

PRÁCTICA ACADÉMICA EN EL GRUPO DE INVESTIGACION EN DEMANDA
ENERGETICA

CRISTIAN FABIAN JAIMES SAAVEDRA

U00086281

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-MECÁNICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRONICA
BUCARAMANGA

2016

PRÁCTICA ACADÉMICA

Diseño de un modelo de demanda energética en las plantas de tratamiento de
crudo de Campo Castilla

CRISTIAN FABIAN JAIMES SAAVEDRA

U00086281

Director: M.Sc.Hernando González Acevedo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-MECÁNICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRONICA
BUCARAMANGA

2016

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma Director de Practica

CONTENIDO

| | |
|--|----|
| INTRODUCCION | 8 |
| 1. Objetivos | 9 |
| 1.1 OBJETIVO GENERAL | 9 |
| 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 9 |
| 2 MARCO CONCEPTUAL | 10 |
| 2.1 PLANTA DE TRATAMIENTO DE CRUDO INTEMPERIZADO PETROECUADOR | 10 |
| 2.2 PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUA..... | 12 |
| 2.3 FLUIDO PROCESADO EN LA PLANTA | 13 |
| 2.4 CONSUMO ENERGÉTICO DE LA PLANTA..... | 15 |
| 2.5 EJEMPLO DE CÁLCULO PARA BOMBAS CENTRÍFUGAS | 16 |
| 2.6 EJEMPLO DE CÁLCULO PARA BOMBAS DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO..... | 21 |
| 2.7 CARACTERIZACIÓN DE EQUIPOS EN LA ESTACIÓN DE TRATAMIENTO CASTILLA | 23 |
| 2.8 DEFINICIONES..... | 23 |
| 2.9 TIPOS DE RESERVAS:..... | 23 |
| 2.10 TIPOS DE RECOBRO:..... | 24 |
| 2.11 VOLÚMENES DE CRUDO Y AGUA | 25 |
| 2.12 INVENTARIO DE EQUIPOS ELÉCTRICOS | 27 |
| 3 ACTIVIDADES | 34 |
| 3.1 INTERFAZ DE USUARIO 1.0 | 34 |
| 3.1.1 Opción Crear | 35 |
| 3.1.2 Opción de graficar | 37 |
| 3.1.3 Opción de Procesar | 38 |
| 3.1.4 PROGRAMACION DE LA INTERFAZ | 39 |
| 3.2 INTERFAZ DE USUARIO 2.0 | 42 |
| 3.2.1 Plantas de Tratamiento..... | 42 |
| 3.2.2 Plantas de Recobro | 45 |
| 3.2.3 Resultados..... | 47 |
| 4 CONCLUSIONES | 51 |

| | |
|--------------------|----|
| BIBLIOGRAFÍA | 52 |
|--------------------|----|

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Proceso de recuperación de crudo. [1]..... | 11 |
| Figura 2. Proceso de tratamiento de agua | 13 |
| Figura 3. Barriles de crudo tratados en la Planta. [1]..... | 14 |
| Figura 4. Barriles de agua tratada en la Planta. [1] | 14 |
| Figura 5. Curva característica de la bomba Durco Mark 3 STD. | 18 |
| Figura 6. Curva de Potencia vs Caudal de una Bomba Barnes EC-220. | 19 |
| Figura 7. Curva de Potencia vs Caudal a diferentes velocidades de rotación de la bomba. | 20 |
| Figura 8. Curvas características bomba Netzsch Nemo. [1]..... | 22 |
| Figura 9. Topología Tratamiento de Crudo en la Planta de Castilla | 28 |
| Figura 10. Topología Tratamiento de Agua en la Planta de Castilla..... | 28 |
| Figura 11. Interfaz de usuario..... | 35 |
| Figura 12. Interfaz para la opción de crear..... | 36 |
| Figura 13. Interfaz para la función polinómica de las curvas características. | 36 |
| Figura 14. Interfaz para guardar las curvas características por medio de puntos. 37 | |
| Figura 15. Bomba seleccionada en la interfaz..... | 37 |
| Figura 16. Grafica de Potencia vs Caudal por medio de puntos..... | 38 |
| Figura 17. Curva de potencia vs caudal por medio de función polinómica. | 38 |
| Figura 18. Creación de la interfaz..... | 40 |
| Figura 19. Herramientas Visual Basic. | 40 |
| Figura 20 Código visual basic para presionar un botón..... | 41 |
| Figura 21 Uso del IF y FOR en un código visual basic..... | 41 |
| Figura 22. Interfaz de Plantas de tratamiento y recobro. | 42 |
| Figura 23. Sección 1 de la interfaz. | 43 |
| Figura 24. Sección 2 de la interfaz. | 43 |
| Figura 25 Sección 1 de la interfaz con las bombas agregadas | 44 |
| Figura 26. Interfaz Plantas de Recobro. | 45 |
| Figura 27. Interfaz Recobro Aire..... | 46 |
| Figura 28. Resultados Numéricos de la interfaz. | 47 |
| Figura 29. Consumo potencia Apiay BES. | 48 |
| Figura 30. Consumo potencia Castilla BES..... | 48 |
| Figura 31. Consumo potencia Chichimene BES..... | 49 |
| Figura 32. Consumo Potencia Chichimene PCP..... | 49 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Datos mensuales de Barriles de crudo y agua tratados..... | 14 |
| Tabla 2. Consumo energético en la Planta. | 15 |
| Tabla 3. Parámetros de operación de bomba Durco Mark 3 STD | 16 |
| Tabla 4. Parámetros de operación de bomba Nemo. | 21 |
| Tabla 5. Flujo de agua y crudo a manejar en campo Castilla. Incluye valores de reservas y de métodos de recobro. | 27 |
| Tabla 6. Capacidad nominal de trabajo en la estación de tratamiento Castilla II. . | 27 |
| Tabla 7. Tabla resumen de los equipos dispuestos en la estación de tratamiento Castilla II..... | 29 |
| Tabla 8. Tipos de bombas manejados en planta. | 29 |
| Tabla 9. Equipos dispuestos para el tratamiento de crudo en la estación Castilla II. | 30 |
| Tabla 10. Equipos dispuestos para el tratamiento de agua en la estación Castilla II. | 31 |
| Tabla 11. Equipos dispuestos los sistemas complementarios de aire | 32 |
| Tabla 12. Equipos dispuestos en los sistemas contra incendios | 32 |
| Tabla 13. Equipos dispuestos en el centro de control de motores..... | 32 |

INTRODUCCION

El grupo de investigación en demanda energética, surge del grupo de investigación de prospectiva energética a 2050. En este nuevo grupo de investigación en donde participan la Universidad Autónoma de Bucaramanga y la Universidad Pontificia Bolivariana, con estudiantes activos de las Carreras de Ingeniería en Energía, Ingeniería de Sistemas, Ingeniería Ambiental y Economía, se pretende determinar la demanda energética de los pozos, plantas de tratamiento y plantas de recobro en el campo castilla. Partiendo del plan volumétrico e información proporcionada por el ICP para lograr este objetivo, también se pretende determinar el impacto ambiental generado en estas plantas y además se desea determinar el comportamiento del precio del crudo a 2036.

La universidad Pontificia Bolivariana con sus estudiantes de Ingeniería Ambiental se encargó del cálculo del impacto ambiental de las plantas, por otro lado la Universidad Autónoma de Bucaramanga se encargó del desarrollo del modelo de demanda de las planta de tratamiento, recobro y de la estimación del comportamiento del precio del crudo a 2036.

Inicialmente el grupo de investigación partió de un modelo de demanda ya existente, realizado por contratistas de Ecopetrol en donde se calculaba la demanda de los pozos, plantas de tratamiento y plantas de recobro. El problema con este modelo, era que se necesitaban muchos datos directamente de campo para que el modelo funcionara, por lo tanto se nos propuso que realizáramos un nuevo modelo el cual no necesitara datos del campo, ya que estos eran muy demorados y complicados de conseguir.

El objetivo principal de mi investigación es generar un modelo de demanda energética de las plantas de tratamiento de crudo del campo Castilla. Las plantas de recobro serán la responsabilidad de otros estudiantes. Para el desarrollo del modelo de las plantas de tratamiento, inicialmente se determinaran los dispositivos que consumen energía eléctrica en la planta de tratamiento para luego construir la interfaz en Excel en donde se realizaran todos los cálculos necesarios para encontrar la potencia eléctrica que consumen todos los dispositivos de la planta de tratamiento.

Ya que Ecopetrol no nos podía compartir mucha información con respecto a las marcas y potencias de las bombas que funcionan dentro de la planta de tratamiento. Ya que el dispositivo que más energía eléctrica consumía eran las bombas presentes al interior de la planta de tratamiento.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar un modelo de cálculo para encontrar la demanda eléctrica consumida por la planta de tratamiento de campo Castilla.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar una búsqueda bibliográfica sobre el consumo energético en las plantas de tratamiento de crudo.
- Identificar la topología de la planta de tratamiento del Campo Castilla.
- Identificar la cantidad de Bombas dentro de la planta de tratamiento.
- Realizar una interfaz de usuario en donde se pueda calcular la potencia eléctrica consumida por las bombas al interior de la planta de tratamiento de crudo de Castilla.

2 MARCO CONCEPTUAL

Los yacimientos petrolíferos encontrados alrededor del mundo poseen diferentes características físicas y químicas entre ellos, así como las propiedades de los fluidos encontrados dentro de ellos. De acuerdo con esto la producción de agua, crudo y gas puede variar por cada pozo productor, por lo que es importante poseer plantas de separación y tratamiento para cada uno de estos fluidos.

Dentro de estas plantas de tratamiento existen diferentes tipos de dispositivos los cuales se encargan de separar estos fluidos y tratar a los mismos para que su posterior vertimiento (como es el caso del agua) o para facilitar su transporte (como es el caso del crudo).

Con el uso constante de estas plantas en la industria petrolera, es importante conocer la demanda de energía eléctrica que estas plantas pueden tener, ya que el consumo de energía es uno de los factores más importantes dentro del costo total de los procesos de producción, Además es importante analizar e identificar cuales dispositivos son los que más energía eléctrica consumen al año, ya que un aumento de eficiencia en estos dispositivos puede representar grandes ahorros energéticos al año para la planta.

2.1 PLANTA DE TRATAMIENTO DE CRUDO INTEMPERIZADO PETROECUADOR

Un ejemplo en donde se puede observar los costos energéticos que se tienen dentro de una planta de tratamiento de crudo, puede ser el caso de la planta de tratamiento de la empresa Petroecuador. En la Figura 1 se presenta el diagrama de bloques del proceso de recuperación de crudo presente en Petroecuador. [1]

PROCESO DE RECUPERACIÓN DE CRUDO

FLUIDIZACIÓN Y PRETRATAMIENTO QUÍMICO

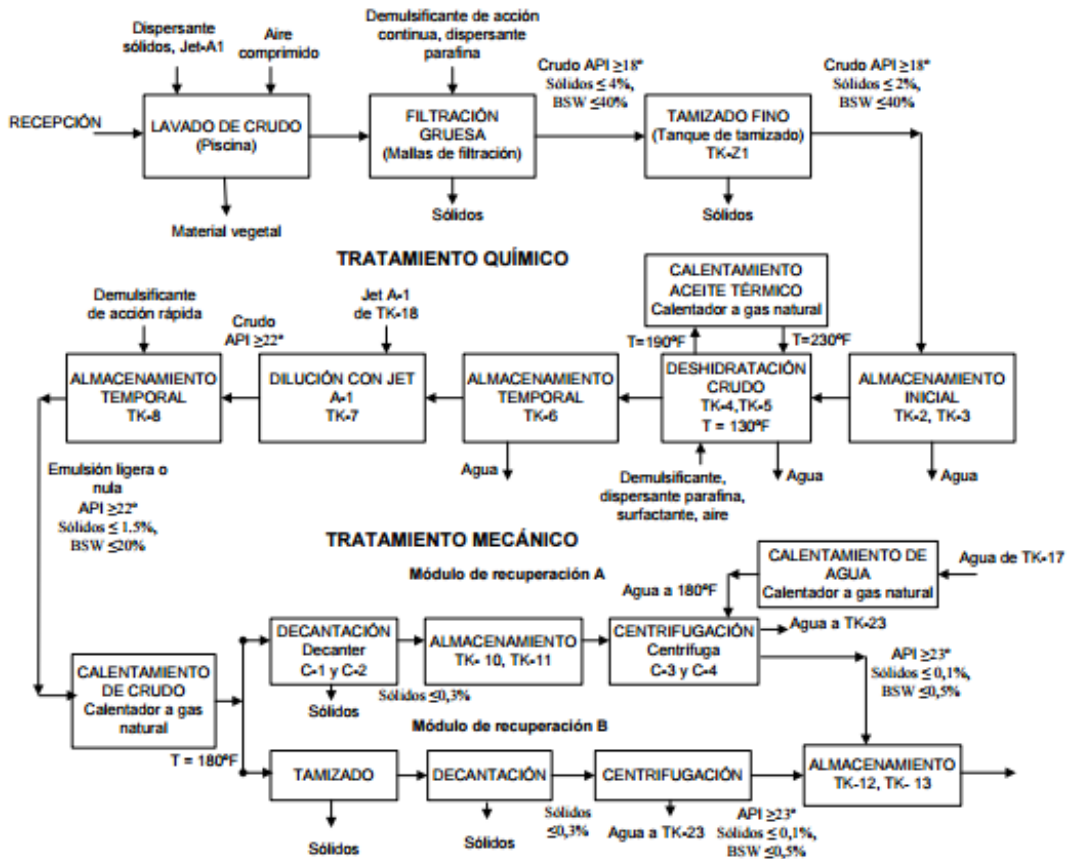


Figura 1. Proceso de recuperación de crudo. [1]

Inicialmente, el crudo se acopia en la piscina de lavado, donde se adiciona Jet para reducir la viscosidad del crudo y facilitar su bombeo. En esta piscina son retenidos restos de madera, material vegetal y otros desechos sólidos de gran tamaño. el crudo es trasladado al proceso de separación física en mallas de filtración, Los sólidos gruesos de hasta 1 cm de diámetro son retenidos en esta fase, el crudo deberá tener un porcentaje de sólidos menores a 4%, agua y sedimentos básicos (BSW) menores a 40% y grado API mayores a 18° para continuar el proceso.

