

# Eficiencia Energética: ¿El Futuro en la Supervisión de Activos?

Eliana Carranza, Jhon Ussa, Javier González

OCENSA – Carrera 11 No. 84-09 Piso 10 PBX. 3250200

E.mail: eliana.carranza@ocensa.com.co, jhon.ussa@ocensa.com.co, Javier.gonzalez@ocensa.com.co

Bogotá, D.C. – Colombia

## Resumen

Las nuevas tecnologías basadas en el seguimiento de la operación han contribuido con la optimización en la operación de activos, reduciendo la energía consumida y cuidando su integridad. Actualmente se cuenta con un modelo de simulación hidráulica que permite tomar decisiones operativas para cumplir con los programas de bombeo dentro de los márgenes funcionales y de seguridad. Sin embargo, este sistema no avala el mejor uso de los equipos de bombeo y por lo tanto no garantiza una operación eficiente que disminuya el mantenimiento de los equipos, por lo que se hace necesario diseñar una herramienta a través de la implementación de un sistema PIMS (Plant Information Management System) con visualización de indicadores de alto desempeño, el cual tiene una interconexión directa con el sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) que facilita el seguimiento de la eficiencia de los equipos de bombeo y su desempeño operativo en tiempo real, con el fin de tomar decisiones rápidas que permitan un ahorro energético y económico; el presente documento describe dicha herramienta de monitoreo y los resultados obtenidos en la disminución de la frecuencia y costos de mantenimientos de reparación de equipos rotativos y sus motores.

Actualmente muchas de las empresas de desarrollo de SCADA y DCS utilizan PIMS para extender el mercado no solo a la supervisión de procesos sino que adicional incluyen herramientas como el PIMS con la cual se logra monitorear parámetros poco convencionales y optimizar la vida útil de los equipos, dentro de este grupo se encuentran fabricantes como Foxboro [3], INDRA[4] y Yocogawa[5], nuestro proyecto fue desarrollado bajo Exaquantum de Yocogawa.

## Nomenclatura

P	Potencia
$\eta$	eficiencia
$\tau$	Torque
$\omega$	Velocidad angular
BEP	Punto de mejor eficiencia (inglés)
LCC	costo de ciclo de vida (inglés)
OEE	Eficiencia global de planta (inglés)

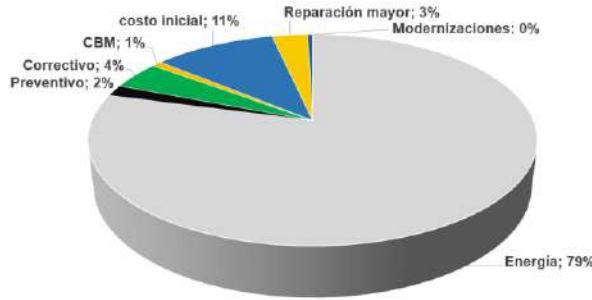
## Introducción

OCENSA, Oleoducto Central S.A., es la compañía colombiana encargada de transportar los crudos del piedemonte llanero, producidos en la región de Casanare y Meta, hasta el terminal marítimo de Coveñas. El oleoducto presenta una longitud aproximada de 830 km y cruza los departamentos de Casanare, Boyacá, Santander, Antioquia, Córdoba y Sucre. Hoy en día, el Oleoducto consta de 11 estaciones las cuales cuentan con diferentes modalidades de consumo energético con características de usuarios no regulados

Realizar el proceso de transporte de forma eficiente en líneas de centenares de kilómetros, en las condiciones geográficas colombianas de alto relieve, controlando esquemas multivariante (presión, caudal, temperatura, viscosidad, manejo de diferentes calidades), cumpliendo con las restricciones de aferentes y efluentes, y bajo estrictas condiciones de seguridad, no es tarea fácil. Aun con un sistema altamente robusto, controlado por SCADA y con sistemas inteligentes de planeación y optimización de programa, la revisión de variables tradicionalmente secundarias, tales como la eficiencia de bombeo, se realizan con retraso respecto a la ejecución del bombeo, lo que hace que las acciones de mejora y/o corrección sean tardías lo que impacta igualmente el mantenimiento y disponibilidad de equipos por una posible operación del sistema sujeta a oportunidades de mejora.

