189,42
B2	1137,84	6295,00	119,00	1168,86	435,18	189,59
B2	1121,63	6311,00	111,00	1178,04	441,22	186,55
B2	1129,62	6331,00	110,00	1196,15	452,33	186,36
B2	1143,93	6323,00	110,00	1214,02	463,20	186,16
B2	1174,10	6356,00	112,00	1209,19	461,02	186,67
B2	1143,90	6348,00	111,00	1242,52	480,34	187,80
B2	1177,17	6343,00	116,00	1245,42	479,14	188,67
B2	1161,98	6301,00	117,00	1284,78	499,91	190,70
B2	1157,92	6230,00	123,00	1277,29	493,87	189,20
B2	1164,88	6268,00	122,00	1299,27	508,12	190,90
B2	1153,83	6259,00	121,00	1292,51	502,80	188,19
B2	1136,62	6259,00	120,00	1021,30	385,43	188,96
B2	919,85	6343,00	102,00	1081,68	381,57	183,99
GMR	953,38	6360,00	100,00	1088,20	386,16	182,74
GMR	985,38	6358,00	100,00	1079,75	383,02	183,84
GMR	960,24	6376,00	98,00	1076,85	381,09	183,91
GMR	954,15	6430,00	94,00	1064,77	373,84	183,99

GMR	962,30	6366,00	96,00	1034,83	358,87	188,52
GMR	973,26	6361,00	92,00	1052,70	370,46	187,18
GMR	1004,53	6345,00	99,00	1006,09	349,93	188,10
GMR	870,47	6283,00	89,00	959,72	323,85	187,15
GMR	867,57	6238,00	89,00	978,32	335,44	186,69
GMR	873,67	6320,00	90,00	992,32	341,96	189,99
GMR	922,05	6335,00	92,00	1006,57	347,76	189,42
GMR	932,20	6299,00	95,00	1009,47	348,24	189,59
GMR	909,12	6264,00	94,00	1007,30	348,00	186,55
GMR	919,02	6273,00	93,00	1032,90	360,08	186,36
GMR	946,28	6297,00	97,00	1055,84	373,36	186,16
GMR	959,53	6304,00	98,00	1057,29	374,81	186,67
GMR	959,50	6316,00	97,00	1050,04	370,94	187,80
GMR	950,44	6342,00	97,00	1040,87	365,63	188,67
GMR	924,17	6350,00	94,00	1156,30	421,18	190,70
GMR	1084,30	6301,00	109,00	1150,27	418,76	189,20
GMR	1064,16	6305,00	106,00	1097,62	390,02	190,90
GMR	1022,84	6315,00	98,00	1084,82	384,47	188,19
GMR	1018,78	6398,00	98,00	1092,55	388,57	188,96
GMR	1006,72	6339,00	98,00	1232,13	466,82	183,99
B2	1201,95	6310,00	116,00	1264,25	486,14	182,74
B2	1172,81	6304,00	119,00	1309,90	515,12	183,84
B2	1160,73	6290,00	123,00	1352,16	542,65	183,91
B2	1171,69	6298,00	127,00	1351,19	542,65	183,99
B2	1188,90	6286,00	126,00	1311,10	516,09	188,52
B2	1157,66	6279,00	124,00	1286,71	505,46	187,18
B2	1136,42	6191,00	124,00	1197,36	451,36	188,10
B2	1058,97	6230,00	113,00	1197,84	451,85	187,15
B2	1077,15	6285,00	113,00	1201,22	454,50	186,69
B2	1089,36	6310,00	111,00	1205,09	454,99	189,99
B2	1140,74	6320,00	111,00	1210,16	457,40	189,42
B2	1157,05	6352,00	112,00	1210,64	459,09	189,59
B2	1175,13	6366,00	112,00	1200,01	454,50	186,55
B2	1172,10	6394,00	114,00	1191,32	446,78	186,36
B2	1157,08	6298,00	111,00	1204,36	454,02	186,16
B2	1160,11	6269,00	114,00	1218,85	463,20	186,67
B2	1189,32	6290,00	116,00	1221,27	467,30	187,80
B2	1186,32	6310,00	112,00	1219,09	463,44	188,67
B2	1155,99	6354,00	113,00	1223,20	461,27	190,70
B2	1137,65	6228,00	115,00	1192,04	442,19	189,20
B2	1109,45	6278,00	111,00	1178,52	434,70	190,90
B2	1085,21	6309,00	108,00	1172,00	430,35	188,19
B2	1064,09	6219,00	111,00	1153,16	419,00	188,96
B2	1028,74	6252,00	107,00	1149,30	417,55	183,99