El crudo es bombeado al tanque de tamizado TK-Z1, donde se retienen sólidos finos, de modo que a la salida debe tener Sólidos menores a 2% para ser bombeado hasta los tanques de almacenamiento inicial TK-2 o TK-3, donde el crudo espera el tratamiento químico.

El tratamiento químico se realiza en los tanques TK-4 y TK-5, Durante este tratamiento, se debe mantener la temperatura del crudo entre 120 y 130°F, para lo cual, los tanques TK-4 y TK-

5 disponen de serpentines internos por los que circula aceite térmico a temperatura entre 230 y 250°F. En dichos tanques se da el tiempo de residencia necesario para que se separe el agua y el crudo y luego pasa al tanque TK-6.

Previo a la mezcla con Jet, el crudo es almacenado temporalmente en el tanque TK-6 para luego pasar al tanque de mezcla TK-7, donde se adiciona Jet desde el tanque TK-18 para elevar el ° API a un valor mayor a 22°, Posteriormente, el crudo pasa al tanque de transferencia TK-8 con BSW entre 15 y 20% y sólidos menores a 1.5%, El agua drenada de los tanques TK-3, TK-4, TK-5 y TK-6 es recolectada en un sumidero, desde el cual se bombea al tanque de almacenamiento TK-23 para su posterior tratamiento.

Luego el crudo pasa por un proceso mecánico de deshidratación que inicia con el calentamiento del crudo hasta una temperatura entre 180 y 200 °F mediante un calentador pirotubular a gas natural de dos pasos por tubo y uno por carcasa en contracorriente, De acuerdo a las facilidades operativas, el crudo puede alimentarse al módulo de recuperación A o B, la finalidad de estos módulos es reducir la cantidad de agua y sedimentos disueltos en el crudo a 0.5% y la cantidad de solidos disueltos a 0.1%. Y finalmente el crudo tratado es llevado al tanque de almacenamiento TK-12 o TK-13 para su posterior transporte. [1]

2.2 PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUA

El agua que se separa en el proceso de recuperación de crudo debe clarificarse y tratarse con biocida y químicos como anti-incrustante y anticorrosivo, para que cumpla con las especificaciones para ser bombeada hacia los pozos reinyectores.

En la Figura 2 se presenta el diagrama de flujo del tratamiento de agua. El agua contaminada proveniente de los diferentes pasivos ambientales, procesos de la planta de tratamiento de crudo y plataformas de tratamiento son almacenadas en los tanques TK-15 y TK-23. El agua es bombeada al tanque de desnatado TK-14, en el cual se separan trazas de hidrocarburo que pudiese tener el agua. El hidrocarburo retenido ingresa al tanque TK-3 para su tratamiento a través del sumidero principal. [1]

PROCESO DE CLARIFICACIÓN DE AGUA

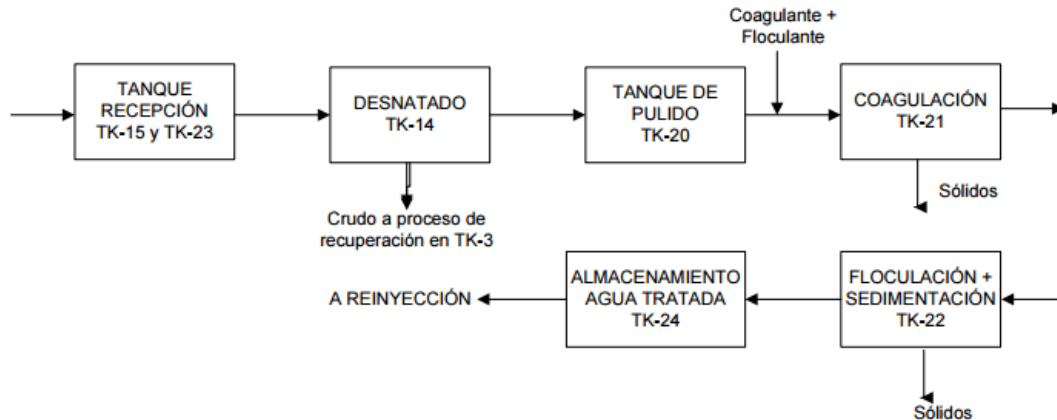


Figura 2. Proceso de tratamiento de agua

El agua almacenada en el tanque TK-14 se bombea hasta el tanque de pulido, TK-20, donde se toma una muestra de agua para realizar pruebas de jarras a nivel de laboratorio.

El agua es bombeada al tanque de coagulación TK-21, una vez que éste alcance el nivel operativo se agita el agua mediante recirculación con la finalidad de favorecer el proceso de coagulación. Luego, el agua se bombea al tanque de floculación y sedimentación, TK-22, donde el agua tendrá un tiempo de residencia de 3 a 6 horas para que los flóculos formados sedimenten y el agua clarificada pueda bombearse hasta el tanque de agua tratada TK-24.

El agua tratada almacenada en el TK- 24 debe cumplir los siguientes límites de aceptación:

Residual de aceite en agua: Máximo 5 ppm.

Presencia de bacterias sulfato reductoras: Máximo 10 col/ml.

Presencia de bacterias totales: Máximo 100 col/ ml.

Oxígeno Disuelto: 20 ppb.

Concentración de Sólidos Totales: 50 ppm.

2.3 FLUIDO PROCESADO EN LA PLANTA

La planta de tratamiento de crudo ha tratado desde el año 2008 hasta el 2011, cerca de 27.467 barriles de crudo. Esta información puede ser mejor apreciada en la figura 3.

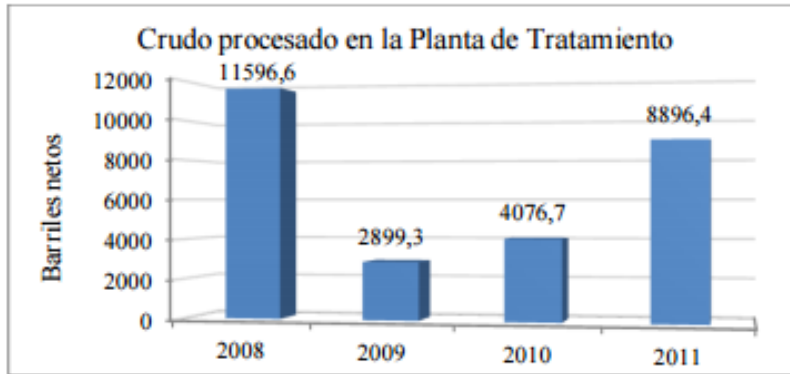


Figura 3. Barriles de crudo tratados en la Planta. [1]

Figura 3.

Por otra parte, durante el mismo periodo de 2008 a 2011 se han tratado 172.023 barriles de agua en la planta. Este dato puede ser observado en la figura 4.

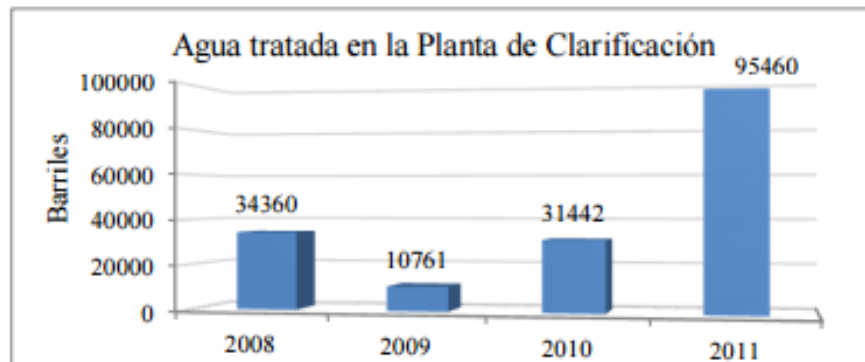


Figura 4. Barriles de agua tratada en la Planta. [1]

En la Tabla 1 se presentan los datos mensuales del año 2011 correspondientes a barriles de crudo que ingresaron a la Planta de tratamiento, crudo entregado, barriles de agua tratada y reinyectada, se puede resaltar que mensualmente se procesó un promedio de 988,5 barriles de crudo.

Tabla 1. Datos mensuales de Barriles de crudo y agua tratados.

| AÑO 2011 | Barriles de crudo | | Barriles de agua | |
|----------|---------------------|-----------|------------------|---------------|
| | Ingresado a piscina | Entregado | Tratada | A Reinyección |
| Enero | 981 | 0 | 3650 | 3100 |

| | | | | |
|----------------------|-------|------|-------|-------|
| Febrero | 371 | 253 | 9980 | 8200 |
| Marzo | 395 | 0 | 13550 | 10800 |
| Abril | 584 | 677 | 15250 | 12400 |
| Mayo | 5843 | 598 | 7550 | 6300 |
| Junio | 3786 | 1903 | 8650 | 8500 |
| Julio | 3009 | 1514 | 450 | 400 |
| Agosto | 1407 | 823 | 5040 | 4700 |
| Septiembre | 1780 | 0 | 2200 | 2099 |
| Octubre | 13225 | 1097 | 8100 | 7972 |
| Noviembre | 15603 | 560 | 12170 | 11998 |
| Diciembre | 2777 | 1468 | 8870 | 8723 |
| Total | 49762 | 8896 | 95460 | 85194 |
| Prom. Mensual | 4146 | 988 | 7955 | 7099 |

En 2011 ingresaron 49762,3 barriles provenientes de las diferentes piscinas de crudo intemperizado y considerando que, de éstos, se ha entregado 8896,4 barriles de crudo con un promedio de 0,6% de agua, se deduce que el fluido proveniente de las piscinas ingresa con 82,1% de agua (40904,6 barriles), la cual se encuentra como agua libre y en emulsión con crudo. En lo referente al agua, en 2011 se han tratado 95460 barriles, los cuales corresponden al agua que ingresa junto con el crudo proveniente de las piscinas. [1]

2.4 CONSUMO ENERGÉTICO DE LA PLANTA

En la Tabla 2 se presenta la cantidad de energía eléctrica consumida por los diferentes equipos en la planta y el porcentaje que representa sobre el consumo total de la Planta. Se puede observar que el 50% de la energía eléctrica requerida por la Planta es consumida por bombas centrífugas, el 20.9% por las tres centrífugas y aproximadamente el 10% lo consumen tanto el compresor estacionario como las decantadoras.

Tabla 2. Consumo energético en la Planta.

| Equipos | Cantidad | kWh/año | % |
|-----------------------------------|----------|-----------|-----|
| Bombas centrífugas | 10 | 219699,92 | 50 |
| Bombas de desplazamiento positivo | 12 | 14181,9 | 3,2 |

| | | | |
|------------------------|-----------|------------------|------------|
| Bombas dosificadoras | 8 | 5261,41 | 1,2 |
| Compresores | 1 | 47352,73 | 10,8 |
| Decantadoras | 4 | 43765,4 | 10 |
| Centrifugas | 3 | 91835,6 | 20,9 |
| Zaranda | 1 | 478,31 | 0,1 |
| Cintas transportadoras | 4 | 16740,86 | 3,8 |
| Total | 43 | 439316,14 | 100 |

Se puede resaltar que los equipos que más consumen energía eléctrica en la planta de tratamiento, son las bombas centrifugas y bombas de desplazamiento positivo. Para calcular la potencia eléctrica consumida por cada uno de estos dispositivos, se puede realizar de diferentes maneras las cuales serán explicadas en la siguiente sección.

