

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

MODELACIÓN DE UN SISTEMA DE REINYECCIÓN DE AGUA DE
FORMACIÓN EN UN CAMPO PETROLERO

TESIS DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE MÁGISTER EN
SISTEMAS DE TRANSPORTE DE PETRÓLEO Y DERIVADOS

IVÁN MARCELO ZAMORA AIZAGA

TONY RAMÓN BARAHONA BORJA

ivan.zamora@me.com

tonybarahonaborja@hotmail.com

DIRECTOR: ING. RODIA LENÍN UBIDIA GUERRA
ubidialenin@yahoo.com

2012

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|-----|
| LISTA DE FIGURAS | iii |
| LISTA DE TABLAS | v |
| LISTA DE ANEXOS..... | vi |
| CAPITULO I | 1 |
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| CAPITULO II..... | 4 |
| 2. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN..... | 4 |
| 2.1 ANTECEDENTES..... | 4 |
| 2.2 JUSTIFICACIÓN..... | 7 |
| CAPITULO III..... | 8 |
| 3. ESTACIÓN DE BOMBEO..... | 8 |
| 3.1. DESARROLLO DE LA CURVA CARACTERISTICA DE LA BOMBA | 9 |
| 3.1.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO ¹ | 9 |
| 3.1.2 DEDUCCIÓN DE LA CURVA IDEAL DE LA BOMBA CENTRÍFUGA..... | 9 |
| 3.2 . MODELACIÓN MATEMÁTICA DE LAS CURVAS DE UN SISTEMA DE BOMBEO..... | 15 |
| 3.2.1 CONFIGURACIÓN EN SERIE..... | 15 |
| 3.2.2 CONFIGURACION EN PARALELO..... | 16 |
| 3.3. PARÁMETROS DE VARIACIÓN EN LA ESTACIÓN DE BOMBEO..... | 18 |
| 3.3.1. SISTEMAS DE TANQUE..... | 18 |
| 3.3.2. SISTEMA DE BOMBEO DE BAJA PRESIÓN (BOMBAS BOOSTER)..... | 19 |
| 3.3.3. SISTEMA DE BOMBEO DE ALTA PRESIÓN (BOMBAS INYECCIÓN)..... | 21 |
| CAPITULO IV | 26 |
| 4. REDES HIDRAÚLICAS DE TUBERÍA..... | 26 |
| 4.1 DESARROLLO DE REDES HIDRAÚLICAS DE TUBERÍAS..... | 27 |
| 4.1.1 DEFINICIÓN | 27 |
| 4.1.2 ECUACIONES FUNDAMENTALES DE RED DE TUBERÍAS..... | 27 |
| 4.1.2.1 Ecuación de continuidad en los nudos de la red..... | 28 |
| 4.1.2.2 Ecuación de la energía en los tramos de la red..... | 29 |
| 4.1.3 FORMULACIÓN DE LAS ECUACIONES EN ESTADO ESTABLE..... | 30 |
| 4.1.3.1 Tuberías..... | 31 |
| 4.1.3.2 Válvulas..... | 34 |
| 4.1.3.3 Bombas Centrifugas | 36 |

| | |
|--|----|
| 4.1.3.4 Potencia de las bombas Centrifugas | 36 |
| 4.2 DESARROLLO DE LA LINEALIZACIÓN DE LAS ECUACIONES..... | 38 |
| 4.3 ANÁLISIS DE FLUJO EN EL MEDIO POROSO DE UN YACIMIENTO DE PETRÓLEO. | 42 |
| CAPITULO V | 48 |
| 5. SOLUCIÓN DE LA RED POR EL METODO DE LINEALIZACIÓN DE ECUACIONES | 48 |
| 5.1 TOPOLOGÍA DE LA RED..... | 49 |
| 5.2 APLICACIÓN A REDES HIDRÁULICAS..... | 50 |
| 5.3 PUNTO DE OPERACIÓN DEL SISTEMA. | 54 |
| CAPITULO VI | 63 |
| 6. | 63 |
| APLICACIÓN DEL MODELO EN EL SISTEMA DE INYECCIÓN DE AGUA DE FORMACIÓN | 63 |
| 6.1 ESCENARIO 1: VELOCIDAD DEL FLUIDO EN LA RED DE TUBERÍAS..... | 63 |
| 6.2 ESCENARIO 2: ADICIONANDO BOMBAS EN SERIE Y PARALELO..... | 65 |
| 6.3 ESCENARIO 3: VARIACIÓN DE LA ALTURA DE NIVEL DE TANQUES PARA SUMINISTRO DE FLUIDO. | 70 |
| 6.4 ESCENARIO 4: VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD DE LAS BOMBAS DE INYECCIÓN..... | 71 |
| 6.5 ESCENARIO 5: ESTRANGULAMIENTO DE LOS POZOS INYECTORES..... | 75 |
| 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 79 |
| 7.1 CONCLUSIONES..... | 79 |
| 7.2 RECOMENDACIONES | 80 |
| BIBLIOGRAFIA | 81 |
| ANEXOS..... | 83 |

LISTA DE FIGURAS.

| | |
|--|----|
| Figura 1. Corte de un rodete..... | 10 |
| Figura 2. Curvas característica real e ideal de bombas centrifugas..... | 12 |
| Figura 3. Curvas de NPSHd y NPSHr..... | 14 |
| Figura 4. Instalación típica de bombas en serie..... | 15 |
| Figura 5. Curvas en serie de bombas centrifuga..... | 16 |
| Figura 6. Instalación típica de bombas en paralelo..... | 17 |
| Figura 7. Curvas en paralelo de bombas centrifuga..... | 17 |
| Figura 8. Despliegue gráfico del modelo desarrollado para cada tipo de Bomba y su arreglo en paralelo..... | 20 |
| Figura 9. Curvas en paralelo de bombas centrifugas booster..... | 20 |
| Figura 10. Curvas en paralelo de bombas centrifugas de alta presión..... | 22 |
| Figura 11. Curvas en paralelo del sistema de bomba centrifuga de alta presión..... | 23 |
| Figura 12. Curvas en serie del sistema de bomba centrifuga booster y alta presión..... | 24 |
| Figura 13. Primera ley de Kirchoff..... | 27 |
| Figura 14. Segunda ley de Kirchoff..... | 29 |
| Figura 15. Líneas de energía..... | 31 |
| Figura 16. Curva cuadrática y lineal de la energía..... | 38 |
| Figura 17. Topología de la red..... | 49 |
| Figura 18. Curva del sistema de red y curva del punto de operación..... | 53 |
| Figura 19. Curva del sistema de tuberías y bombas en paralelo a 3600 rpm..... | 55 |
| Figura 20. Curva del Potencial de un Pozo Inyector de agua..... | 62 |

| | |
|---|----|
| Figura 21. Curva de la bomba Centrilit HC-27000 con 51 etapas a 3600 rpm..... | 67 |
| Figura 22. Curva de la bomba Centrilit HC-19000 con 57 etapas a 3600 rpm..... | 68 |
| Figura 23. Curva del sistema de tuberías y bombas a 3700 rpm..... | 71 |
| Figura 24. Curva del sistema de tuberías y bombas a 3500 rpm..... | 72 |
| Figura 25. Curva del sistema de tuberías y bombas a 3450 rpm..... | 73 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Coeficiente “k” perdidas menores..... | 36 |
| Tabla 2. Topología de la red, ramas..... | 49 |
| Tabla 3. Topología de la red, nodos..... | 50 |
| Tabla 4. Resultados del sistema de ecuaciones de la red de tuberías..... | 53 |
| Tabla 5. Datos de entrada para el análisis del yacimiento..... | 60 |
| Tabla 6. Resultados del análisis del yacimiento..... | 61 |
| Tabla 7. Resultados de la red de tuberías en condiciones operativas..... | 63 |
| Tabla 8. Resultados de la red de tuberías variando el diámetro de la tubería..... | 64 |
| Tabla 9. Caudal óptimo de operación variando el número de bombas..... | 65 |
| Tabla 10. Resultados de las corridas del programa apagando bomba..... | 69 |
| Tabla 11. Presión de succión de las bombas booster..... | 70 |
| Tabla 12. Punto optimo de operación variando las rpm..... | 71 |
| Tabla 13. Resultados de las potencia de las bombas..... | 74 |
| Tabla 14. Variación de la presión en cabezal de los pozos..... | 75 |
| Tabla 15. Punto de operación cerrando los pozos inyectores..... | 76 |
| Tabla 16. Resultados de las corridas del programa cerrando los pozos..... | 76 |