Por lo anterior, la operación y el mantenimiento deben trabajar en conjunto para cumplir un mismo propósito. Respecto al cuidado de los activos físicos, el personal que ejecuta el mantenimiento tiene una visión profunda del más mínimo detalle de cada componente relacionando de una manera idónea la parte que ha fallado, con la menor descripción del ruido, vibración, olor que ha relatado el personal de operación en campo. Por otra parte, el personal de operaciones identifica claramente con cuales activos prefiere trabajar, pues en su día a día identifica que equipos son más confiables, cuales se encuentran disponibles, y con cuales producen más en menor tiempo.

Conjugando estos dos valiosos tipos de conocimientos, se han logrado importantes resultados en cuanto al desempeño y eficiencia de equipo de bombeo, que han redundado en una mejora notable de la confiabilidad y los costos de operación. En el desarrollo de las actividades propias de la gestión de los activos, alineado con un análisis de costo de ciclo vida LCC realizado sobre estos activos, se conoce que gran parte de los costos del Ciclo de vida del equipo de bombeo, en su proyección a 15 o más años, aproximadamente entre el 70% y 80% del costo se encuentra concentrado en la energía consumida y el restante en otros costos como el costo inicial y el mantenimiento, como se muestra en la figura 1. Este hecho resalta aún más la importancia de que la operación y el mantenimiento deben trabajar de la mano. Resultado de esta integración nació en la operación un PIMS (Plant Information Management System) el cual permite calcular indicadores y tiene una interconexión directa con el sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), de este modo, ahora el personal de la operación, puede ver en tiempo real variables como el torque y la potencia, y el punto operativo dentro de la curva de la bomba, que le permiten operar los activos dentro de los mejores rangos establecidos por los fabricantes, logrando las más altas eficiencias y rendimientos de los motores y las bombas; como lo establece [5], actualmente el uso del internet nos permite procesar en línea cualquier cantidad de datos, analizarla y soportar la toma de decisiones y eso hacemos con PIMS.



*Fig 1. Resultados de un LCC con data real para un motor de combustión interna a 20 años.*

#### Historia de los primeros inicios hacia un sistema de control por carga

En la experiencia con equipo de bombeo, cuando se analizan en términos generales los hechos relevantes del mantenimiento, se encuentra que han ocurrido simultáneamente con grandes cambios a nivel operativo. No es una coincidencia, ni una conclusión sorpresiva, pero debería ser un indicativo de que es momento de introducir nuevas variables técnicas al proceso de “operar”.

De allí se originó la iniciativa de introducir un PIMS a

las operaciones. Anecdóticamente, en Ocensa surgió a partir de una serie de daños catastróficos y nuevos modos de falla observados en motores de bombas centrífugas, que tenían indicios de relacionarse con alta carga tales como pérdida excesiva de material en cigüeñales, daño en conjuntos motrices, camisas, culatas, excesiva vibración, alta temperatura en la carcasa, etc. Si bien era cierto, las condiciones operativas habían venido cambiando en los últimos años, los análisis de causa raíz no habían sido concluyentes y vinculantes con la operación, pues se carecía en ese momento de sistemas de medición robustos que pudieran probar una sobrecarga, además, no se explicaba cómo los daños podrían estar materializando, meses e incluso años después de los cambios, incluso se analizaron otros aspectos como fallas en la lubricación, calidad del combustible, repuestos, etc.

El área de operaciones continuaba operando bajo los límites de velocidad y el rango de flujo y presión establecido por el sistema de control, sin embargo, ninguna de estas dos variables estaba en capacidad de cuantificar la carga real sobre los motores. Evidentemente la potencia y el torque eran variables fuera de control, pero que dados los nuevos requerimientos de la compañía, se habían vuelto relevantes.

La primera medición puntual de torque, llevada a cabo hace cerca de 5 años, a través de un montaje básico con galgas extensiometrías, mostró sobrecarga. Esta primera evidencia, acrecentó el interés por aproximarse a una medición continua de la carga, tratando de entender esa estrecha margen entre la operación y el mantenimiento.