2.5 EJEMPLO DE CÁLCULO PARA BOMBAS CENTRÍFUGAS

Para los cálculos de potencia se realizaron mediciones de corriente en la línea de alimentación al motor de cada bomba, presión de succión, presión de descarga y con las propiedades del fluido se calculó la altura útil de la bomba. De la curva característica de cada bomba, conociendo la altura útil y la velocidad de giro (rpm) a la que opera el equipo, se obtuvo el caudal volumétrico. Finalmente, conociendo el caudal volumétrico se calculó la potencia hidráulica y con ésta el rendimiento de la bomba, rendimiento del motor y rendimiento electromecánico de cada equipo.

A continuación, se presenta un ejemplo de cálculo para la bomba centrífuga Marca Durco Modelo Mark 3 STD 2K4x3-13 RV M3 ST, Número de Serie 1006-1091. En la Tabla 3 se presentan los datos de funcionamiento de dicha bomba.

Tabla 3. Parámetros de operación de bomba Durco Mark 3 STD

| Parámetro | Unidad | Valor |
|----------------------|--------|--------|
| Diámetro de succión | in | 4 |
| Diámetro de descarga | in | 3 |
| Diámetro de impeller | mm | 303,21 |
| Presión de succión | bar | 0,256 |

| | | |
|-------------------------|---------|-------|
| Presión de descarga | bar | 4,068 |
| Velocidad de giro | rpm | 1775 |
| Intensidad de corriente | Amperes | 33 |
| Voltaje | Volts | 480 |

Inicialmente se calcula la Potencia eléctrica del motor trifásico, N_{elect} la cual se obtiene con las mediciones de corriente y voltaje reales que circulan por el mismo, mediante la siguiente expresión:

$$N_{elect} = \sqrt{3} * V * I * \cos \varphi \quad (1)$$

Donde $\cos \varphi$ representa el factor de potencia con un valor de 0.8.

Luego se calcula la cabeza útil de la bomba, H_b , la cual se encuentra con ayuda de la ecuación de Bernoulli, esta se puede observar en la ecuación 2.

$$H_b = \frac{P_{descarga} - P_{succion}}{\rho * g} \quad (2)$$

Una vez se tiene la cabeza útil de la bomba y la velocidad de rotación real, se procede a calcular el caudal que pasaría por el dispositivo con ayuda de la curva característica de la bomba. Y con el caudal se puede calcular la potencia mecánica de la bomba N_{acc} . La curva de la bomba Durco Mark 3 STD se observa en la figura 5.

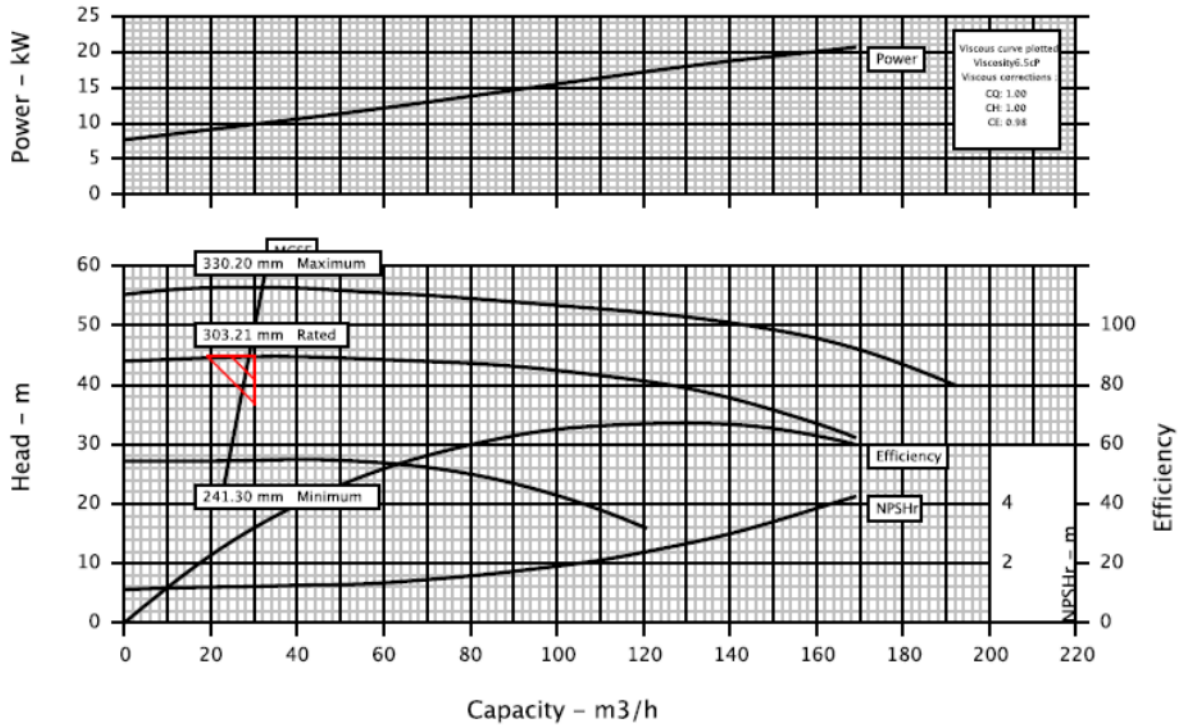


Figura 5. Curva característica de la bomba Durco Mark 3 STD.

El siguiente paso consiste en calcular la potencia hidráulica de la bomba, N_{hidr} , con ayuda de la ecuación 3.

$$N_{hidr} = Q * H_b * g * \rho \quad (3)$$

Una vez se conoce la potencia hidráulica, la mecánica y la eléctrica, se procede a calcular la eficiencia del motor trifásico y la eficiencia de la bomba con ayuda de las ecuaciones 4 y 5.

$$\eta_{motor} = \frac{N_{acc}}{N_{elect}} \quad (4)$$

$$\eta_{bomba} = \frac{N_{hidr}}{N_{acc}} \quad (5)$$

Y con estas eficiencias, se puede calcular la eficiencia global del sistema con la ecuación 6.

$$\eta_{total} = \eta_{bomba} * \eta_{motor} \quad (6)$$

Normalmente la eficiencia de la bomba en operación está alrededor de los 35% y como estos dispositivos poseen una gran demanda de energía, un aumento de la eficiencia de estos dispositivos en operación puede generar un gran ahorro energético y económico para la planta de tratamiento [2].

Otro método para calcular la potencia eléctrica consumida por la bomba centrífuga, sin hacer uso de datos tomados directamente de la máquina, sino haciendo uso únicamente de datos de placa y la curva característica de la bomba es el siguiente.

Inicialmente se parte de la curva característica de la bomba, de potencia vs caudal, en donde sabemos cuánto caudal va a recibir la bomba proveniente de los pozos dentro del campo. Esta curva se puede observar en la figura 6 [2] [3].

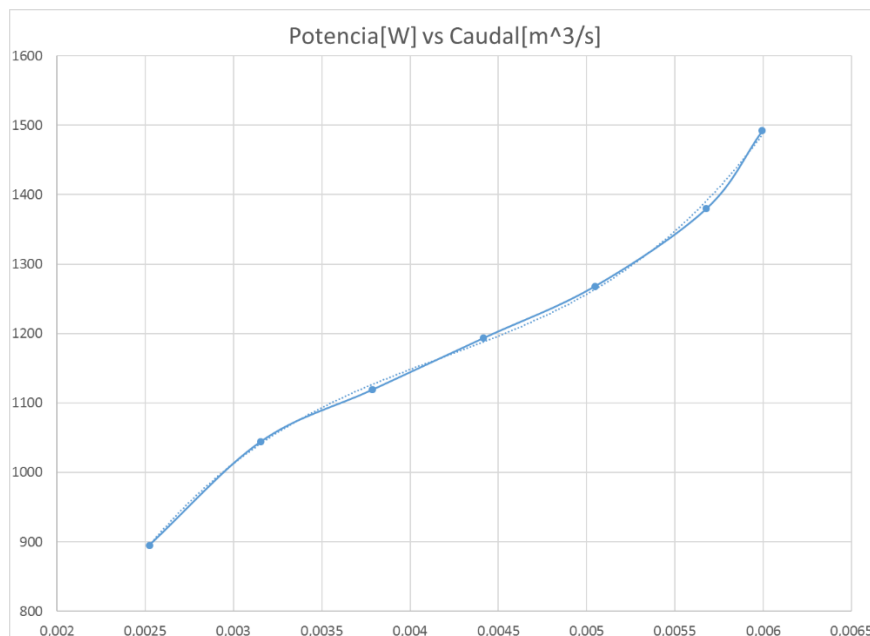


Figura 6. Curva de Potencia vs Caudal de una Bomba Barnes EC-220.

Con ayuda de la curva mostrada en la figura 6. Se puede calcular la potencia mecánica de la bomba, y dado el caso en que la bomba no trabaje a su velocidad de rotación nominal. Con ayuda de la ley de afinidad de la potencia, la cual se puede observar en la ecuación 7, se puede calcular las nuevas curvas de potencia vs caudal para diferentes velocidades. Estas diferentes curvas se pueden observar en la figura 7.

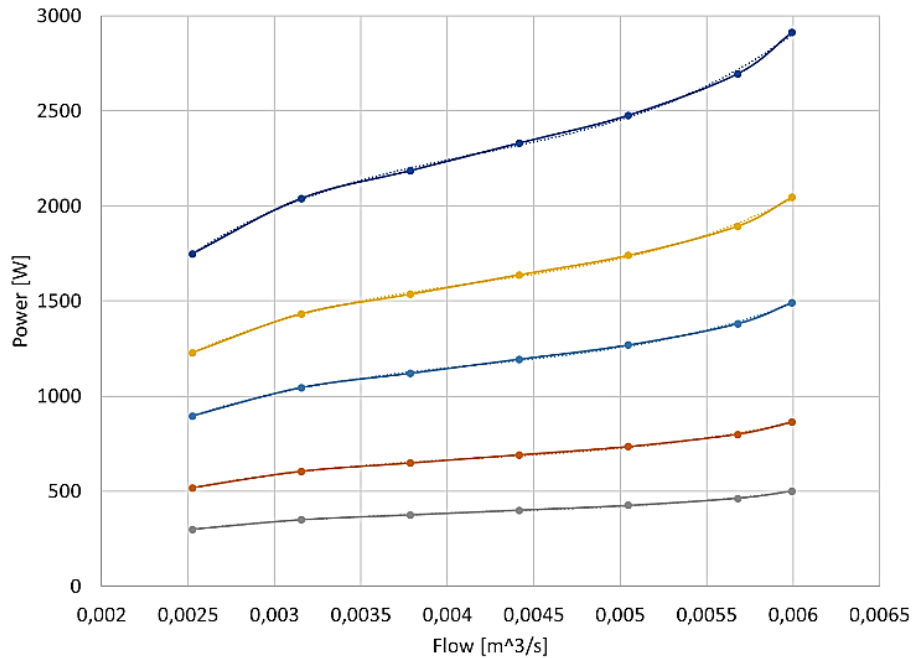


Figura 7. Curva de Potencia vs Caudal a diferentes velocidades de rotación de la bomba.

Una vez se conozca la potencia mecánica de la bomba, se procede a calcular la eficiencia de la misma, para ello se hace uso de la ecuación 7. [4] [5]

$$\eta = \frac{C_H C_Q}{C_P}, \quad (7)$$

Donde C_H , C_Q y C_P son números adimensionales los cuales dependen de la velocidad de rotación, n , el diámetro del impeller, D , el caudal, Q , la presión, H , y la potencia mecánica entregada por la bomba, de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$C_Q = \frac{Q}{nD^3} \quad (8)$$

$$C_H = \frac{gH}{n^2 D^2} \quad (9)$$

$$C_P = \frac{P}{\rho n^3 D^5} \quad (10)$$

Y todos estos parámetros pueden ser fácilmente obtenidos con ayuda de las curvas características de la bomba o de los datos de placa de la bomba. Y una vez se

conozca la eficiencia de la bomba y la potencia mecánica de la bomba, se puede calcular la potencia eléctrica que consume la bomba.

Y si en algún momento, se llega a presentar un cambio en el caudal que pasa a través de la bomba, se podría llegar a conocer la nueva eficiencia de la bomba sin necesidad de volver a hacer uso de la ecuación 7, sino que se hace uso de la ley de afinidad para la eficiencia, la cual se puede observar en la ecuación 11.

$$\frac{0.94 - \eta_2}{0.94 - \eta_1} = \left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^{0.32} \quad (11)$$

Con ayuda de esta ecuación, con solo saber las condiciones iniciales de eficiencia y caudal, y además conocemos cual sería el nuevo caudal de la bomba, se puede calcular la nueva eficiencia de la bomba.