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A

| | |
|--|----|
| A.1 Leyes de Afinidad de las bombas centrifugas..... | 83 |
|--|----|

ANEXO B

| | |
|---|----|
| B.1 Curva de bombas centrifugas de inyección de agua Cia. Centrilift..... | 87 |
| B.2 Curva de bombas centrifugas de booster Cia. Goulds pumps..... | 88 |

ANEXO C

| | |
|---|----|
| C.1 Diagrama de conexiones del proceso de agua, sistema de bombeo y red de tubería..... | 89 |
|---|----|

ANEXO D Desarrollo de Soluciones en MATLAB

| | |
|---|-----|
| D.1 Sistemas de Almacenamiento..... | 92 |
| D.2 Sistema de Bombeo de baja presión - Bombas Booster..... | 95 |
| D.3 Sistema de Bombeo de Alta Presión..... | 123 |
| D.4 Interacción de curvas de Succión y Descarga..... | 150 |
| D.5 Curva del Sistema..... | 150 |

RESUMEN

La alta demanda de energía y la constante declinación de la producción del petróleo a nivel mundial, se ve en la necesidad de utilizar la tecnología para aumentar la eficiencia de recuperación del petróleo en campos que han perdido su energía inicial. La producción de petróleo puede ser incrementada inyectando una energía secundaria dentro del yacimiento a través de un pozo inyector, este fluido desplaza al petróleo dentro del yacimiento hacia los pozos productores de petróleo incrementando la recuperación. En el caso de la mayoría de los campos petroleros del Ecuador utilizan agua de formación como energía de recuperación.

Paralelamente, al aumentar la producción del campo, se incrementará la producción de agua como efecto natural del cambio de las fracciones de agua- petróleo, así como del efecto del empuje activo e invasión del acuífero de fondo presente en algunos tipos de yacimientos. Esto obligará a incrementar continuamente la capacidad de inyección y transporte a fin de manejar toda el agua producida. Esta agua antes de ser reinyectada es tratada en procesos muy específicos que permiten extraer ciertos componentes no aptos para el yacimiento además cumplir con las normativas, regulaciones ambientales y exigencias del Estado.

Los pozos inyectores de agua están estratégicamente ubicados con la finalidad de efectuar una recuperación eficientemente. Hasta estos pozos llega el agua de formación bombeada desde el sistema de bombeo ubicado en el centro de procesamiento de fluido a través de una red de tuberías de alta presión.

Esta tesis se orienta a realizar una modelación en estado estable y flujo monofásico del punto óptimo de operación del sistema de bombas y el sistema de redes de tuberías. La simulación se la efectuará con el paquete informático MatLab, debido a que en el mercado son muy costosos o no existe software para modelar un sistema completo de bombas-redes de tuberías.

Para efectuar un diseño de los equipos de superficie, se debe considerar de no sobrepasar los límites de fractura de la roca, en los cálculos efectuados la presión de inyección máxima es 3000 psi.

Básicamente el trabajo se divide en tres partes, La primera parte está orientada al estudio de las bombas centrífugas que son frecuentemente utilizadas en los sistemas de bombeo. Se desarrolló la ecuación general de segundo grado de las bombas centrífugas de refuerzo y la ecuación general de quinto grado de las bombas de alta presión dispuestas en paralelo, como las bombas en estudio son de diferentes tipos se utiliza el método matemático de Newton Raphson para la disposición en paralelo de las curvas. Posteriormente se efectúa un arreglo en serie de los dos sistemas de bombas para obtener la ecuación general del sistema de bombas centrífugas.

En la segunda parte se aplicó el método de linealización de las ecuaciones para resolver el sistema de ecuaciones no lineales aplicada a una red de tuberías. El método de linealización fue desarrollado en la EPN por estudiantes de Ingeniería mecánica en las tesis aplicadas a redes y dirigida por el Ing. Lenín Ubidia. Se basa en la linealización de las ecuaciones de la energía en cada tubería de la red, se aplica la ecuación de continuidad y energía en cada nodo de la red obteniendo un sistema de ecuaciones lineales la cual se resuelve por cualquier método matricial.

Para complementar el sistema de inyección se efectuó la introducción al flujo de fluidos en medios porosos de un yacimiento con la finalidad de obtener la ecuación que gobierna este medio y el potencial del pozo inyector.

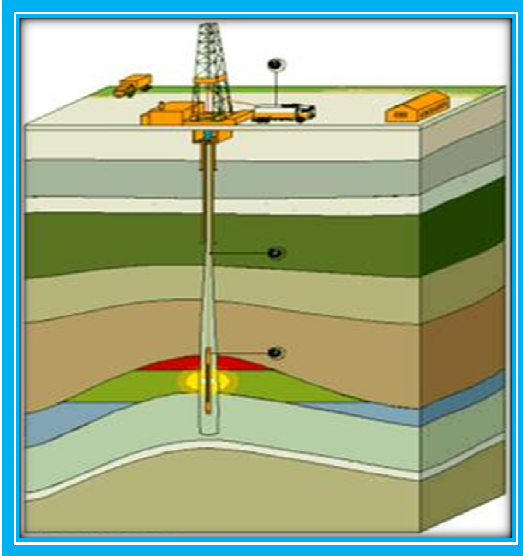
Finalmente, se integraron la curva del sistema de bombas centrífugas y la curva del sistema de redes de tuberías en un solo plano para obtener el punto de intersección, este punto es el óptimo en el cual opera el sistema bombas-red.

Para concluir, se efectuaron varias corridas del sistema en cinco escenarios diferentes con lo cual se pudo obtener un criterio real de las condiciones actuales de

operación del sistema de inyección, a través de lo cual se llegaron a las conclusiones y recomendaciones.

CAPITULO I

1. INTRODUCCIÓN.



Cuando la energía inicial de un yacimiento de petróleo se ha depletado y el caudal del volumen recuperado declina, la producción de petróleo puede ser incrementada inyectando una energía secundaria dentro del yacimiento, esta energía o fluido puede inyectarse a través de un pozo inyector, este fluido desplaza al petróleo dentro del yacimiento hacia los pozos productores de petróleo y gas incrementando la recuperación. En el caso de la mayoría de los campos petroleros del Ecuador utilizan

agua de formación como energía de recuperación.

Por otra parte el incremento constante de la producción de agua como efecto natural del cambio de las fracciones de agua y petróleo del pozo, así como del efecto del empuje activo e invasión del acuífero de fondo presente en algunos tipos de yacimientos, obliga a incrementar continuamente la capacidad de inyección y transporte a fin de manejar toda el agua producida sin tener que paralizar la producción de petróleo de los pozos productores, lo cual afectaría la recuperación final de hidrocarburos y su impacto negativo en pérdidas económicas.

El diseño de las facilidades de producción en superficie debe permite manejar el agua producida de los campos, a través de la inyección del agua en el yacimiento productor, obteniéndose de esta manera dos beneficios: manejar el agua producida y re-presurizar el yacimiento, brindando un soporte efectivo de la presión del yacimiento.

El agua de producción antes de ser reinyectada es tratada en procesos muy específicos que permiten extraer ciertos componentes no aptos para el yacimiento además cumplir con las normativas, regulaciones ambientales y exigencias del Estado.

Los pozos inyectoros de agua están estratégicamente ubicados en la estructura del yacimiento petrolífero, con la finalidad de efectuar la recuperación eficientemente. Hasta estos pozos llega el agua de formación bombeada desde el sistema de bombeo ubicado en el centro de procesamiento de fluido a través de una red de tuberías de alta presión.