El torque es entendido como la relación que guardan la potencia y la velocidad angular.

$$P_{mecánica} = \tau * \omega$$

Al no contar, ni con la medición de torque ni de potencia, a través de la información capturada por los sistema de control, se formuló la primera estimación de la potencia mecánica, partiendo de la potencia hidráulica (conocida, es parte del proceso productivo el flujo, la presión y el fluido) y asumiendo una eficiencia de la bomba de acuerdo a su curva de desempeño. Esto se aplicó a más de 30 motores de combustión y 15 eléctricos. En la figura 2 se observan datos de potencia y torque estimados por este medio en un motor de combustión.

$$P_{mecánica} = \frac{P_{hidráulica}}{\eta_{bomba}}$$

Con este sistema, se logró identificar la combinación aproximada de variables hidráulicas que estaban siendo percibidas como alta carga por el motor. A raíz de esto se implementaron medidas tales como aumentar el número de equipos en operación (modificación del

esquema operacional). Las fallas catastróficas se redujeron y los costos y recursos asociados a la atención de correctivos se vieron igualmente impactados de manera positiva.

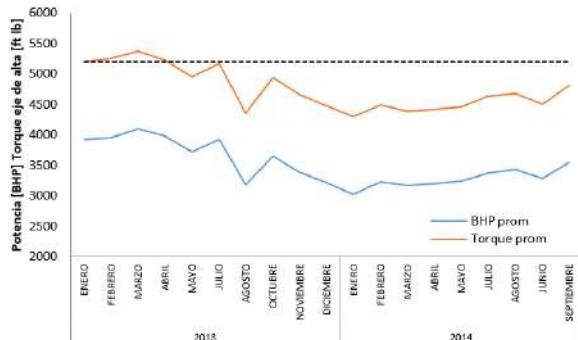


Fig 2. Resultados de torque y potencia evidenciados mediante aproximación teórica

#### ¿En qué momento migramos de un sistema manual de control de carga a uno automatizado y cómo influyó la eficiencia energética?

Con el caso anterior, podemos observar lo que sería un caso de éxito para el mantenimiento que representó una ganancia para el cumplimiento de los programas de bombeo por aumento de la disponibilidad. No obstante, como se mencionaba anteriormente, la mayor parte de los costos del ciclo de vida de un equipo de bombeo corresponden a la energía, la cual está directamente relacionada con la eficiencia de los activos. En este caso particular, con la solución de un problema de mantenimiento se hizo más evidente una gran brecha a cerrar en cuanto al desempeño y eficiencia energética de los equipos: el aumento de uso de maquinaria para favorecer una condición de mantenimiento, incrementó los costos de la energía.

Ante estos dilemas, surgen inquietudes tales como ¿es mejor llevar a falla e incurrir en los costos de reparación e indisponibilidad o es mejor pagar los sobrecostos de energía? Y si ocurren cambios en la operación, ¿la respuesta a lo anterior seguiría siendo la misma? ¿Cómo sería un sistema que se adapte casi en tiempo real a los nuevos requerimientos?

Como anota John Moubray, el mantenimiento existe para asegurar que los activos físicos continúen haciendo lo que los usuarios esperan que hagan [1]. La respuesta a lo anterior por lo tanto no es dejar que ocurra la falla, pero es una oportunidad que se presenta para empezar a hablar de optimización energética.

Como se observa en la figura 2, iniciando 2013 se empezó el primer seguimiento por carga en motores, y durante ese año se tomaron las medidas correctivas hacia

la operación. Sin embargo, finalizando el 2014 e iniciando 2015 vinieron nuevos cambios operacionales donde la carga se incrementó nuevamente, y volvieron las fallas. Con las lecciones aprendidas del pasado, se volvió a hacer énfasis en la carga máxima de los equipos. Sin embargo, ante el temor de operar en sobrecarga, los equipos empezaron a ser sometidos a regímenes de carga demasiado bajos y alejados de su punto de mejor Operación, BEP, que recrudeció la situación de alto consumo energético. Inclusive sobre los activos también se vieron impactos tales como la alta vibración y alta temperatura en cojinetes por operación en una zona de baja eficiencia tanto del motor como de la bomba (que si bien no traían daños catastróficos inmediatos, en el largo plazo representaba desgaste de los activos). Y quizás la consecuencia de mayor impacto para el negocio, fue la disminución de la capacidad máxima de la planta (eficiencia de planta global, OEE).

Por otra parte, ese período además de ver una reducción del torque y la potencia promedio de la maquinaria, secundariamente se pudo obtener una primera medida de la eficiencia del equipo de bombeo. En los equipos eléctricos a través los medidores de la energía eléctrica consumida, se realizó una comparación entre el desempeño de la bomba de acuerdo a la curva de fábrica (corregida) y la real. En la figura 3 se muestra que al cruzar la información de fábrica con puntos de operación reales hay diferencias en el rendimiento esperado de los equipos. Y aún para dos equipos sometidos a las mismas condiciones operacionales, de la misma referencia y edad y estrategia de mantenimiento igual, los comportamientos difieren.