2.6 EJEMPLO DE CÁLCULO PARA BOMBAS DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO

El cálculo de rendimiento de las bombas hidráulicas mantiene el mismo criterio que en bombas centrífugas, sin embargo, en este caso, las curvas características difieren de las mostradas en la Figura 5 debido a que son bombas de desplazamiento positivo, en cuyo caso el caudal es proporcional a la velocidad de giro.

El ejemplo de cálculo se desarrolla para la bomba del tanque TZ-1, de Marca Netzsch, Modelo Nemo NM063SY03518K, Número de Serie B64454, cuyas características de operación que fueron medidas se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros de operación de bomba Nemo.

| Parámetro | Unidad | Valor |
|----------------------|--------|-------|
| Diámetro de succión | in | 6 |
| Diámetro de descarga | in | 4 |
| Presión de succión | bar | 0,1 |
| Presión de descarga | bar | 8,3 |
| Velocidad de giro | rpm | 174 |

| | | |
|-------------------------|---------|-----|
| Intensidad de corriente | Amperes | 6 |
| Voltaje | Volts | 480 |

Siguiendo el mismo procedimiento descrito para las bombas centrífugas, se calcula la Potencia eléctrica, N_{elect} del motor en base a las mediciones de voltaje y amperaje reales, con ayuda de la ecuación 1, seguido del calcula de la cabeza útil de la bomba con ayuda de la ecuación 2.

Posteriormente con ayuda de la curva característica de la bomba mostrada en la figura 8 y su cabeza útil, se calcula el caudal de la bomba y la potencia mecánica N_{acc} .

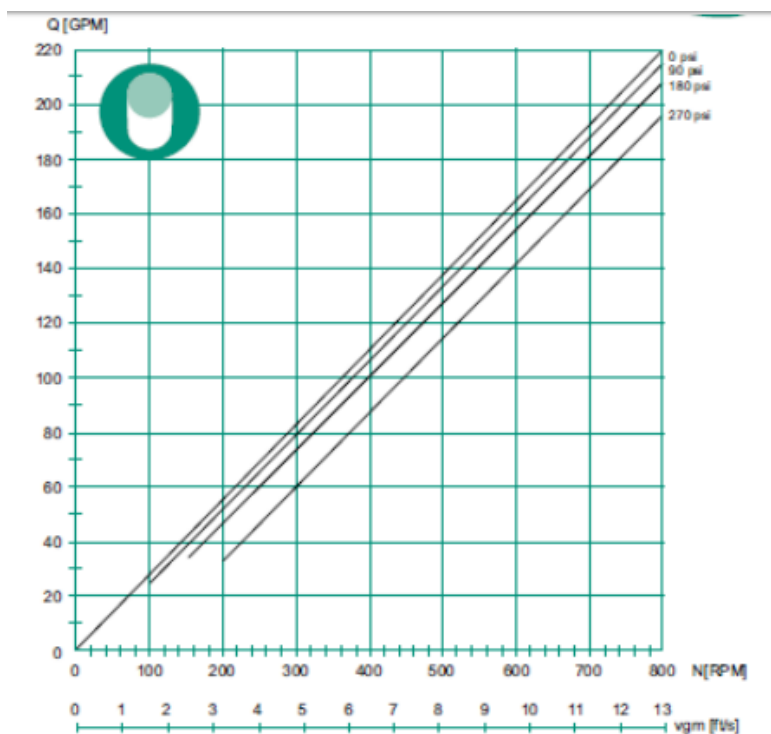


Figura 8. Curvas características bomba Netzsch Nemo. [1]

Finalmente se realizan los cálculos de la eficiencia con las ecuaciones 4, 5 y 6.

2.7 CARACTERIZACIÓN DE EQUIPOS EN LA ESTACIÓN DE TRATAMIENTO CASTILLA

Campo Castilla en la estación de tratamiento Castilla II, cuenta con un total de 148 equipos que son consumidores directos de energía, entre los que se encuentran: bombas centrífugas, de desplazamiento positivo, de tornillo, bombas tipo booster, de trasiego, motores, secadores de aire, compresores, generadores, unidades de filtro y secado y plantas alternas de generación. Entre estos, y tomando como referencia la auditoría energética realizada a PETROECUADOR [1], se tiene que las bombas centrífugas son las que mayor consumo energético presentan dentro de la planta de tratamiento (50%) debido a que son empleadas para vencer grandes cabezas de presión, lo que implica la realización de un trabajo mayor para lograr bombear fluido a grandes alturas. Seguidas por los compresores (10,8%), decantadores (10%), bombas de desplazamiento positivo (3,2%), bombas dosificadoras (1,2%), entre otros (24,8%).

Teniendo en cuenta lo anterior, en la sección del inventario de equipos, se abordará el listado de equipos que se encuentran dispuestos en la estación de tratamiento Castilla II.

2.8 DEFINICIONES

El total de producción en Campo Castilla incluye la recuperación que se hace del hidrocarburo por medio del uso de técnicas de recobro mejorado (que permiten aumentar los volúmenes de producción), así como de la disponibilidad de las reservas que posee el mismo.

Las reservas petroleras, representan la posibilidad de futuros hallazgos que garanticen la continuidad de producción de los campos petroleros, las mismas se clasifican de acuerdo a la certeza de posibilidad de existencia en: probadas, probables y posibles.

Teniendo en cuenta lo anterior y con la finalidad de esclarecer cada uno de estos términos que serán abordados en el siguiente numeral, se expondrán los tipos de reservas así como los métodos de recobro mejorado tenidos en cuenta en el plan volumétrico 2014 - 2039 por Ecopetrol.

2.9 TIPOS DE RESERVAS:

- **RESERVAS BÁSICAS:** Según la Petroleum Resources Management System (PRMS) este tipo de reservas hacen referencia a “reservas probadas desarrolladas en producción”. Para el caso concreto de Ecopetrol, las

mismas representan tanto el volumen de crudo que se produce actualmente como el volumen futuro de producción, ya que este puede ser estimado por medio del uso de curvas de declinación.

- **RPND:** Reservas Probadas No desarrolladas, es decir representa aquellas cantidades de crudo que pueden ser recuperadas comercialmente a partir de determinado periodo de tiempo. La estimación de las mismas se hace a partir del análisis de datos de ingeniería y geociencias y mediante el uso de modelos probabilísticos.
- **RNPPr:** Reservas No Probadas Probables. Son aquellas cuyo análisis de ingeniería y geociencias indican que son menos probables de ser recuperadas que aquellas probadas¹, pero que a la vez poseen mayor certeza en recuperación que aquellas posibles.
- **RNPPo:** Reservas No Probadas Posibles. Son aquellos volúmenes de hidrocarburos que por medio de estudio de ingeniería y geociencias se estima que es menos segura su recuperación comercial que las reservas probables. Cuentan con sólo 10% de oportunidad de que lo que realmente se extraiga sea igual o mayor a lo que se había pronosticado.
- **CONTINGENTE:** Son cantidades de crudo estimadas a ser potencialmente recuperadas en una fecha dada sin embargo no son consideradas como reservas debido a que para la obtención del hidrocarburo existen una serie de barreras tecnológicas o comerciales.

2.10 TIPOS DE RECOBRO:

- **RECOBRO POR INYECCIÓN DE AGUA:** Este tipo de recuperación (recuperación secundaria) hace parte de las técnicas de recobro mejorado y consiste en la inyección de agua a través de un pozo inyector aumentando así la presión en las rocas saturadas con petróleo, logrando que el crudo se desplace hasta el pozo productor.
- **RECOBRO QUÍMICO:** Este tipo de recobro mejorado consiste en la inyección de agua con compuestos químicos (Polímeros y soluciones micelares poliméricas, surfactantes, soluciones alcalinas o Mezclas de todos los anteriores) para aumentar la viscosidad de la misma con la finalidad de mejorar la movilidad entre agua y crudo logrando con esto, un mejor barrido del hidrocarburo. Los químicos adheridos al agua a su vez disminuyen tensión superficial entre los dos compuestos mejorando el desplazamiento de crudo.
- **RECOBRO TÉRMICO:** Consiste en la generación de frentes de combustión,

¹ **RESERVAS PROBADAS:** Son cantidades de hidrocarburo estimado a ser recuperable en el futuro por medio de estudio de ingeniería y geociencias, sin embargo poseen mayor certidumbre que las probables y posibles Este tipo de reservas son las que aportan la producción, por lo tanto son de gran valor comercial.

por medio de la quema de determinada cantidad de crudo en el yacimiento, esto se logra por medio del uso de un quemador, el cual es bajado a pozo (diferente al productor) y al que posteriormente se le inyecta aire hasta que logre el encendido, una vez se tiene una combustión estable, se retira el calentador pero se continua la inyección de aire con la finalidad de mantener el avance del frente de combustión, el cual favorece la disminución de la viscosidad del crudo por medio de un aumento en su temperatura, facilitando así su desplazamiento hacia el pozo productor.

2.11 VOLÚMENES DE CRUDO Y AGUA

Partiendo del plan volumétrico 2014 – 2036 (mostrado en la tabla 5) que dispone Ecopetrol para todos sus campos productores, incluyendo Castilla, se tiene que los volúmenes de agua y crudo que maneja este plan volumétrico comprenden tanto lo pronosticado en producción comercial para los diferentes tipos de reservas (básicas; RPND; RNPPR; RNPPPO y contingente), como para los diferentes tipos de recobro utilizado (por inyección de agua; recobro químico y recobro térmico). Esto teniendo en cuenta que el uso de estas técnicas incrementales de producción permiten obtener tanto un mayor volumen de crudo así como también aumenta la cantidad de agua de proceso² en superficie.

Ecopetrol define que: “Para el pronóstico de producción volumétrica, el caudal de agua de producción es igual a la suma de los caudales de todas las reservas y de los incrementales de agua por los tres tipos de recobro” lo cual obedece a la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
 Q_{WS_t} = & Q_{WS_t,BS} + (Q_{WS_t,RPND} + \\
 & + Q_{WS_t,RNPPR} \\
 & + Q_{WS_t,RNPPPO} + Q_{WS_t,CS} \\
 & + Q_{WS_t,RI} + Q_{WS_t,RQ} \quad (12) \\
 & + Q_{WS_t,RT})
 \end{aligned}$$

Donde:

Q_{WS_t} = Caudal volumétrico total de agua en superficie, en un periodo de tiempo “t”.

$Q_{WS_t,BS}$ = Caudal volumétrico total de agua en superficie proveniente de reservas básicas, en un periodo de tiempo “t”.

² **AGUA DE PROCESO:** Es también considerada agua asociada a la producción y es toda aquella que se obtiene del proceso de explotación de hidrocarburos.

$Q_{WS,t,RPNDS}$ = Caudal volumétrico total de agua en superficie proveniente de reservas RPND, para un periodo de tiempo "t".

$Q_{WS,t,RNPPrS}$ = Caudal volumétrico total de agua en superficie proveniente de reservas RNPPr, en un periodo de tiempo "t".

$Q_{WS,t,RNPPoS}$ = Caudal volumétrico total de agua en superficie proveniente de reservas RNPPo, para un periodo de tiempo "t".

$Q_{WS,t,CS}$ = Caudal volumétrico total de agua en superficie proveniente de recursos Contingentes, en un periodo de tiempo "t".

$Q_{WS,t,RI}$ = Incremental del caudal volumétrico total de agua en superficie proveniente de método de recobro por inyección de agua, en un periodo de tiempo "t".

$Q_{WS,t,RQ}$ = Incremental del caudal volumétrico total de agua en superficie proveniente de recobro químico, para un periodo de tiempo "t".

$Q_{WS,t,RT}$ = Incremental del caudal volumétrico total de agua en superficie proveniente de recobro térmico por inyección de aire, para un periodo de tiempo "t".

Sin embargo es de considerar que el objeto de estudio en este caso no es Campo Castilla en su totalidad (incluyendo las tres estaciones de tratamiento de crudo que la misma posee), sino que por el contrario, el objeto de estudio sólo hace referencia a la estación de tratamiento Castilla II. La misma cuenta con una capacidad nominal para tratamiento, dispuesta para tratar tanto crudo como gas y agua que provenga de las corrientes de pozo. Esta estación maneja caudales menores a los producidos por todo campo Castilla, debido a que a ella sólo llega la producción de 147 de los 500 pozos que componen el campo como puede ser observada en la Tabla 6.