Esta tesis se orienta a realizar una modelación del punto óptimo de operación del sistema de bombas en serie y paralelo con el sistema de redes de tuberías de alta presión. Para esto se aplicarán las ecuaciones que gobiernan la hidráulica en tuberías y bombas. Se tratará específicamente el análisis de la capacidad de transporte de la red de tuberías y bombas, limitando esta modelación matemática con flujo monofásico, estado estacionario, isotérmico.

El costo de la construcción y mantenimiento de estos sistemas de inyección de agua son elevados, esto hace que se analice de manera minuciosa y con herramientas informáticas sofisticadas para obtener una operación optimizada y segura en el transcurso de la operación. Los cuatro sistemas de inyección que siempre se están optimizando son:

- ✓ Redes de tuberías de alta presión.
- ✓ Sistemas de bombas para altos volúmenes de fluidos.
- ✓ Demanda de energía de los motores.
- ✓ Perforación y tratamiento de los pozos inyectoros.

La programación y simulación se la efectuará con el paquete informático MatLab, debido a que en el mercado son muy costosos o no existe software para modelar un sistema completo de bombas y la curva del sistema de redes de tuberías.

Con las combinaciones de los caudales y presiones de inyección en la cabeza de los pozos y las ecuaciones del flujo de fluido en el medio poroso se puede determinar el índice de inyección y establecer los posibles problemas de daño (taponamiento) del yacimiento que sufre a lo largo de su vida operativa.

Para efectuar el diseño máximo de las presiones de descarga de las bombas de inyección se debe tomar en consideración de no sobrepasar el límite de presión de la roca del yacimiento, de lo contrario la roca se fractura y el sistema de recuperación secundaria es deficiente debido a que el agua migrará por otros caminos, para el caso de los yacimientos del oriente ecuatoriano el factor de fractura es 0.7 a 1 psi por cada pie de profundidad del yacimiento.

CAPITULO II

2. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN.

2.1 ANTECEDENTES.

En la mayoría de los campos petroleros los sistemas de tratamiento y bombeo de agua de formación son los que más frecuentemente se efectúan modificaciones, con la finalidad de mejorar la calidad del agua a ser inyectada, aumentar la capacidad de proceso y aumentar el volumen de bombeo. Esto se debe al normal aumento de la producción de agua de formación, la adición de los nuevos pozos de petróleos y la necesidad de mejorar la recuperación secundaria del petróleo remanente en el yacimiento.

Los otros sistemas que se modifican para manejar el caudal de inyección son: la red de tuberías y el aumento del número de pozos inyectoros.

En una estación de inyección se encuentran tres grandes grupos o sistemas:

- El sistema de recepción y almacenamiento de agua, dado y dimensionado por la producción de agua de formación del campo y el tiempo de residencia necesario para su tratamiento.
- Un sistema de bombeo de baja presión (bombas booster) cuya succión depende de la altura de los niveles del tanque de almacenamiento y una presión de descarga mínima necesaria para alimentar al sistema de bombas de alta presión.
- Un sistema de bombas de alta presión, para generar la presión necesaria e inyectar el fluido al yacimiento a través de la red de tuberías.

El sistema de tratamiento del agua inyección en el campo de Dorine Battery, se efectúa en los tanques de agua T-755/ T-740/ T-750. La recepción del agua separada proveniente de los trenes de separadores se realiza en el tanque de desnatado T-755, en donde se trata el agua. El agua tratada pasa por reboses a los

tanques de despacho T-740/750, estos tanques operan en paralelo para alimentar al sistema de bombas booster a través de una red de tuberías. El nivel mínimo operativo de los tanque de despacho debe garantizar la suficiente cabeza para que las bombas booster no caviten.

El sistema de bombas booster de inyección de agua, consta de 16 unidades divididas en dos tipos de bombas de diferentes capacidades.

- ✓ Goulds/ Modelo: 3196 LTX – 1.5x3-13, / Motor: 125 HP (40000 bpd)
- ✓ Goulds/ Modelo: 3355 – 5x6-11 B/ES-IND / Motor: 300 HP (12000 bpd)

Estas unidades se encuentran instaladas para operar en paralelo descargando en un cabezal común y tienen como función el suministro de presión para la succión de las bombas principales de inyección de agua. La capacidad de bombeo total del sistema es de 360.000 bpd con 250 psi de descarga y una presión de succión de 5 psi, trabajan a una velocidad constante de 3600 rpm.

En la descarga del sistema de bomba se encuentra una válvula automática de control de presión para mantener la presión de descarga de 250 psi. Cuando abre esta válvula el exceso de fluido bombeado recircula a los tanques de despacho.

El sistema de bombas de inyección consta de 12 bombas multi-etapas divididas en dos tipos de bombas las cuales están dispuestas en paralelo. El volumen total de inyección es de 304000 bfpd con una presión de descarga de 2000 psi (0.5594 m³/s a 1408 m) y una presión de succión de 250 psi, estas bombas también trabajan a una velocidad constante de 3600 rpm.

- ✓ Centrilift/ HC 27000: 51 etapas / Motor: 1250 HP (28000 bfpd a 2000 psi)
- ✓ Centrilift/ HC 19000: 57 etapas / Motor: 1000 HP (20000 bfpd a 2000 psi)

La producción de agua del campo en estudio es de 300.000 bpd la cual es bombeada a los 16 pozos inyectoros a través de una red de tuberías la cual consta de tres tuberías principales de 12, 10 y 8 pulgadas.

Como la producción del campo y la capacidad de bombeo se encuentran al límite máximo, cualquier problema en el sistema de bombas, en la red de tuberías y en los pozos inyectores hace variar las condiciones estables de operación. Enunciaremos algunos problemas que frecuentemente se tiene en el sistema de inyección de agua de formación.

- ✓ Aumento de la producción de agua: Se requiere mayor volumen de inyección por lo tanto mayor número de bombas, tuberías de mayor diámetro, aumentar el número de pozos inyectores y aumentar la presión de inyección de las bombas.
- ✓ Taponamiento de los pozos inyectores en función del tiempo de operación y la calidad del fluido inyectado como: el porcentaje de aceite en el agua de inyección, sólidos (arena, sales) en suspensión.
- ✓ Disminución de la producción de agua: debido a problemas en los pozos productores de petróleo, daños de los equipos de levantamiento artificial, daño en la completación mecánica de los pozos y problemas de yacimiento, todos estos inconvenientes apuntan a los trabajos de reacondicionamientos de los pozos de petróleo y para prolongada de la producción.
- ✓ En la parte de mantenimientos: varían las condiciones cuando se efectúan los mantenimientos correctivos y predictivos a las bombas, motores, arrancadores de los equipos etc.

Por otra parte es necesario definir si el número de bombas en el sistema es el adecuado, para que trabajen eficientemente. Hay que recordar que en un sistema en paralelo entre mayor es el número de bombas instaladas menor es el aporte de caudal, como consecuencia se tiene consumo de energía innecesaria, cualquier perturbación en el sistema puede causar daños severos a las bombas y pérdida de eficiencia debido a que la operación de la bomba se aleja del punto de mejor eficiencia.

2.2 JUSTIFICACIÓN.

La variación en el comportamiento del sistema depende fundamentalmente de las propiedades del yacimiento, los taponamientos eventuales del medio poroso, los daños ocasionales en la red y sistema de bombeo, esto hace que el sistema no sea estable, por lo que es necesario conocer las causas y efectos. Para lo cual se debe modelar el sistema de tal forma que al analizar las variables tengamos una herramienta de optimización.

Para modelar el sistema y tener una herramienta de optimización capaz de manejar las variables de los sistemas antes mencionados con confiabilidad y rapidez en el proceso, utilizaremos un lenguaje de programación de alto nivel y las ecuaciones que gobierna el flujo en redes de tuberías, redes de bombas aplicados al sistema que se está estudiando.