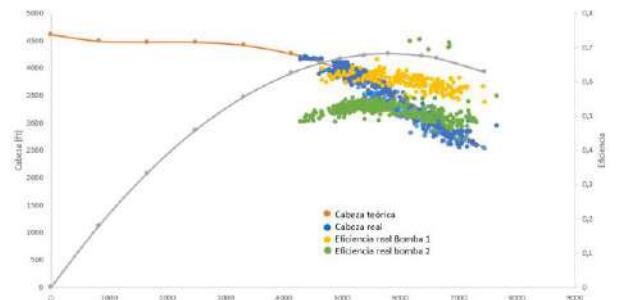


Fig. 3. Curva de desempeño de una bomba centrífuga teórica y puntos de operación real.

Con estas pérdidas del rendimiento además de evidenciar el paso del tiempo sobre los activos y una clara acción de mantenimiento, se observó que para el mismo modo operativo puntual, existían esquemas más o menos óptimos, que solo podrían ser controlados por el operador teniendo una retroalimentación en tiempo real de sus acciones.

Hasta este punto se tienen dos situaciones que tienen impacto directamente sobre la eficiencia energética, la operación y el mantenimiento:

1. Pérdida de desempeño y capacidad máxima de la planta por operación en región ineficiente cuando se opera a baja carga.
2. Pérdida de desempeño y eficiencia por tiempo y años de operación.

La solución se planteó enfocada al conocimiento pleno y en tiempo real de la operación y de los activos, pasando por indicadores de desempeño energético.

Para el desarrollo de la herramienta, se usó una aplicación existente en la industria denominada PIMS. Esta aplicación habilita el manejo de datos adquiridos por el sistema SCADA de la compañía. El sistema SCADA permite la transmisión de la información desde las estaciones de bombeo remotas ubicadas a lo largo del territorio nacional hasta Bogotá, donde se centraliza para el monitoreo, análisis y evaluación.

La información adquirida a través de las variables monitoreadas por SCADA puede ser tratada con el PIMS con el fin de obtener datos secundarios resultantes de ecuaciones determinadas. El resultado es una mayor información sobre la operación sin interacción humana, ya que es un proceso realizado en tiempo real en función de las variables operativas.

Esta información secundaria es usada para estimar la eficiencia de cada equipo de bombeo en la operación en tiempo real, permitiendo establecer que dicha energía suministrada a la bomba mediante el motor es la óptima y que se aprovecha cada par de potencia entregado por el motor a la bomba.

#### Aplicación del sistema de monitoreo en tiempo real

Con base en la premisa de una supervisión de activos más precisa y en períodos más cortos, se procedió a desarrollar un indicador de alto desempeño que fuera fácil de interpretar por el operador del oleoducto. Fue así como se desarrolló el siguiente indicador:

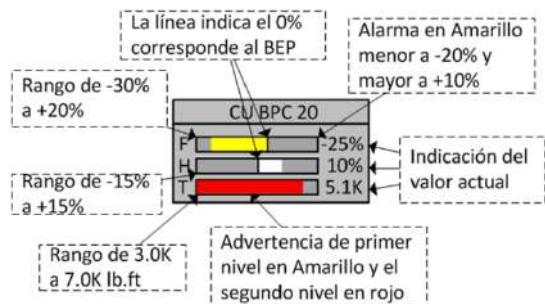


Fig. 4. Indicador de sistema de control en tiempo real

Como se observa en la figura, la comparación del punto de operación de la bomba con respecto al BEP parte del 0 %, el cual representa el punto óptimo de operación,

tanto en flujo como en cabeza. Esto facilita la interpretación, dado que, sin importar cuántas veces varíe el BEP, este será siempre el punto de partida para calcular la desviación de la bomba en flujo y cabeza de forma porcentual y en tiempo real.