Tabla 5. Flujo de agua y crudo a manejar en campo Castilla. Incluye valores de reservas y de métodos de recobro.

| TABLAS PROMEDIO | | |
|------------------------|------------------------|-------------------------|
| AÑO | AGUA [BWPD] | CRUDO [BOPD] |
| 2014 | 1.210.866 | 124.903 |
| 2015 | 3.301.942 | 195.719 |
| 2016 | 4.431.164 | 219.941 |
| 2017 | 4.859.788 | 182.845 |
| 2018 | 4.951.128 | 147.270 |
| 2019 | 5.004.057 | 115.829 |
| 2020 | 5.062.437 | 95.376 |
| 2021 | 4.989.158 | 82.216 |
| 2022 | 4.908.911 | 68.424 |
| 2023 | 4.859.030 | 53.974 |
| 2024 | 4.829.558 | 42.201 |
| 2025 | 4.573.820 | 33.629 |
| 2026 | 3.492.755 | 23.900 |
| 2027 | 3.449.991 | 15.997 |
| 2028 | 3.439.636 | 9.195 |
| 2029 | 3.198.177 | 6.264 |
| 2030 | 2.539.707 | 4.397 |
| 2031 | 2.351.827 | 3.344 |
| 2032 | 1.469.818 | 2.329 |
| 2033 | 830.719 | 1.651 |
| 2034 | 766.023 | 1.320 |
| 2035 | 763.843 | 1.073 |

Tabla 6. Capacidad nominal de trabajo en la estación de tratamiento Castilla II.

| CARACTERÍSTICA | CAPACIDAD | UNIDAD |
|--------------------------|------------------|---------------|
| Flujo de crudo | 60000 | BOPD |
| Flujo de agua | 400000 | BWPD |
| | 90000 | BWPD |
| Flujo de gas asociado | ND | MMSCFD |
| Flujo de Nafta Diluyente | 2400 | BPD |

2.12 INVENTARIO DE EQUIPOS ELÉCTRICOS

Partiendo de la topología de la planta de tratamiento de crudo del campo castilla, mostrada en las siguientes figuras.

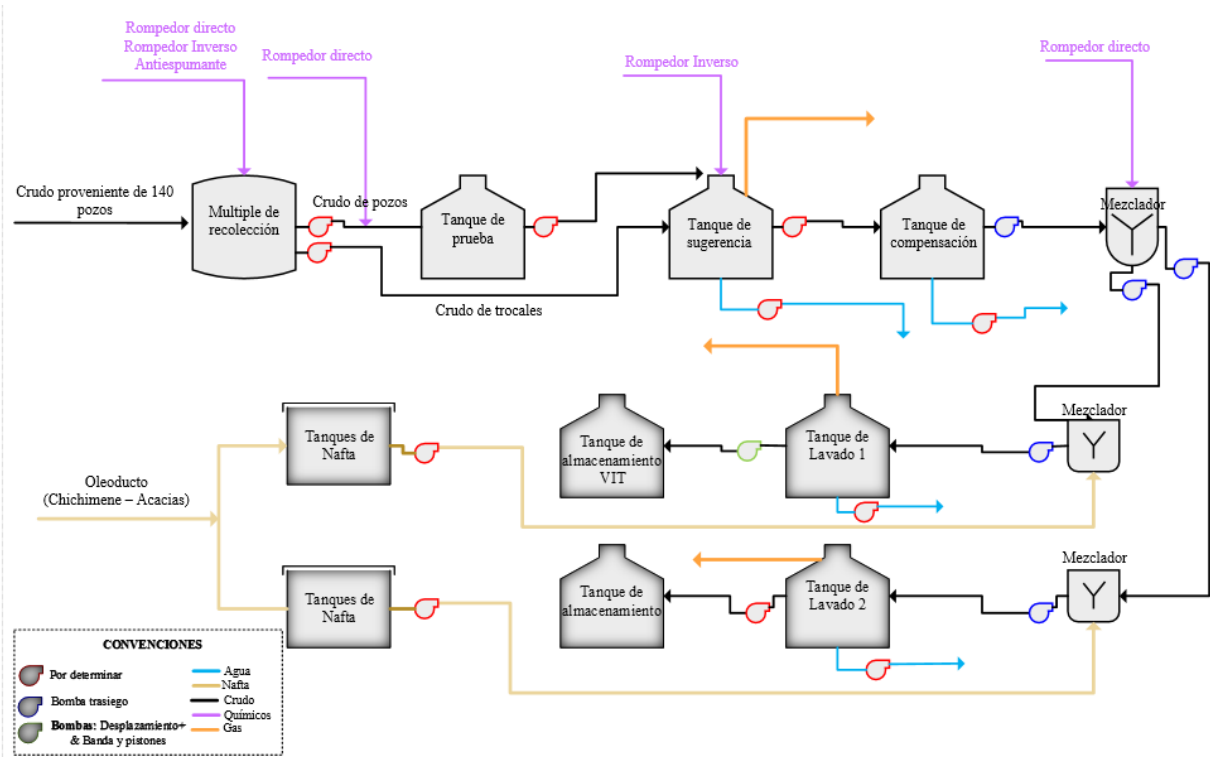


Figura 9. Topología Tratamiento de Crudo en la Planta de Castilla

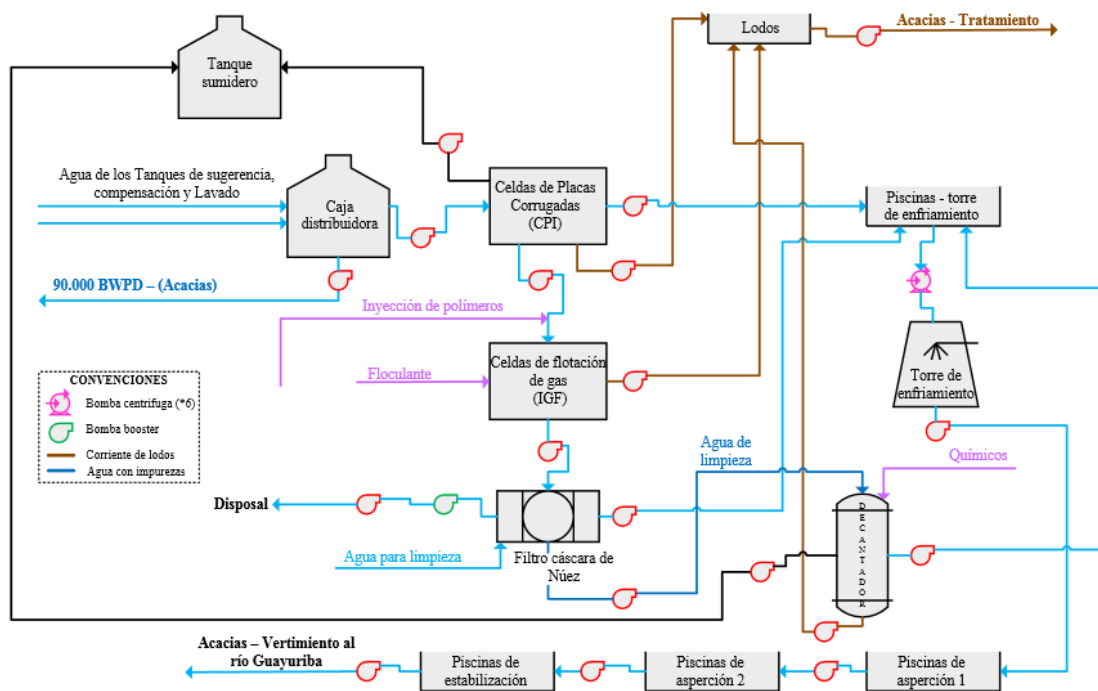


Figura 10. Topología Tratamiento de Agua en la Planta de Castilla

A continuación se muestra la tabla resumen de los equipos dentro de la planta de tratamiento.

Tabla 7. Tabla resumen de los equipos dispuestos en la estación de tratamiento Castilla II.

| EQUIPO | TOTAL UNIDADES |
|--------------------------------|-----------------------|
| Bombas | 133 |
| Motores | 5 |
| Compresores | 3 |
| Generadores | 4 |
| Secador de aire | 1 |
| Unidades de filtro y secado | 1 |
| Plantas alternas de generación | 1 |
| TOTAL | 148 |

Tabla 8. Tipos de bombas manejados en planta.

| EQUIPO | CANTIDAD |
|----------------------------|-----------------|
| Bombas por determinar | 100 |
| Bombas trasiego | 8 |
| Bombas desplazamiento + | 1 |
| Bombas de banda y pistones | 3 |
| Bombas con ACPM o DIESEL | 5 |
| Bombas booster | 6 |
| Bombas centrífugas | 9 |
| Bombas eléctricas | 1 |
| TOTAL BOMBAS | 133 |

Teniendo en cuenta lo estipulado en la Tabla 8, se tiene que aproximadamente en 75% de las bombas que se encuentran en la estación son desconocidas, lo que representa incertidumbre del 67,56% del total de equipos en esta estación. Con la finalidad de disminuirla, se toma como referencia el documento de Petroecuador, en el que se expone la auditoria energética que se realizó a la planta de tratamiento y recuperación de crudo intemperizado (PTRCI) en el cual se presentan los equipos

que son utilizados durante los diferentes procesos a los que son sometidos tanto el crudo como el agua y se presentan las especificaciones de los mismos como consumo de energía, horas de operación, potencia, entre otros. Cabe resaltar que los procesos implementados por Petroecuador son similares a los que utiliza Ecopetrol en campo Castilla, en la medida en que se tienen etapas de deshidratación y tratamiento químico de crudo y sistemas STAP para el tratamiento de aguas de proceso.

La caracterización de los equipos debe hacerse acorde a la etapa de tratamiento en que están ubicados, debido a que la densidad de los fluidos varía a medida que se avanza en el proceso de tratamiento. Para el caso del crudo, este en las diferentes etapas va liberando agua que venga en emulsión o en forma libre con el mismo y de igual manera le son agregados diluyentes como la nafta en el caso de Ecopetrol o Jet –A1 en el caso de Petroecuador, lo que hace que su densidad y viscosidad varíen lo que requiere por parte de los equipos que lo transportan la realización de un trabajo diferente, lo que hace que consuman más o menos energía y requiriéndose especificaciones diferentes por parte de los mismos (más o menos potencia). En el caso del agua, a mayor cantidad de etapas de tratamiento menor cantidad de crudo y sólidos suspendidos va a tener, por lo tanto aumenta su densidad lo que requiere un mayor consumo de energía para ser bombeada.

Por etapas de tratamiento, el desconocimiento de equipos de la estación Castilla II, se muestra en las tablas 9, 10, 11, 12 y 13.

Tabla 9. Equipos dispuestos para el tratamiento de crudo en la estación Castilla II.

| TIPO DE EQUIPO | CANTIDAD | UBICACION |
|-----------------------------------|-----------|--|
| Bombas (Por determinar) | 16 | Múltiple de recolección |
| | 1 | Salida tanque de prueba |
| | 7 | Salida de crudo tanques de sugerencia |
| | 14 | Salida para agua tanques de sugerencia |
| | 1 | Salida de agua, tanque de compensación |
| | 2 | Salida del tanque de lavado |
| | 2 | Salida de tanques de almacenamiento de Nafta |
| | 1 | Salida de tanque sumidero |
| Bombas trasiego | 6 | Salida tanque de compensación |
| | 2 | Salida del mixer |
| Bombas de desplazamiento positivo | 1 | Despacho a la VIT |
| Bombas de banda y pistones | 3 | Despacho a la VIT |
| Bomba con ACPM | 1 | Despacho a la VIT |
| TOTAL - CRUDO | 57 | |

Tabla 10. Equipos dispuestos para el tratamiento de agua en la estación Castilla II.

| | | |
|-------------------------|-----------|--|
| Bombas (Por determinar) | 2 | Salida de la caja distribuidora |
| | 4 | Salida de las celdas de placas corrugadas |
| | 8 | Salida de las celdas de flotación |
| | 12 | Salida de los filtros cáscara de nuez |
| | 5 | Aumento de presión luego de bombas Booster |
| | 3 | Salida del decantador |
| | 5 | Salida de las torres de enfriamiento |
| | 10 | Piscinas de estabilización |
| Bombas Booster | 6 | Salida de los filtros cáscara de nuez |
| Bombas centrifugas | 7 | Salida de las piscinas de las torres de enfriamiento |
| Motor (40 HP) | 5 | Para funcionamiento de las torres de enfriamiento |
| TOTAL - AGUA | 67 | |

Tabla 11. Equipos dispuestos los sistemas complementarios de aire

| | |
|------------------------------|----------|
| Compresores | 3 |
| Secador de aire | 1 |
| Filtro y secado | 1 |
| TOTAL – SIST. DE AIRE | 5 |

Tabla 12. Equipos dispuestos en los sistemas contra incendios

| | | |
|---------------------------------------|----------|--|
| Bombas centrífugas | 2 | Captación de agua |
| Bombas a Diesel | 4 | Salida de la piscinas contra incendios |
| Bomba eléctrica | 1 | Salida de la piscinas contra incendios |
| Bombas (Por determinar) | 2 | Para la distribución de químicos |
| TOTAL – SIST. CONTRA INCENDIOS | 9 | |

Tabla 13. Equipos dispuestos en el centro de control de motores

| | | |
|------------------------------|----------|------------------------------|
| Generadores | 4 | Centro de control de motores |
| Planta alterna de generación | 1 | De respaldo |
| TOTAL - CCM | 5 | |

Para la etapa de tratamiento de crudo (Tabla 9), se tiene desconocimiento total de las bombas que son usadas a la salida y entrada de los tanques de prueba, surgencia, lavado y compensación, sin embargo y de acuerdo al documento de Petroecuador, el tipo de bombas que son implementadas a las entradas y salidad de los tanques durante el tratamiento de crudo son en su mayoría bombas de cavidades progresivas y centrífugas, en tanto las bombas que son usadas para la inyección de diluyente son de desplazamiento positivo.