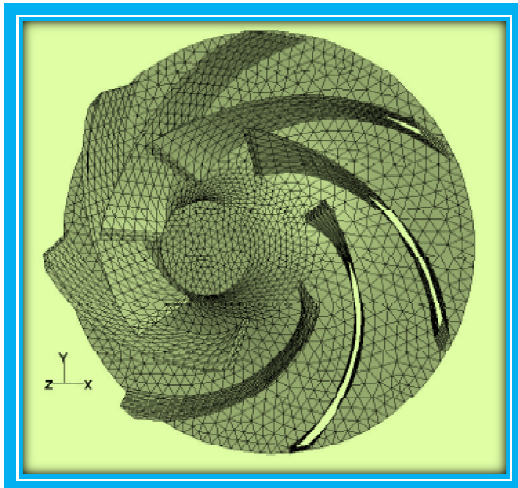
Después de haber calibrado el programa con los parámetros de campo específicamente de la red, se procede a efectuar las variaciones de las variables que altera el sistema para determinar lo siguiente:

- Los caudales que fluyen por cada tramo de tubería.
- Si el diámetro de la tubería es el óptimo para manejar el caudal que fluye sin causar muchas pérdidas de presión.
- Si el número de bombas en paralelo es el adecuado para que trabaje en el punto de eficiencia.
- Minimizar el consumo de energía de los motores de las bombas haciendo trabajar el sistema de bomba en el punto óptimo de operación.

Con todos estos resultados se pueden dar las alternativas para mejorar el sistema y operar eficientemente.

CAPITULO III

3. ESTACIÓN DE BOMBEO



Este capítulo está dedicado al estudio de las bombas centrífugas que son frecuentemente utilizadas en los sistemas de bombeo. Se efectuará el desarrollo de la ecuación de las curvas característica aplicando la semejanza de bombas y los parámetros de variación de utilidades de la estación de bombeo en serie y paralelo: altura, presión, NPSH etc, con estas ecuaciones obtenidas modelaremos en el paquete informático MATLAB con la finalidad de obtener la ecuación del sistema de bombeo, que posteriormente se efectuará un análisis de operación del sistema red-bomba.

3.1. DESARROLLO DE LA CURVA CARACTERISTICA DE LA BOMBA

3.1.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO¹

La bomba centrífuga convierte la energía mecánica en energía hidráulica en el seno del líquido que está siendo bombeado. Esta energía se presenta como energía cinética y/o potencial.

La transferencia de energía del rodete al fluido lo desplaza como si fuera un acelerador de partículas, esta energía se produce en los alabes del rodete cuando la bomba está en funcionamiento, el cambio de presión a energía se lleva a cabo mientras el líquido bombeado rodea el rodete, a medida que el rodete gira, éste imparte un movimiento giratorio al fluido el cual se divide en dos componentes, uno radial que es causado por la fuerza centrífuga, y otro tangencial que es función del diámetro del rodete y de la velocidad de rotación. La resultante de estas dos componentes es la dirección del flujo. El flujo desarrollado dentro del rodete de una bomba centrífuga es tridimensional y no estacionario.

Asumiendo un flujo unidimensional y un número infinito de alabes del rodete se puede calcular la columna ideal de fluido generada por el rodete. La columna real de fluido desarrollada por la bomba es menor que la columna ideal debido a las pérdidas por fricción y choque en el rodete.

3.1.2 DEDUCCIÓN DE LA CURVA IDEAL DE LA BOMBA CENTRÍFUGA

Partiendo de la ecuación general de flujo para cualquier propiedad extensiva de una línea de corriente (trayectoria de una molécula).

$$\frac{dN}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{VC} \eta \rho dV + \int_A \eta \rho \bar{V} dA \quad (1,0)$$

Podemos obtener la ecuación general de la cantidad de movimiento angular la cual utilizaremos para analizar el flujo de fluido en el rodete de una bomba centrífuga.

Aplicando el principio de turbo-bombas y los componentes de la velocidad del flujo a la entrada y salida de la bomba se deduce la ecuación fundamental de la bomba centrífuga considerando un número infinito de álabes y flujo unidimensional, por lo tanto el torque y potencia que se genera al pasar el fluido por el difusor es:

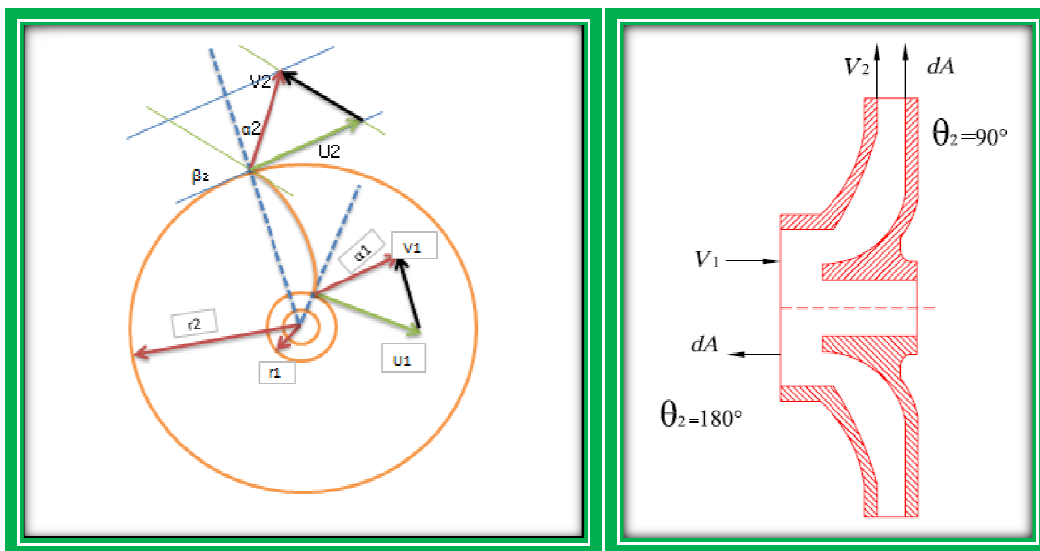


Figura 1. Corte de un rodete

La primera ecuación de Euler para la altura ideal desarrollada por la bomba centrífuga es:

—

De esta ecuación obtendremos la curva ideal de la bomba centrífuga en función de las velocidad de rotación, radio del rodete y el ángulo del alabe.

$$H_B = \frac{4\pi^2}{g} N^2 (r_2^2 - r_1^2) - \left(\frac{1}{\tan \beta_2} - \frac{1}{\tan \beta_1} \right) \frac{N}{\epsilon g} Q \quad (6.0)$$

$$\text{Si ; } a = \frac{4\pi^2}{g} (r_2^2 - r_1^2) \quad \text{y} \quad b = \frac{1}{\epsilon g} \left(\frac{1}{\tan \beta_2} - \frac{1}{\tan \beta_1} \right)$$

$$H_B = aN^2 - bNQ \quad (7.0)$$

Cuando a la curva de la bomba ideal le restamos las pérdidas de carga totales por fricción y choque que se genera al pasar el fluido por el rodete se obtiene la curva real de la bomba centrífuga.

$$H_B = aN^2 - bNQ - cQ^2 \quad (8.0)$$

- U=Velocidad tangencial del rodete (Fuerza tangencial).
- V= Velocidad absoluta del rodete (Fuerza resultante).
- Vr=Velocidad relativa del rodete, componente radial (Fuerza centrífuga).
- r/D = Radio/diámetro del rodete
- T= Torque.
- ω = Velocidad angular
- β = Angulo de salida del rodete.
- Va= Velocidad Axial o meridional.
- V_U = Velocidad
- Donde: $m = \rho Q$
- α = Angulo entre (r y V).
- ϵ_0 = Espesor del rodete.