Para obtener este indicador, iniciamos con una secuencia de programación que determina, en cada ciclo de cálculo, la curva de la bomba y su eficiencia, el flujo y cabeza que estén asociados al mejor punto eficiencia de la bomba. Posteriormente se calcula porcentualmente la desviación tanto de flujo como de la cabeza generada por la bomba con respecto al BEP. Adicionalmente y como aporte al vínculo entre la operación y el mantenimiento, se realiza el cálculo de torque mostrado según los datos operativos en tiempo real, permitiendo establecer la carga generada al motor de cada equipo de bombeo usado en la operación en ese instante de tiempo.

Con el desarrollo del indicador, se procedió a crear una aplicación que realiza una actualización cada 30 segundos. Este desarrollo opera en un servidor web del sistema PIMS, y obtiene del sistema SCADA la información del proceso mediante un protocolo propietario, con la estampa de tiempo necesaria para realizar los cálculos. Esto permite, a su vez, conexiones de clientes web mediante http para visualizar la aplicación, como se muestra en la siguiente figura:

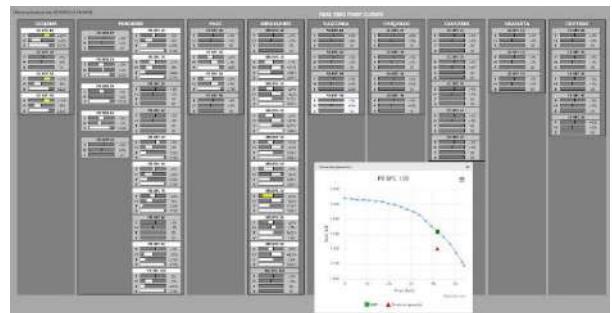


Fig 5. Monitoreo global de la planta en tiempo real

La figura muestra el monitoreo de cada equipo de bombeo. Es posible visualizar las condiciones operativas de la bomba al dar clic en cada recuadro del indicador permitiendo un seguimiento de la operación en tiempo real lográndolo de una manera segura sin afectar los equipos y teniendo un control absoluto de la potencia suministrada a los equipos de bombeo, ahorrando energía y costos de mantenimiento en motores.

Se elaboraron gráficas de tendencia comparadas con una línea base calculada antes de la implementación de esta herramienta. Con el control en tiempo real del BEP y del torque se logró una reducción de hasta el 17% de energía en estaciones que operan con motores reciprocatantes:

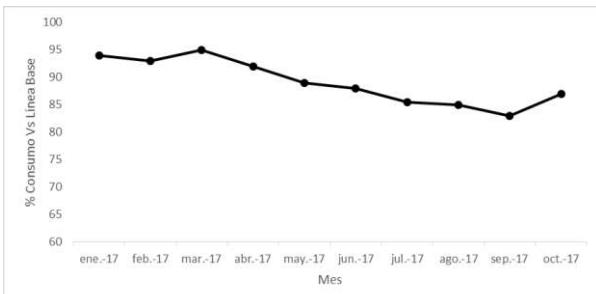


Fig. 6. Consumo de energía en motores reciprocatantes

Los efectos probables de operar una bomba a la izquierda del BEP son baja eficiencia y cavitación. Dado el aumento de las cargas radiales, se esperarían fallas en los rodamientos, sellos y aumento de temperatura a causa de la energía disipada por baja eficiencia.

Cuando se opera una bomba a la derecha de BEP, los efectos son baja eficiencia, mayor demanda de energía, ruido y vibración.

Esta medida ha traído resultados importantes a nivel no solo del mantenimiento, la operación y el consumo energético, el negocio completo ha visto buenos frutos de este trabajo. En la figura 7 se observa la reducción en el número de afectaciones a la operación a causa de falla de los activos físicos, con las medidas implementadas inicialmente con un sistema de monitoreo manual, en el 2016 ya se observan reducciones, que han venido mejorando en el 2017 con la implementación de un PIMS.

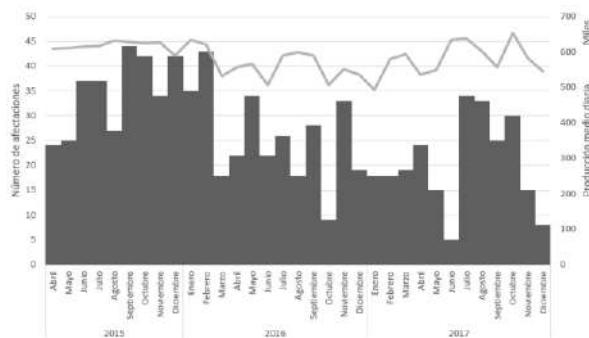


Fig 7. Número de afectaciones operativas por falla de activos

En cuanto a unidades productivas, los indicadores han mostrado que la planta aumentó su disponibilidad del 96.1% al 96.6% con reducción de eventos de falla de activos.