En la etapa de tratamiento de agua (Tabla 10), se desconocen 49 bombas, sin embargo con base al documento de referencia, se tiene que en la PTRCI todas las bombas empleadas son centrífugas, por tal razón serán asumidas del mismo tipo. Cabe resaltar que de acuerdo a lo expuesto en las especificaciones de los equipos utilizados por petroecuador, a medida que el agua avanza en las etapas de tratamiento se requiere menor potencia para poder transportar el líquido de un equipo a otro, ya que el amperaje que consumen las bombas en las etapas avanzadas del tratamiento es menor y si se tiene en cuenta que $V=I \cdot R$, el voltaje requerido para su funcionamiento será menor, por ende, el consumo energético se disminuye.

En cuanto a los equipos presentes en las demás etapas de tratamiento (Tabla 11), así como de los sistemas auxiliares (sistemas contra incendios y control de motores) mostrados en las tablas 12 y 13, estos están definidos.

Debido a la gran falta de información con respecto a las marcas y potencias de las bombas dentro de la planta de tratamiento, se decidió manejar la bomba como un dato de entrada a la interfaz.

3 ACTIVIDADES

Las actividades realizadas durante la instancia en el grupo de investigación se basaron en la construcción de la interfaz de usuario para el cálculo de la demanda energética de los dispositivos dentro de la planta de tratamiento de crudo de Castilla.

Ya que se identificaron los dispositivos dentro de la planta de tratamiento y se observó que las bombas son los dispositivos que más energía consumen dentro de una planta de tratamiento, la interfaz creada solo se enfocara en el cálculo de la demanda de energía para las bombas.

3.1 INTERFAZ DE USUARIO 1.0

El modelo de cálculo de la demanda de una planta de tratamiento que se propone, hará uso de una interfaz de usuario en donde se tendrá una base de datos de las diferentes marcas de las bombas trabajadas dentro de la planta de tratamiento, estas bombas serán guardadas junto a sus curvas características de Cabeza vs Caudal y Potencia vs Caudal.

De igual forma la interfaz tendrá la opción de crear una nueva bomba para ser guardada dentro de la base de datos, en donde se tendrá que introducir los datos de las curvas características, ya que estas juegan un papel importante a la hora de calcular la demanda de la planta de tratamiento.

La interfaz de usuario construida se muestra en la figura 11.

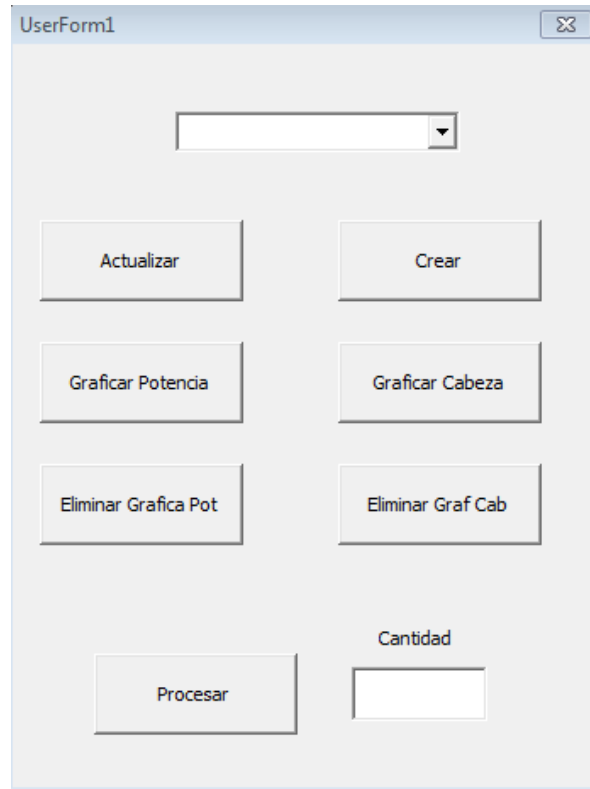


Figura 11. Interfaz de usuario

La interfaz, cuenta con el botón de actualiza, crear, graficar potencia, graficar cabeza, eliminar grafica de potencia, eliminar grafica de cabeza y procesar.

El botón de actualizar, funciona para actualizar la base de datos de las bombas. El botón crear, sirve para guardar una nueva dentro de la base de datos. Los botones de graficar sirven para graficar la curva de potencia vs caudal o cabeza vs caudal de la bomba seleccionada dentro de la base de datos y con la opción de eliminar se eliminan las gráficas respectivamente. Finalmente, la opción de procesar funciona para el cálculo de la demanda de energía eléctrica según la cantidad de bombas centrífugas usadas en la planta de tratamiento. Esta metodología de cálculo se podrá observar en la siguiente sección.

3.1.1 Opción Crear

Cuando se quiere guardar una nueva bomba dentro de la base de datos, se usa la opción de crear, cuando este botón es presionado, se muestra la siguiente figura.



Figura 12. Interfaz para la opción de crear

En la figura 12 se observa que, para guardar una nueva bomba dentro de la base de datos, se debe introducir inicialmente la marca de la bomba, en ese recuadro es importante colocar la marca y referencia de la bomba, para que sea fácilmente identificada por el usuario. Para poder guardar la curva característica de la bomba, se definen 2 opciones, por medio de una función polinómica o por medio de puntos.

Cuando se selecciona la opción polinómica, es importante colocar el grado de la función polinómica e inmediatamente se muestra el siguiente recuadro.

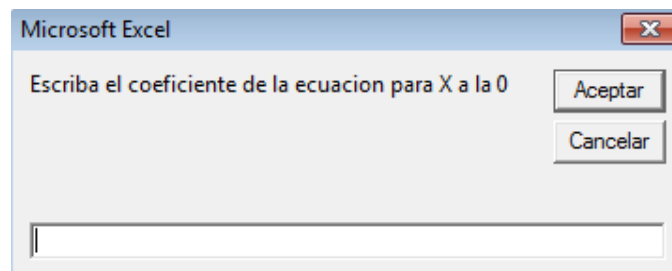


Figura 13. Interfaz para la función polinómica de las curvas características.

En este recuadro se deben colocar los coeficientes de la función polinómica desde su grado menor hasta el mayor para las curvas de cabeza vs caudal y potencia vs caudal.

Si por el contrario se selecciona la opción de puntos, se muestra la siguiente figura.

| Caudal | Potencia | Cabeza |
|----------------------|----------------------|----------------------|
| <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> |
| <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> |
| <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> |
| <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> |
| <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> |
| <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> |
| <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> |
| <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> |

Figura 14. Interfaz para guardar las curvas características por medio de puntos.

En esta opción se debe colocar punto a punto el valor de potencia y cabeza que posee la bomba a diferentes caudales, para poder generar las curvas características con estos puntos.

3.1.2 Opción de graficar

Para graficar las curvas características de la bomba, es importante inicialmente seleccionar la bomba dentro de la base de datos, como se muestra en la figura 15.

Figura 15. Bomba seleccionada en la interfaz.

Una vez seleccionada la bomba se procede a graficar las curvas características de la bomba por medio del método que fue guardada la bomba. Las curvas mostradas por la interfaz se muestran a continuación.

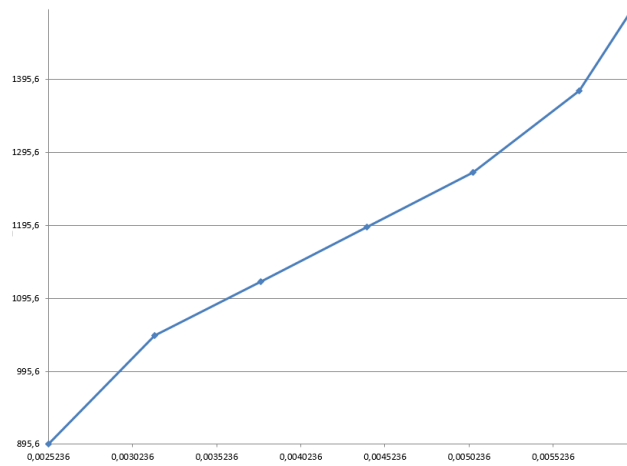


Figura 16. Grafica de Potencia vs Caudal por medio de puntos.

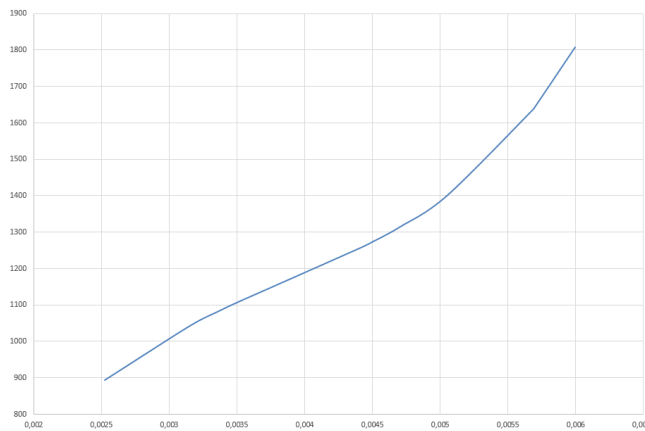


Figura 17. Curva de potencia vs caudal por medio de función polinómica.

Gráficamente se puede observar que las 2 figuras son muy parecidas entre sí, pero matemáticamente es más exacto hacer uso de la función polinómica, debido a que por medio de una gráfica de puntos, para calcular la potencia de la bomba a una caudal específico es necesario interpolar entre los puntos que se conocen, y esto puede llevar a inexactitudes en el cálculo.

3.1.3 Opción de Procesar

Cuando se selección la opción de procesar, es importante que en la hoja 2 del documento de Excel exista el plan volumétrico de campo castilla. Ya que de esa hoja es de donde se obtiene el dato de caudal, el cual es la entrada al modelo de

cálculo para obtener la energía eléctrica consumida por las bombas, además del caudal, se necesita el número de bombas que se usan en la planta como dato de entrada para calcular la demanda.

A continuación se muestran las ecuaciones que se utilizaran para el cálculo de la energía consumida por las bombas.

$$E_{consumida} = \frac{P_{bomba}}{\eta_{bomba} \eta_{Motor}} * t * N_{bombas} \quad (13)$$

$$P_{bomba} = \rho g Q H \quad (14)$$

$$\eta_{bomba} = \frac{C_H C_Q}{C_P} \quad (15)$$

$$C_Q = \frac{Q}{n D^3} \quad (16)$$

$$C_P = \frac{P}{\rho n^3 D^5} \quad (17)$$

$$C_H = \frac{g H}{n^2 D^2} \quad (18)$$

En donde la cantidad de bombas, la eficiencia del motor y el caudal son datos de entrada al modelo de cálculo. La ecuación 14 representa el cálculo de la potencia hidráulica de la bomba, en donde la cabeza de la bomba (H) se obtiene con ayuda de las curvas características y el caudal.

La ecuación 15, calcula la eficiencia de la bomba por medio de unas variables adimensionales las cuales dependen del caudal, cabeza, potencia, diámetro del impeller y velocidad de rotación. Los datos de potencia y cabeza se obtienen de las curvas características, el diámetro del impeller se pide al momento de crear la bomba en la base de datos y la velocidad de rotación se deja como una constante.

3.1.4 PROGRAMACION DE LA INTERFAZ

Para la programación de la interfaz de usuario, se hizo uso de visual basic en Excel, en donde se parte de la creación de la interfaz a mostrar.