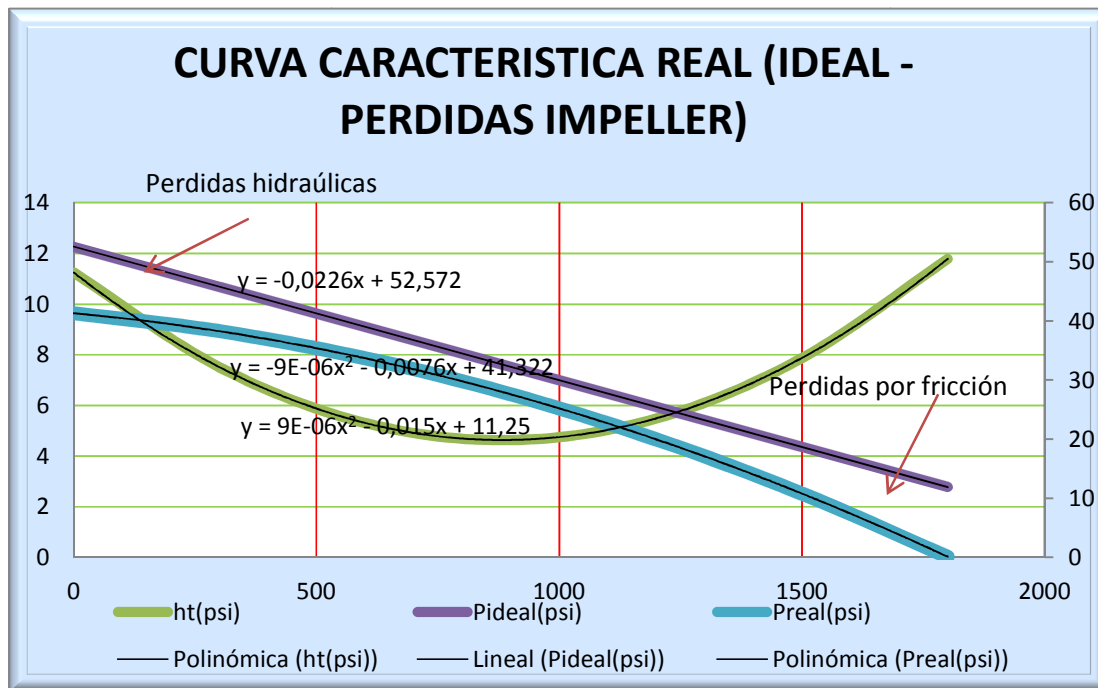


Figura 2. Curvas característica real e ideal de bombas centrífugas

Usando las leyes de afinidad para bombas centrífugas se pueden construir las curvas características para diferentes velocidades como también para diferente diámetros del rodete, partiendo de una velocidad o un diámetro de rodete determinado.

Para cualquier punto en la curva de velocidad estándar, se pueden encontrar puntos equivalentes en las nuevas curvas de velocidad que tengan condiciones hidráulicas casi idénticas; patrón de flujo, equilibrio del empuje axial del rodete y eficiencia de bombeo, obteniendo una gama de curvas para diferentes condiciones operativas.

La deducción de las ecuaciones que utilizaremos para el modelo del sistema de bombas se encuentran en el ANEXO A, en este capítulo incluiremos las ecuaciones ya desarrolladas

- Curva general de quinto grado con diámetro constante.

$$H_2 = Netapas * \left[a \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^3 Q_2^5 + b \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 Q_2^4 + c \left(\frac{N_1}{N_2} \right) Q_2^3 + d Q_2^2 + e \left(\frac{N_2}{N_1} \right) Q_2 + f \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 \right] \quad (9.0)$$

- Curva general de segundo grado.

$$H_2 = a \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^3 Q_2^2 + b \left(\frac{N_2}{N_1} \right) \left(\frac{D_1}{D_2} \right) Q_2 + c \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 \quad (10)$$

Las bombas centrifugas debe tener una presión en la entrada del rodete mayor a la presión de vapor del líquido (Pv) que se está bombeando, si esto no sucede, es decir si la presión en la entrada al rodete es menor a la Pv se forma burbujas de vapor el cual disminuye el espacio por donde pasa el líquido en el rodete (debido a la gran expansión del fluido) además se perturba la continuidad del flujo, produciéndose un bajo caudal, baja altura manométrica, bajos rendimientos.

Siempre que la energía disponible sea igual o exceda los valores de NPSHr, no habrá vaporización del líquido, lo que evitará la cavitación, la consideración de ingeniería es:

$$NPSH_d \geq NPSH_r + 1.5m, \quad \text{mínimo del sistema } NPSH_d \quad (11)$$

La cavitación se produce principalmente en los álabes del rodete de la bomba, donde las fuerzas ejercidas por el líquido al aplastar la cavidad dejada por el vapor dan lugar a presiones localizadas muy altas, erosionando su superficie y causando esfuerzos que pueden originar su destrucción. El fenómeno generalmente va acompañado de ruido y vibraciones.

La vibración excesiva por "cavitación" es una de las causas que comúnmente produce fallas en los sellos y rodamientos de las bombas centrifugas.

Las ecuaciones generales para calcular el NPSHd y NPSHr son:

NPSHd, Presión neta de succión disponible depende de las características y el caudal del fluido bombeado, de la configuración del sistema (diámetro de tubería, altura de succión, pérdidas por fricción, etc.).

- Este primer término, depende del fluido
- Este segundo término depende de las pérdidas y altura del nivel del tanque.

- Pérdidas por fricción en la línea de succión.
- 1 atm=101.325 KPa (Kg/m^2)=10.33 mH₂O(4 C)
- 1 psi=6.89 KPa (Kg/m^2)
- 1 m³/s=543440 bpd
- 1GPM=34.29 BPD

NPSHr, Es una característica particular de la bomba que depende de la forma, el número y el ángulo del rodete, la dimensión de la zona de succión, etc. su valor es determinado experimentalmente y es proporcionado por el fabricante en la curva de la bomba.

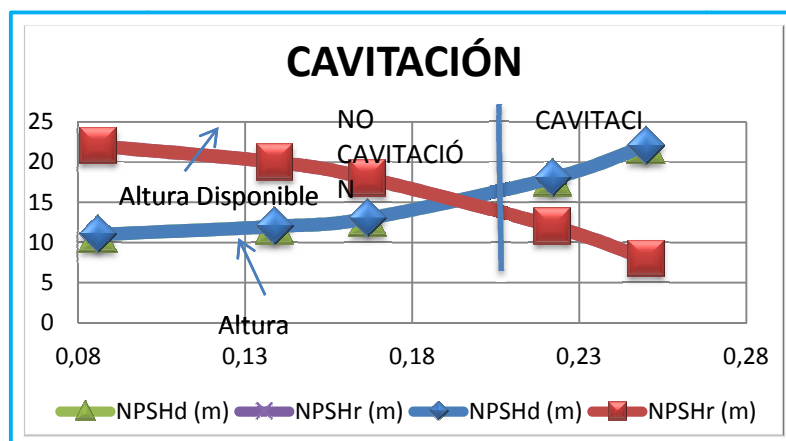


Figura 3. Curvas de NPSHd y NPSHr

3.2. MODELACIÓN MATEMÁTICA DE LAS CURVAS DE UN SISTEMA DE BOMBEO.

En esta sección se tratará la configuración de las bombas en serie y en paralelo para aumentar el caudal y altura con la finalidad de obtener el sistema óptimo para la operación en un sistema de bombas. Se utilizarán las curvas como herramienta para demostrar cómo la configuración de estas bombas se puede usar para optimizar la operación de ductos y redes.

Los rodetes de las bombas centrífugas tienen un limitado número de revoluciones y levantan una determinada altura y caudal, cuando se requiere generar mayor altura se utilizará mayor número de etapas conectadas en serie para alcanzar la altura requerida para las aplicaciones deseadas.

3.2.1 CONFIGURACIÓN EN SERIE.

En la operación de bombas en serie, cada bomba recibe la presión acumulada creada por la bomba o bombas anteriores manteniendo constante el caudal que pasa a través de la bomba. Dicho de otra manera “a cualquier volumen de flujo dado el total de cabeza desarrollada es la suma de la cabeza generada por cada bomba a ese volumen de flujo”.