B2	1009,62	6285,00	106,00	1121,77	401,86	182,74
B2	987,45	6257,00	103,00	1015,99	347,28	183,84
GMR	840,37	6323,00	93,00	1010,92	345,83	183,91
GMR	830,28	6325,00	91,00	1021,79	350,18	183,99
GMR	876,63	6316,00	92,00	988,22	332,79	188,52
GMR	874,60	6269,00	88,00	984,60	332,55	187,18
GMR	872,54	6282,00	90,00	1020,34	354,28	188,10
GMR	879,63	6336,00	92,00	960,20	323,85	187,15
GMR	847,49	6280,00	86,00	936,30	312,74	186,69
GMR	811,36	6299,00	86,00	724,74	252,85	189,99
GMR	805,69	6351,00	85,00	992,57	339,55	189,42
GMR	907,78	6313,00	91,00	985,08	336,41	189,59
GMR	923,18	6312,00	90,00	986,77	338,10	186,55
GMR	910,87	6362,00	90,00	976,87	332,06	186,36
GMR	885,89	6307,00	88,00	965,52	325,06	186,16
GMR	980,33	6278,00	88,00	957,55	321,44	186,67
GMR	976,12	6300,00	87,00	952,96	321,20	187,80
GMR	846,41	6332,00	89,00	956,10	322,40	188,67
GMR	844,35	6356,00	87,00	962,86	320,23	190,70
GMR	836,06	6318,00	86,00	964,79	323,85	189,20
GMR	832,84	6356,00	86,00	964,07	322,40	190,90
GMR	844,22	6331,00	87,00	974,69	327,23	188,19
GMR	875,31	6353,00	88,00	883,41	289,08	188,96
B2	960,33	6335,00	82,00	805,89	260,10	183,99

Anexo B. Emisiones indirectas de Gases de Efecto Invernadero para la Vicepresidencia de transporte en el primer trimestre de 2011.

Tipo de Fuente	Fuente	Emisión (toneladas/trimestre)			
		GASES DE EFECTO INVERNADERO			
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ e
Emisiones por Fuentes Indirectas	Electricidad importada	15.233,32	0,27	0,18	15.293,60
	Vapor importado	NA	NA	NA	NA
	Electricidad importada en pozos	NA	NA	NA	NA
	Total Indirecta	15.233,32	0,27	0,18	15.293,60
TOTAL INDIRECTAS	(toneladas)	15.233,32	0,27	0,18	15.293,60

Tipo de Fuente	Emisiones Primer Trimestre 2011 (toneladas/trimestre)				
	CONTAMINANTES CRITERIO				
	NO _x	SO _x	CO	MP	VOC
Combustión	2.002,63	149,50	812,26	57,88	130,48
Transporte Propiedad ECP	0,03	0,00	0,06	0,00	0,01
Venteo/Proceso	ND	ND	ND	ND	817,83
Fuentes Fugitivas	ND	ND	ND	ND	93,70
Teas	0,01	ND	0,08	0,00	ND
Consumo Electricidad	33,77	6,11	80,53	9,90	0,49

Emisiones de NO _x por Tipo de Fuente	Emisiones de NO _x para Cada Periodo de Estudio (toneladas)				
	Primer Trimestre	Segundo Trimestre	Tercer Trimestre	Cuarto Trimestre	2011
Combustión	2.002,63	1.704,20	ND	ND	3.706,83
Transporte Propiedad ECP	0,03	0,02	ND	ND	0,05
Venteo/Proceso	ND	NA	ND	ND	ND
Fuentes Fugitivas	ND	NA	ND	ND	ND
Teas	0,01	0,01	ND	ND	0,02
DIRECTA NOX	2.002,67	1.704,22	0,00	0,00	3.706,90
Consumo Electricidad	33,77	27,79	ND	ND	61,56
INDIRECTA NOX	33,77	27,79	ND	ND	61,56
TOTAL NOX	2.036,44	1.732,02	0,00	0,00	3.768,46

7. Bibliografía.

API, A. P. (Febrero de 2004). *www.api.org*. Recuperado el 20 de mayo de 2011, de http://www.api.org/ehs/climate/new/upload/2004_COMPENDIUM.pdf

basica, G. y. (19 de 11 de 2011). *PEMEX*. Obtenido de www.gas.pemex.com

Campos Avella, J. C., Prías Caicedo, O. F., Quispe Oqueña, E. C., Vidal Medina, J. R., & Lora Figueroa, E. D. (2008). El MGIE, un modelo de gestión energética para el sector productivo nacional. *El Hombre y la Máquina*, 18 - 31.

Development, W. B. (16 de 11 de 2011). *World Business Council for Sustainable Development (WBCSD)*.

DIN. (16 de 11 de 2011). *Energy Consulting*. Obtenido de Fuente: <http://www.energy-consulting-allgaeu.de/1/energie-consulting/our-services/din-en-16001-and-iso-50001-certification/>.

Dinghua, Z., Jigeng, L., Huanbin, L., & Jinsong, T. (2009). Research on “Three-links” energy management MAS. *Management and Service Science, 2009. MASS '09. International Conference on*, 1-4.

Hepbasli, A., & Ozalp, N. (2003). Development of energy efficiency and management. *Energy Conversion and Management* 44, 231-249.

Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. (1996). *IEEE Recommended Practice for Energy Management in Industrial and Commercial Facilities*. New York: IEEE Std 739-1995.

MCCOWN, B. A., & THEISS, D. W. (2008 йил 19-3). *SAFEGUARDING THE ENERGY PIPELINE*. Retrieved 2011 йил 15-Marzo from Texas Journal of Oil, Gas, and Energy Law: <http://www.tjogel.org/archive/Vol3No1/McCown.pdf>

Salamanca, U. d. (5 de 11 de 2011). *Pagina Institucional*. Obtenido de <http://campus.usal.es/~electricidad/Principal/Circuitos/Diccionario/Inicio.php>

Schlieter, H., Jührisch, M., & Niggemann, S. (2010). *THE CHALLENGE OF ENERGY MANAGEMENT – STATUS QUO AND PERSPECTIVES FOR REFERENCE MODELS*. Retrieved 2011 йил 15-Marzo from <http://www.pacis-net.org/file/2010/S10-01.pdf>.