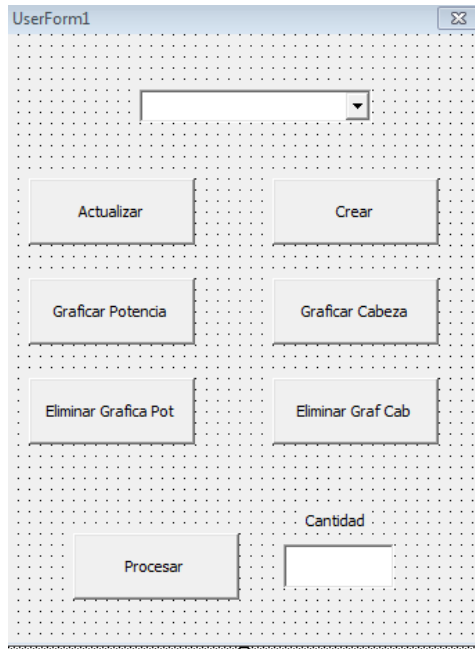


Figura 18. Creación de la interfaz

Y para la creación de cuadros de texto, botones y etiquetas se hace uso de la barra de herramientas del visual basic, como se muestra en la figura 19.

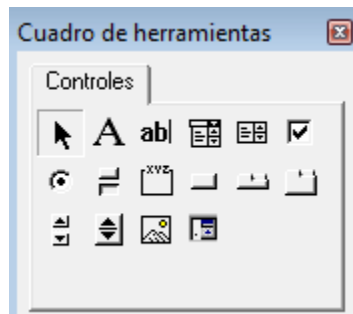


Figura 19. Herramientas Visual Basic.

Una vez la interfaz es finalizada, se procede a escribir el código dependiendo de la acción que realice el usuario, para este caso, el código se debe ejecutar en el momento en que el usuario presiona algún botón, por lo que el código debe iniciar con la creación de una rutina al momento de presionar el botón. Como se muestra en la siguiente figura.


```

Private Sub Actualizar_Click()
ComboBox1.Clear
conteo = Worksheets("Hoja1").Range("A1").CurrentRegion.Rows.Count
For i = 2 To conteo
ComboBox1.AddItem Cells(i, 1)
Next i

End Sub

```

Figura 20 Código visual basic para presionar un botón.

En la figura anterior se observa que se inicia una subrutina en el momento en que se da click al botón de actualizar, cabe resaltar que visual basic hace uso de programación orientada a objetos, por lo que siempre es necesario hacer el llamado del objeto el cual se va a utilizar. Por ejemplo como se observa en la figura 20. La variable conteo hace referencia al número de filas que se encuentran en la columna A1 de la hoja 1. Por lo tanto para poder llegar al número de columnas es necesario inicialmente llamar a la hoja de trabajo llamada hoja 1, después llamar a la columna A1 y finalmente realizar el conteo de las filas por medio de un método que posee internamente visual basic.

Una vez se conoce como realizar el llamado de cada una de las celdas al interior de una hoja de Excel seleccionada, la programación por medio de visual basic posee la misma lógica que cualquier lenguaje de programación, en donde se pueden hacer uso de condicionales como IF-ELSE, o ciclos como lo son el FOR o el WHILE. Estos pueden observarse en la figura 21.

```

Private Sub GraficarCab_Click()
a = Worksheets("Hoja1").Range("asd").Rows.Count
For i = 2 To a
If Cells(i, 1) = ComboBox1.Value Then
pos = i
End If
Next i

```

Figura 21 Uso del IF y FOR en un código visual basic.

Finalmente, con ayuda de este lenguaje de programación se puede realizar la creación de todas las opciones que se explicaron de la interfaz de usuario.

3.2 INTERFAZ DE USUARIO 2.0

Se decidió crear una nueva interfaz de usuario en Excel, debido a que la anterior presentaba aun muchos problemas a la hora de realizar el cálculo de la potencia y podía ser muy confusa para el usuario, además esta nueva interfaz sería más sencilla al momento de calcular la potencia eléctrica de las bombas dentro de la planta de tratamiento.

Ademas esta nueva interfaz cacularia la potencia consumida por las bombas para las plantas de tratamiento de diferentes campos, y también la potencia consumida por las plantas de recobro. La interfaz inicialmente tiene la apariencia mostrada en la siguiente figura.



Figura 22. Interfaz de Plantas de tratamiento y recobro.

En esta parte de la interfaz, es donde se le pide al usuario que busque el archivo de Excel en donde se encuentran los planes volumétricos para los diferentes campos. Una vez el plan volumétrico es seleccionado, se puede ingresar al cálculo de las plantas de tratamiento o de las plantas de recobro.

3.2.1 Plantas de Tratamiento

Cuando se selecciona plantas de tratamiento, se habilita la siguiente hoja de la interfaz.

TRATAMIENTO

| No Bombas | Marca | Agua | Crudo | Mezcla | Eficiencia Max | Caudal a Eff Max | D | E | * API (Crudo) |
|-----------|-------|------|-------|--------|----------------|------------------|---|---|---------------|
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |

Ecuación de cabeza implementada:
 $H = A * Q^2 + B * Q + C$

Ecuación de eficiencia implementada:
 $\eta = D * Q^2 + E * Q$

Figura 23. Sección 1 de la interfaz.

En esta sección es donde se realizará el cálculo de la potencia eléctrica consumida por las bombas que se introduzcan al usar el botón calcular, pero dado el caso en que no hubiera ninguna bomba seleccionada para el cálculo, se debe usar el botón agregar bomba para poder ir a la otra sección de la interfaz la cual se puede observar en la siguiente figura.

| Marca | | |
|--------------|-------------|------------|
| REDA | | |
| Caudal (GPM) | Cabeza (m) | Eficiencia |
| 0 | 3375,527426 | 0 |
| 175,02 | 3094,233474 | 0,45 |
| 350,04 | 2812,939522 | 0,72 |
| 466,72 | 2601,969058 | 0,81 |
| 583,4 | 2320,675105 | 0,85 |
| 700,08 | 1898,734177 | 0,82 |
| 816,76 | 1265,822785 | 0,65 |
| | | |
| | | |
| | | |

$H = A * Q^2 + B * Q + C$

| A | B | C |
|-----------|--------------|-------------|
| -2,44E-03 | -0,421940865 | 3318,988369 |

$\eta = D * Q^2 + E * Q$

| D | E |
|-------------|------------|
| -2,7029E-06 | 0,00302462 |

| Caudal Optimo | Eficiencia |
|---------------|-------------|
| 571,732 | 0,845763813 |

Figura 24. Sección 2 de la interfaz.

En esta sección de la interfaz es donde se pueden buscar bombas guardadas en la base de datos, y de lo contrario si la bomba no existe, se puede agregar una nueva bomba introduciendo los valores de cabeza y eficiencia para diferentes caudales. Estos valores pueden ser encontrados en las curvas características de cada bomba.

Es necesario introducir estos puntos para obtener las constantes A, B y C las son las representativas de la curva Cabeza vs Caudal, y también las constantes D y E las cuales representan la curva de Eficiencia vs Caudal. Estas constantes se usarán para facilitar el cálculo de la cabeza y de la eficiencia de la bomba a los caudales dados por el Plan volumétrico a 2036.

Esta sección una vez se introducen los puntos de caudal, cabeza y eficiencia, posee las opciones de guardar la bomba en la base de datos, de calcular las constantes de las curvas características y además de calcular el caudal de la bomba en donde se presenta la máxima eficiencia posible.

Una vez se selecciona la bomba con la cual se quiere realizar el cálculo de la potencia eléctrica, se usa la opción de agregar y los datos de la bomba (como constantes y caudal de máxima eficiencia) son importados a la sección 1 de la interfaz, de igual forma se puede agregar más de 1 bomba a la sección 1. Una vez se agregaron todas las bombas necesarias para el cálculo, se usa la opción de "Volver a interfazET" para volver a la sección 1 de la interfaz.

Con las bombas agregadas la sección 1 de la interfaz tendría la siguiente apariencia.

TRATAMIENTO

| No Bombas | Marca | Agua | Crudo | Mezcla | Eficiencia Max | Caudal a Eff Max | D | E | ° API (Crudo) |
|-----------|-------|------|-------|--------|----------------|------------------|-------------|----------|---------------|
| 15 | REDA | | | x | 0,845763813 | 571,732 | -2,7029E-06 | 0,003025 | 30 |
| 15 | QWER | | x | | 0,735118663 | 544,5066667 | -2,3976E-06 | 0,002656 | 30 |
| 15 | REDA | x | | | 0,845763813 | 571,732 | -2,7029E-06 | 0,003025 | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |

Ecuación de cabeza implementada:
 $H = A * Q^2 + B * Q + C$

Ecuación de eficiencia implementada:
 $\eta = D * Q^2 + E * Q$

Agregar Bombas

Calcular

Figura 25 Sección 1 de la interfaz con las bombas agregadas

Una vez las bombas son agregadas, antes de usar la opción calcular, es necesario llenar los espacios de cantidad, densidad y seleccionar si la bomba escogida transportara agua, crudo o mezcla (crudo y agua). Si fue seleccionado crudo o mezcla, es necesario llenar la opción de densidad del crudo (en °API) para que los cálculos se realizan satisfactoriamente.

Con la Sección 1 completa, se procede a usar la opción de “Calcular” para encontrar la potencia eléctrica consumida por estas bombas según la información dada por el plan volumétrico. Para este caso, el plan volumétrico disponible posee datos desde Enero de 2014 a Julio de 2036.

3.2.2 Plantas de Recobro

Una vez Calculada la potencia de las plantas de tratamiento, se procede a habilitar las pestañas de Plantas de recobro, al seleccionar en la Figura 22 plantas de recobro. Esto habilitara la siguiente hoja.



Figura 26. Interfaz Plantas de Recobro.

Esta al igual que en plantas de tratamiento, necesita de una bomba seleccionada de la base de datos para poder realizar los cálculos respectivos. Al seleccionar la opción de “Agregar Bomba” se habilita nuevamente la interfaz mostrada en la figura 24, en donde se puede buscar la bomba, o crearla si es necesario seleccionar la

opción “Agregar a Recobro” para la bomba sea agregada a la interfaz mostrada en la figura 26.

Una vez la bomba es seleccionada, se puede realizar el cálculo para recobro con Agua o Recobro químico, ya que para estos cálculos el único valor que cambia es las propiedades del fluido, pero los cálculos para las plantas de recobro no fue mi responsabilidad dentro de mi trabajo en el grupo de investigación.

Por el contrario, si se quiere realizar el cálculo de la potencia consumida para las plantas de recobro con aire, se debe seleccionar la opción de “Ir a Recobro Aire” para habilitar la hoja para realizar el cálculo para el recobro con aire. Esta nueva hoja se puede observar en la siguiente figura.

| Ingrese el número de etapas | 20 | | | | | | | | | | | | | | | Calcular | |
|-----------------------------|-------------|-----------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------|
| Etapas | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | | |
| V específico | 0,677761695 | 0,5632694 | 0,468118 | 0,38904 | 0,323321 | 0,2687031 | 0,223312 | 0,185588 | 0,154238 | 0,128183 | 0,106529 | 0,088533 | 0,073578 | 0,061148 | 0,050819 | | |
| Trabajo | 15,87471872 | 17,094263 | 18,4075 | 19,82162 | 21,34437 | 22,984115 | 24,74983 | 26,65118 | 28,69961 | 30,90332 | 33,27741 | 35,83388 | 38,58675 | 41,55111 | 44,74319 | | |
| Mes-año | ene-14 | feb-14 | mar-14 | abr-14 | may-14 | jun-14 | jul-14 | ago-14 | sep-14 | oct-14 | nov-14 | dic-14 | ene-15 | feb-15 | mar-15 | abr-15 | may-15 |
| Caudal (millonpie3/día) | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Caudal (m3/s) | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Flujo masico (kg/s) | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Potencia Etapa 1 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Potencia Etapa 2 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Potencia Etapa 3 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Potencia Etapa 4 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Potencia Etapa 5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Potencia Etapa 6 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Potencia Etapa 7 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Potencia Etapa 8 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

Figura 27. Interfaz Recobro Aire

En esta hoja, el usuario lo único que debe hacer es definir el número de etapas que va a tener el compresor y selecciona la opción de calcular para encontrar la potencia con el recobro por aire.

3.2.3 Resultados

Una vez se realizan los cálculos para las plantas de tratamiento y plantas de recobro tanto como para agua, químico y aire, se obtiene la hoja de resultados mostrada en la siguiente figura.

| CASTILLA BES | ene-14 | feb-14 | mar-14 | abr-14 | may-14 | jun-14 | jul-14 | ago-14 |
|---------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Tratamiento | 11.511 | 11.511 | 11.506 | 11.510 | 11.516 | 11.523 | 11.528 | 11.528 |
| Agua | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Químico | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Aire | - | - | - | - | - | - | - | - |

| APIAY BES | ene-14 | feb-14 | mar-14 | abr-14 | may-14 | jun-14 | jul-14 | ago-14 |
|------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Tratamiento | 2.256 | 2.237 | 2.180 | 2.157 | 2.137 | 2.116 | 2.080 | 2.053 |
| Agua | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Químico | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Aire | - | - | - | - | - | - | - | - |

| CHICHIMENE BES | ene-14 | feb-14 | mar-14 | abr-14 | may-14 | jun-14 | jul-14 | ago-14 |
|-----------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Tratamiento | 1.039 | 1.062 | 1.065 | 1.368 | 1.359 | 1.367 | 1.385 | 1.393 |
| Agua | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Químico | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Aire | - | - | - | - | - | - | - | - |

| CHICHIMENE PCP | ene-14 | feb-14 | mar-14 | abr-14 | may-14 | jun-14 | jul-14 | ago-14 |
|-----------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Tratamiento | 252 | 251 | 251 | 267 | 267 | 265 | 264 | 263 |
| Agua | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Químico | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Aire | - | - | - | - | - | - | - | - |

Figura 28. Resultados Numéricos de la interfaz.