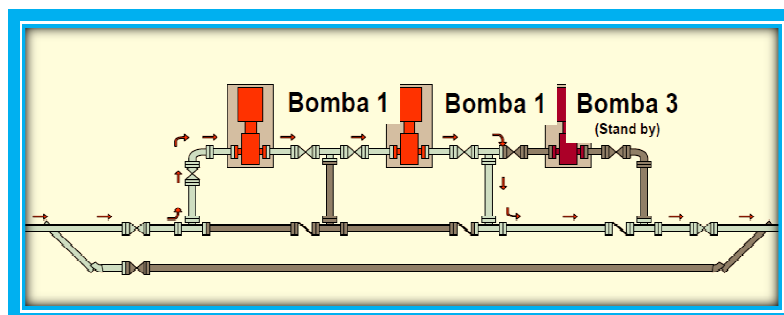


Figura 4. Instalación típica de bombas en serie ¹³

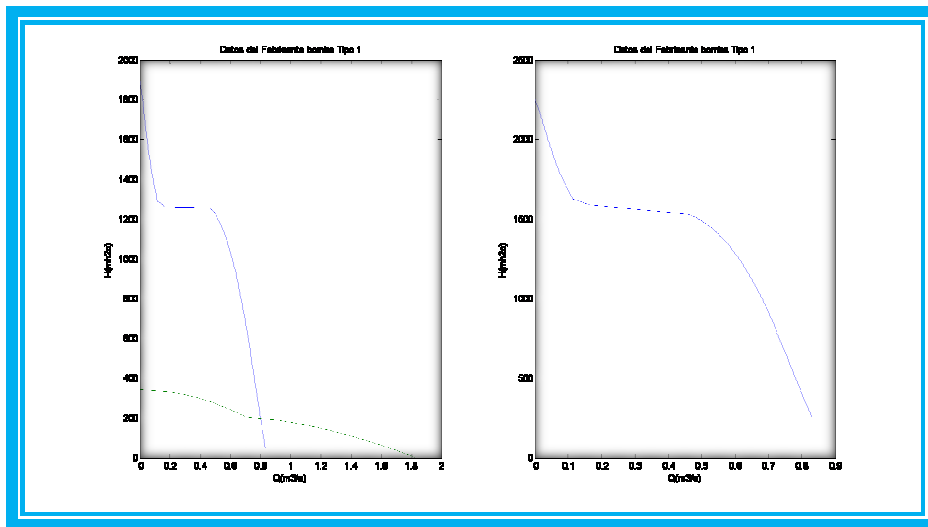


Figura 5. Curvas en serie de bombas centrífuga

3.2.2 CONFIGURACION EN PARALELO.

Las bombas en paralelo descargan la capacidad combinada de cada una de las bombas con la misma cabeza. Generalmente en una operación en paralelo las capacidades de las bombas son aditivas mientras que la carga se mantiene constante.

- Se sumarán los caudales del número de bombas con cargas iguales, para así obtener el caudal total de bombeo.
- La potencia resultante será la suma de las potencias de cada bomba.

Varias empresas han incorporado el uso de bombas en paralelo de múltiples etapas para mejorar la eficiencia y el comportamiento de las unidades en serie de etapa simple.

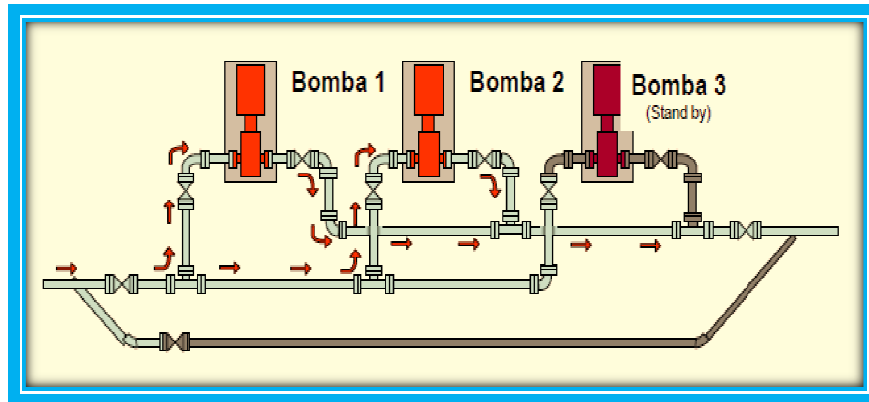


Figura 6. Instalación típica de bombas en paralelo

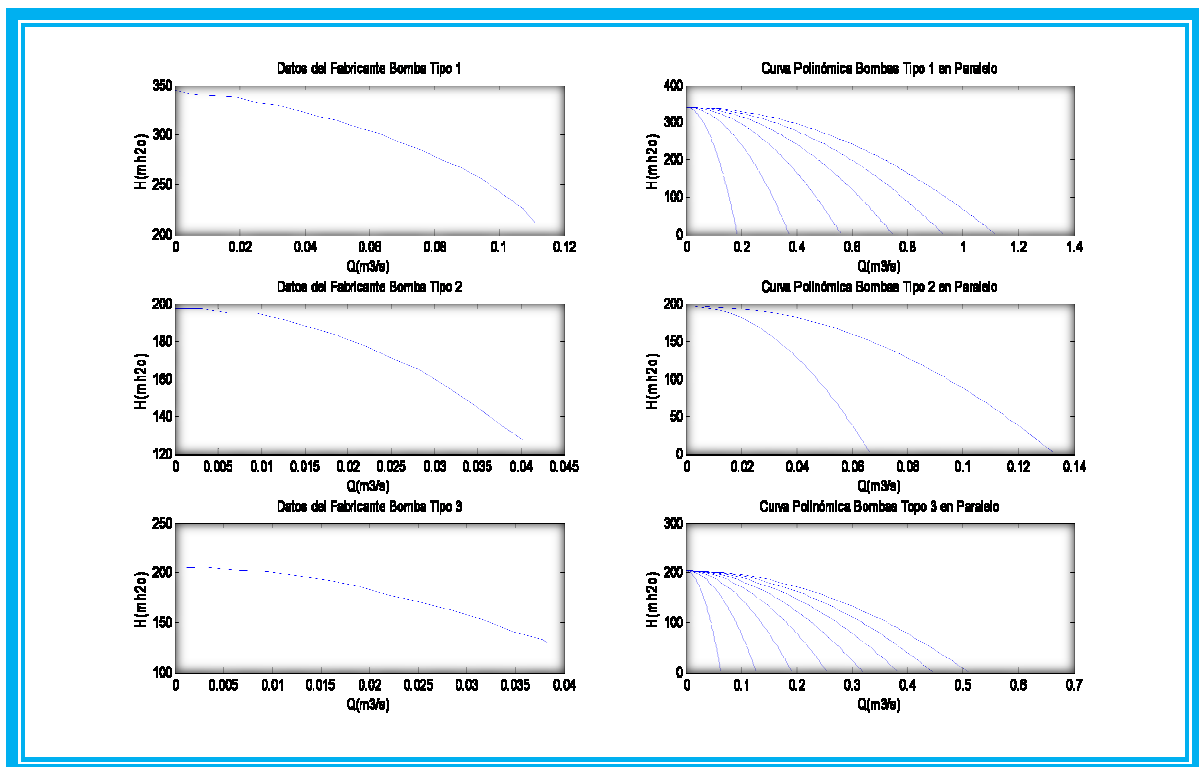


Figura 7. Curvas en paralelo de bombas centrífuga

3.3. PARÁMETROS DE VARIACIÓN EN LA ESTACIÓN DE BOMBEO.

3.3.1. SISTEMAS DE TANQUE.

- El NPSHr requerido según las curvas del fabricante al caudal y presión de operación (40000 bpd y 260 psi) es 5.8 m, este valor de NPSHr es el más alto de las bombas en paralelo que están en el sistema. A este valor de NPSHr se suma 1.5 m por seguridad de ingeniería, entonces se tendrá un valor mínimo del sistema NPSH de 7.3 m.