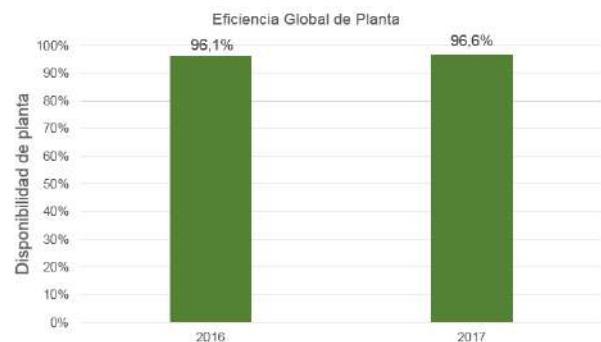


Fig. 8. Disponibilidad global de la planta 2016 vs 2017

## Conclusiones

- El control de eficiencia de unidades de bombeo en tiempo real permitió garantizar el mejor uso de los equipos y, consecuentemente, disminuir la demanda energética hasta en un 17 % en las estaciones que operan con motores reciprocatantes.
- El diseño de una herramienta a través de la implementación de un sistema PIMS, con visualización de indicadores de alto desempeño, ha permitido el seguimiento de la eficiencia de los equipos de bombeo y del consumo energético en tiempo real, siendo altamente práctico y amigable para los operadores del sistema.
- La capacidad de visualizar el comportamiento de cada grupo de bombas de todo el oleoducto en un solo despliegue, permite al operador identificar y corregir rápidamente cualquier desviación. Esto, a su vez, previene afectaciones al desempeño de todo el oleoducto, pues maximiza la eficiencia global del sistema.
- Como se puede observar a lo largo de este paper, Oicensa ha logrado optimizar cada uno de sus procesos operativos con la implementación de esta herramienta, logrando incrementar la disponibilidad de equipos, mejorar el consumo energético, incrementar el tiempo de vida útil de las bombas y disminución de costos por fallas catastróficas o mantenimientos correctivos.

## Referencias

- [1] Moubray J. Reliability Centered Maintenance. Segunda edición. Industrial press inc. New York, USA:

1997.

[2] Morris S. Reliability modeling: K out of N configurations. Reliability analytics Blog. 2011. Disponible en: <http://www.reliabilityanalytics.com/blog>

[3] Plant Information Management System Orchestrating Complex Systems to Work as one. Artículo disponible en: <http://software.schneider-electric.com/pdf/application-solution/plant-information-management-system-orchestrating-complex-systems-to-work-as-one/>

[4] Artículo disponible en: [https://www.indracompany.com/sites/default/files/indra\\_real\\_time\\_en\\_baja.pdf](https://www.indracompany.com/sites/default/files/indra_real_time_en_baja.pdf)

[5] Exaquantum: Plant Information Management System. Artículo disponible en: <https://www.yokogawa.com/us/news/press-releases/2017/yokogawa-releases-exaquantum-r310-plant-information-management-system/>

[5] David Oloke. A Web-Based Off-Highway Plant Information Management System. Lambert Academic Publishing.

Eliana María Carranza Rojas. Ingeniera Mecánica y MSc. en Ingeniería Mecánica de la Universidad de los Andes. Con 5 años de experiencia en la Gerencia de Confiabilidad y Gestión de Activos de OCENSA desempeñándose como analista e ingeniera de confiabilidad y autoridad de área en las Estaciones Páez y Miraflores.

Javier Antonio González Escobar: Ingeniero mecánico de la Universidad de América y especialista en Gerencia Internacional. Cuenta con más de 15 años de experiencia con equipo rotativo y motores Caterpillar. En OCENSA ha desempeñado los cargos de especialista en equipo rotativo y, actualmente, en Gestión Energética.

Jhon Ussa Gil: Ingeniero Químico / Master en Gestión en la Industria de Hidrocarburos. Con más de 10 años de experiencia específica en Ingeniería de Procesos desempeñando labores de diseño de facilidades para el transporte de hidrocarburos, conocimiento específico en cálculos hidráulicos de oleoductos con crudo pesado y liviano, tratamiento de crudo combustible para generación de energía y uso en motores de combustión interna.