En esta hoja de resultados se puede observar mes a mes el consumo de potencia eléctrica para las plantas de tratamiento, para las plantas de recobro con agua, químicos y aire, mes a mes según los datos dados por el plan volumétrico para los campos de Castilla, Chichimene y Apiay según su sistema de levantamiento artificial.

También en esta hoja existe la opción para graficar estos resultados, los cuales se podrán observar en las siguientes figuras.

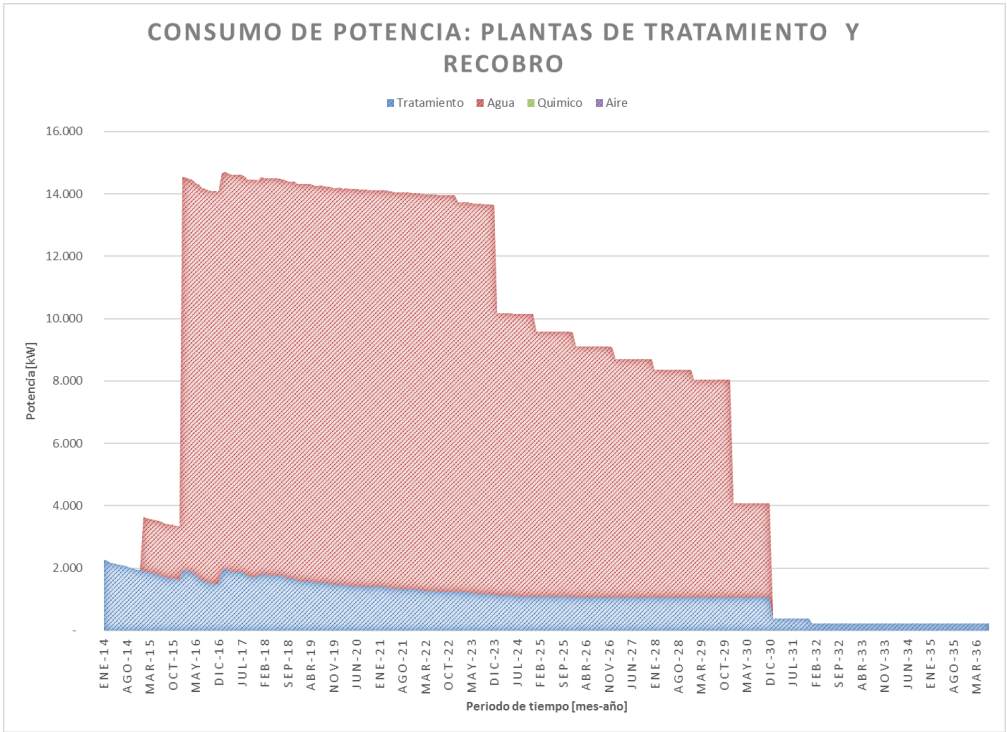


Figura 29. Consumo potencia Apia BES.

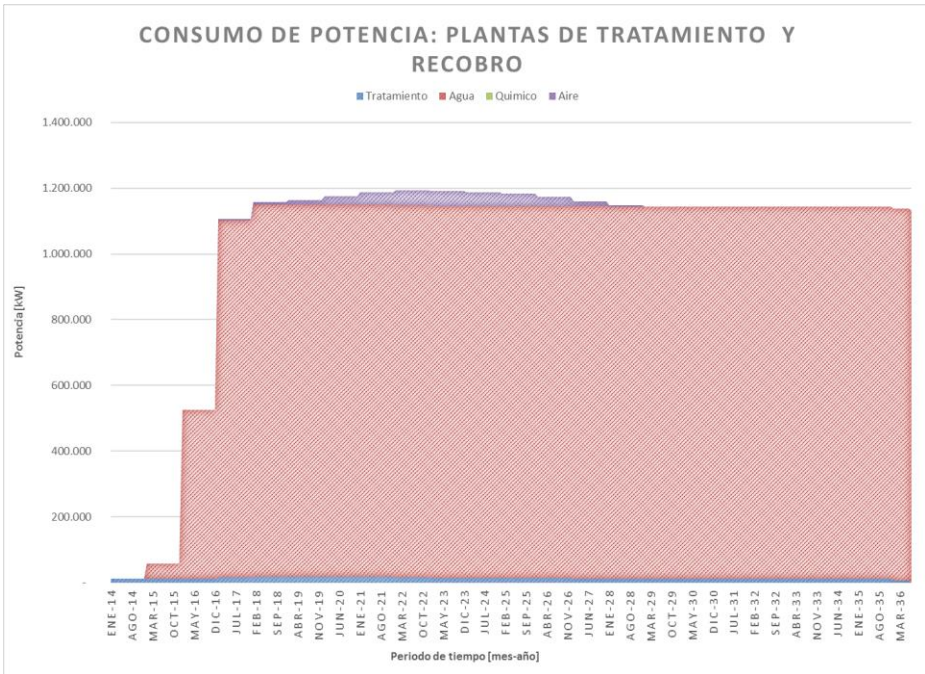


Figura 30. Consumo potencia Castilla BES.

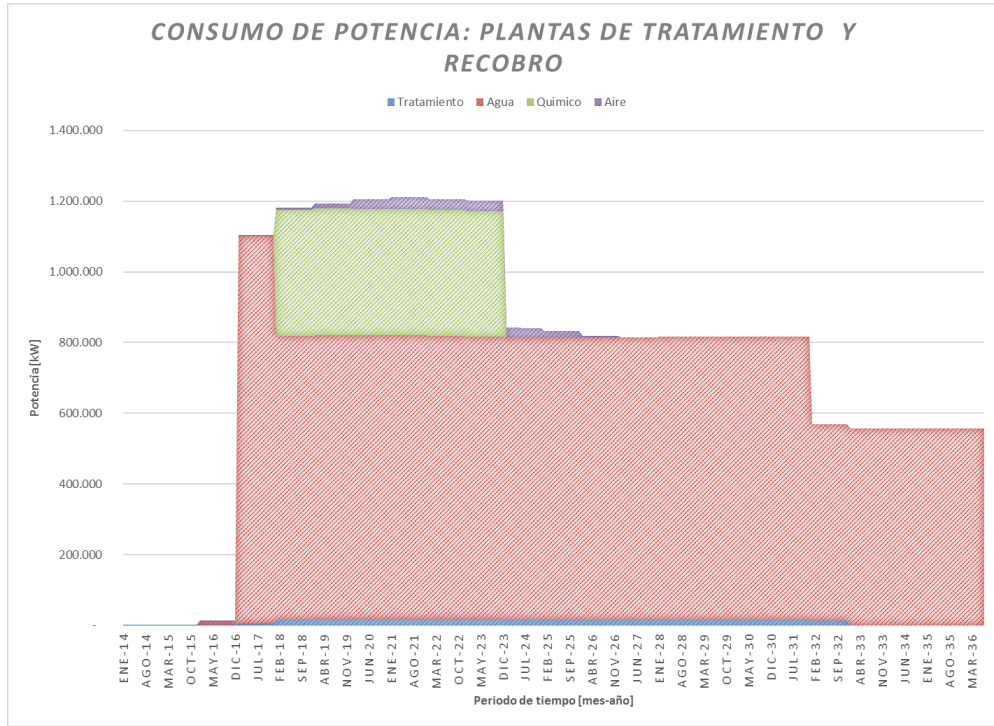


Figura 31. Consumo potencia Chichimene BES.

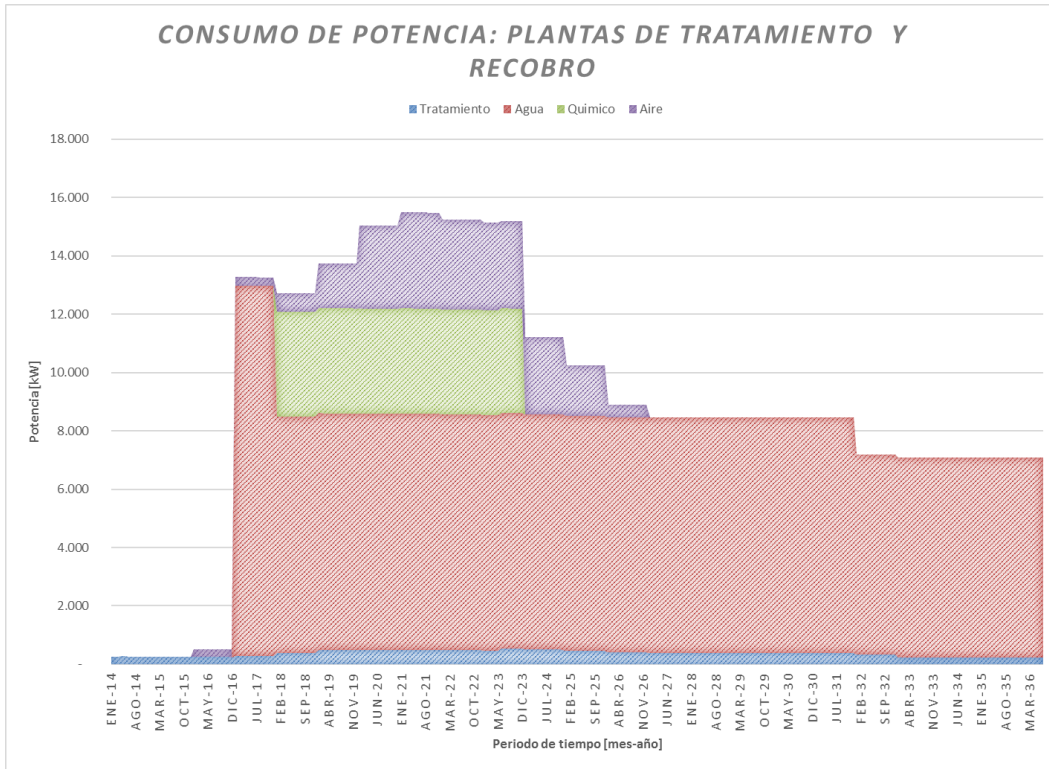


Figura 32. Consumo Potencia Chichimene PCP.

En estas graficas se puede apreciar que la potencia consumida por las plantas de tratamiento es muy pequeña a comparación de la consumida por las plantas de recobro, esto se debe a que el diferencial de presión del fluido para las plantas de recobro puede llegar a ser hasta 100 veces más grande que para las plantas de tratamiento. Y dependiendo del caudal que deba ser transportado puede cambiar el número de bombas que deben ser usadas para mover esa cantidad de caudal.

4 CONCLUSIONES

- Las capacitaciones recibidas durante la práctica ayudaron para adquirir conocimientos en clusterización usando Python, en sistemas de levantamiento artificial y en sistemas de recobro mejorado. Todas las capacitaciones fueron dictadas por personal del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP).
- La interfaz realizada durante la investigación es funcional para cualquier planta de tratamiento de crudo, siempre y cuando se posea la información sobre las curvas características de las bombas usadas dentro de la instalación y del tipo de fluido que transporta cada bomba.
- La potencia consumida por las plantas de tratamiento es muy pequeña a comparación de las plantas de recobro, esto se debe a que la cabeza que debe vencer las bombas en las plantas de tratamiento son muy pequeñas a comparación de las de recobro, ya que estas deben superar un diferencial de presión de más de 3000 psig.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Peralvo, C., Horrillo, A., "Auditoria energetica de la Planta de Tratamiento y recuperacion de crudo intermpetizado de EP Petroecuador". Universidad de Valladolid, Junio 2012.
- [2] White, F., 2016, Fluid Mechanics, 8th ed., McGraw Hill.
- [3] Karassik, I., Messina, J., Cooper, P. and Heald, C., 2007, Pump Handbook, 4th ed., McGraw Hill.
- [4] Moody, L. F., 1926, "The Propeller Type Turbine," ASCE Trans., 89, p. 628.
- [5] Anderson, H. H., 1980, "Prediction of Head, Quantity, and Efficiency in Pumps - The Area-Ratio Principle," ASME Symp. on Performance Prediction of Centrifugal Pumps and Compressors, New York.