$$NPSH_{dm} = NPSH_r + 1.5$$

$$NPSH_{dm} = 5.8 + 1.5 = 7.3 \text{ m}$$

- La presión de vapor del líquido que se bombea (densidad y temperatura del fluido) es 41920 Pa.
- La pérdida por fricción en las tuberías entre el tanque de agua y la succión de las bombas es 0.95 m, aplicando la ecuación-13.
- Aplicando la ecuación-12 se tendrá la presión mínima requerida para no producir cavitación en la bomba booster, este valor es 1.415 m.

$$h_{s_{min}} = Z_1 - h_{fs} = NPSH_{dm} - \frac{P_{atm} - P_v}{g * D_w} = 7.3 - \frac{101325 - 41920}{1030 * 9.8} = 1.415 \text{ m}$$

$$h_{s_{min}} = 1.415 \text{ m o } 2 \text{ psi}$$

- Nuevamente despejando la ecuación-12 para saber cuál es el nivel mínimo operativo en los tanques de agua y garantizar que las bombas booster no caviten, se debe de alcanzar la condición de mínima haciendo variar Z1 altura operativa del nivel de agua de los tanques de despacho obteniendo 4m de nivel de fluido para tener una presión en la succión de 4.45 psi.

$$NPSH_{dm} - \frac{P_{atm} - P_v}{\rho g} = (Z_s - h_{fs})$$

$$H_{sb} = (Z_1 - hfs) = 4 - 0.866 = 3.134m$$

$$H_{sb} = 3.134m \text{ o } 4.45 \text{ psi}$$

3.3.2. SISTEMA DE BOMBEO DE BAJA PRESIÓN (BOMBAS BOOSTER)

El sistema de bombas booster está constituido por 16 unidades, las cuales se dividen en tres tipos de bombas.

- **8 bombas P-520 y 2 bombas P-521**
 - ✓ Goulds/ Modelo: 3196 LTX – 1.5x3-13
 - ✓ A 250 psi (580 ft), 349 gpm (12000 bpd), NPSHr=9 ft
- **6 bombas P-522**
 - ✓ Goulds/ Modelo: 3355 – 5x6-11 B/ES-IND
 - ✓ A 250 psi (580 ft), 1168 gpm (40000 bpd), NPSHr=19 ft

Estas unidades se encuentran instaladas para su operación en paralelo y tienen como función el suministro de presión para la succión de las bombas principales de inyección de agua.

Todas las bombas booster operan a 3600 RPM, y el control de flujo lo realiza mediante un lazo de control de presión en la descarga que permitirá mantener la presión en 250 psig abriendo la válvula automática PCV-537 que recircula a los tanques de agua.

Modelando este sistema de bomba en el programa MatLab se obtendrá las siguientes curvas en paralelo.

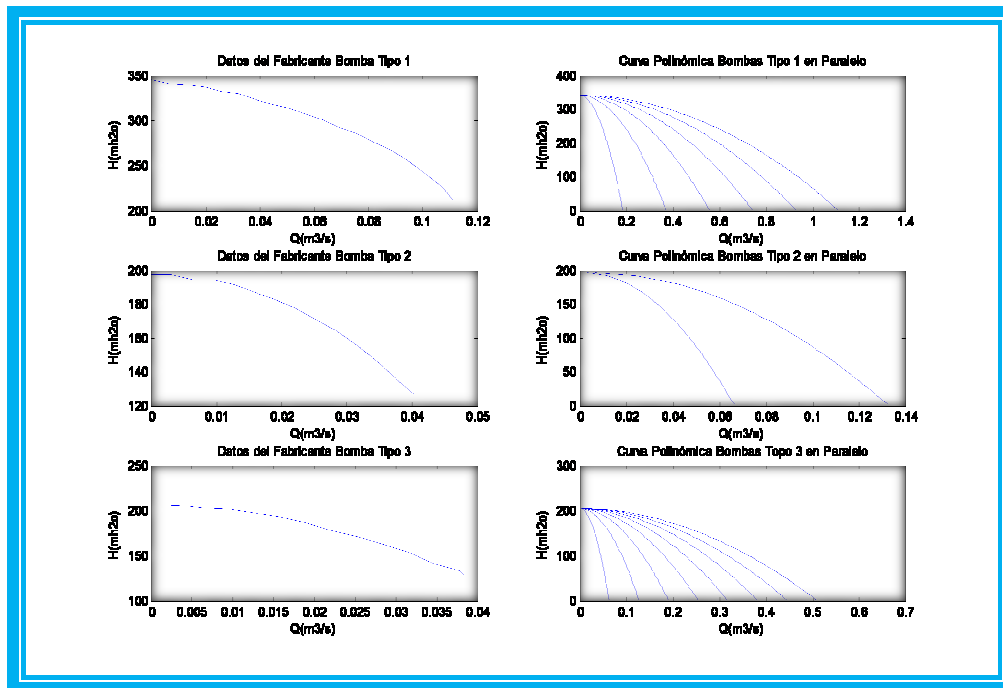


Figura 8. Despliegue gráfico del modelo desarrollado para cada tipo de Bomba y su arreglo en paralelo.

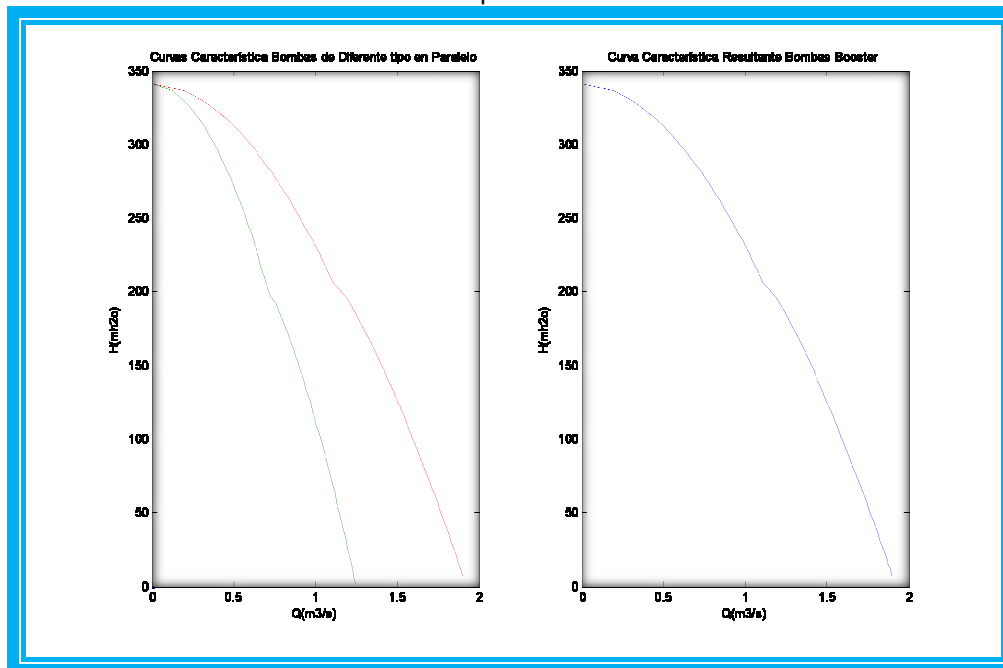


Figura 9. Curvas en paralelo de bombas centrífugas booster.

Para generar las curvas de las bombas centrífugas de las figuras 8 y 9 partimos de los datos de altura y caudal proporcionados por el fabricante para una etapa, estos datos fueron obtenidos en el laboratorio a 3600 rpm, a un diámetro constante de rodete y con agua dulce como fluido de prueba. Con estos datos de caudal y altura lo introducimos en el programa efectuado en Matlab para obtener las constantes a, b, c de la ecuación de segundo grado desarrollada con anterioridad (ecuación-10).

En el lado izquierdo de la figura 8 se visualiza las curvas de cada tipo de bomba y abajo se describe las ecuaciones de las bombas booster.

$$H_{P522} = -10207 Q^2 - 63.919 Q + 250.7$$

$$H_{P521} = -46891 Q^2 + 153.05Q + 196.88$$

$$H_{P520} = -48305 Q^2 - 150.7Q + 205.87$$

En el lado derecho de la figura 8 se visualiza las curvas del sistema de bombas de los tres tipos de bomba existentes en el sistema.

$$\text{ecuación de 6 bombas en paralelo } H_{P522} = -283.53 Q^2 - 10.653 Q + 250.7$$

$$\text{ecuación de 2 bombas en paralelo } H_{P521} = -11723 Q^2 + 76.522 Q + 196.88$$

$$\text{ecuación de 8 bombas en paralelo } H_{P520} = -754.77 Q^2 - 18.83 Q + 205.87$$

Con estas tres ecuaciones de las bombas de diferentes tipos se desarrolla la curva general del sistema de bombas booster a 3600 rpm, como se puede ver en el lado derecho de la figura 9 y la descripción de la ecuación.

$$H_{\text{sistema booter}} = -87.078 Q^2 - 4.1016 Q + 249.15$$

3.3.3. SISTEMA DE BOMBEO DE ALTA PRESIÓN (BOMBAS INYECCIÓN)

El sistema de bombas de alta presión consta de 12 unidades, divididas en dos tipos de bombas.

- **8 bombas P-532**

- ✓ Centrilift/ Modelo: HC-27000, 51 etapas a 3600 rpm.
- ✓ A 1750 psi, 28000 bpd.

- **4 bombas P-531**

- ✓ Centrilift/ Modelo: HC-19000, 57 etapas a 3600 rpm.
- ✓ A 1750 psi, 19900 bpd.

Estas 12 unidades operan en paralelo para suministrar el flujo en los pozos inyectoros y en serie con 51 y 57 etapas para suministrar la presión necesaria para vencer las pérdidas.

En el programa MatLab se modelando el sistema de bombas instaladas en serie y paralelo obteniendo las siguientes curvas.

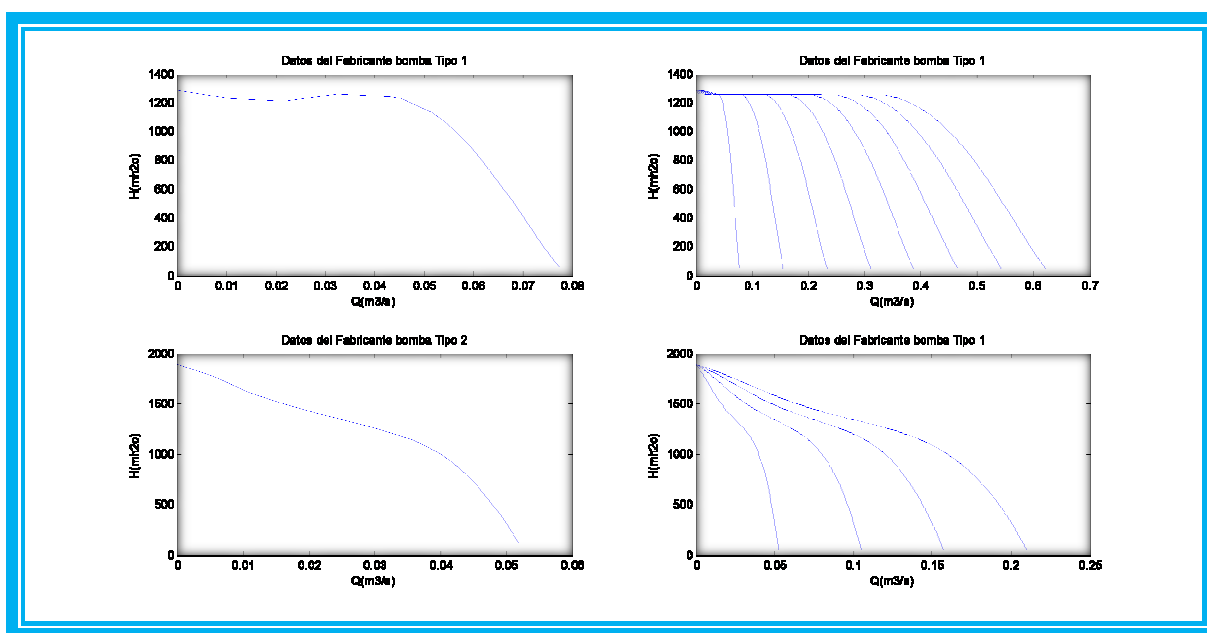


Figura 10. Curvas en paralelo de bombas centrifugas de alta presión.

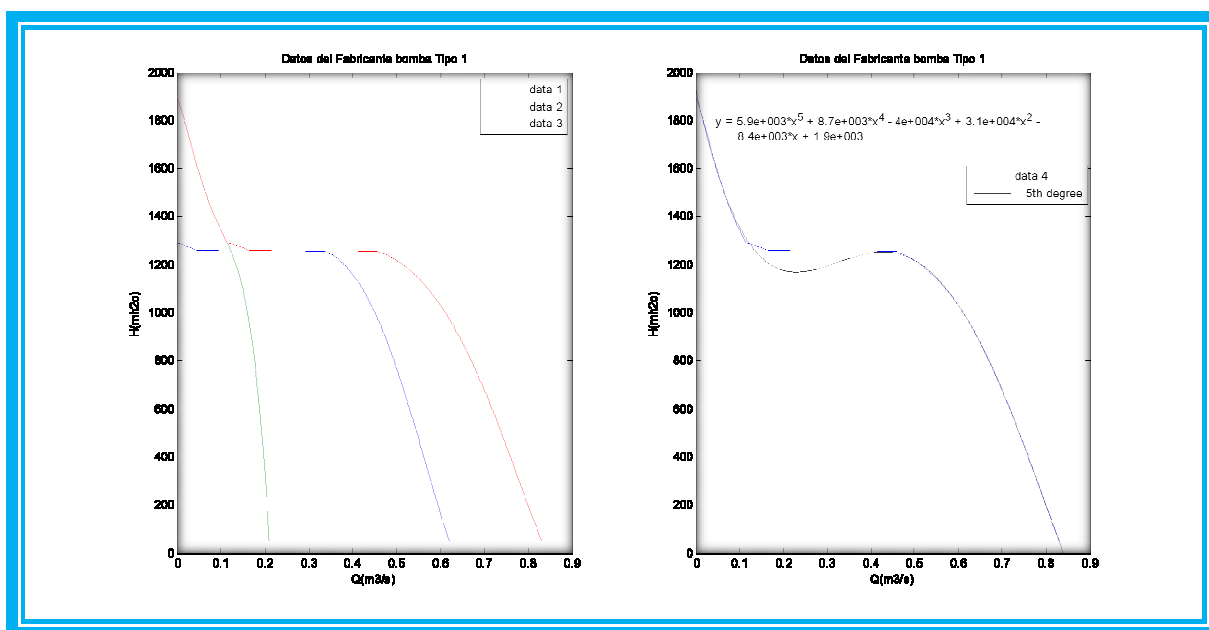


Figura 11. Curvas en paralelo del sistema de bomba centrífuga de alta presión.

Para generar las curvas de las bombas centrífugas de alta presión como se observa en las figuras 10 y 11 partimos de los datos de altura y caudal proporcionados por el fabricante para 51 y 57 etapas en serie, de igual manera estos datos fueron obtenidos en el laboratorio a 3600 rpm, un diámetro constante de rodete y con agua dulce como fluido de prueba. Al igual que en las bombas booster estos datos de caudal y altura lo introducimos en el programa efectuado en Matlab para obtener las constantes a, b, c, e, f, de la ecuación de quinto grado desarrollada con anterioridad (ecuación-9).

En el lado izquierdo de la figura 10 se visualiza las curvas de cada tipo de bomba y sus respectivas ecuaciones de quinto grado.

En el lado izquierdo de la figura 11 se visualiza las curvas del sistema de bombas de cada tipo de bomba del sistema.

Ecuación para 8 bombas en paralelo.

Ecuación para 4 bombas en paralelo.

Como resultado final tenemos la curva total del sistema de bombas de alta presión a 3600 rpm.

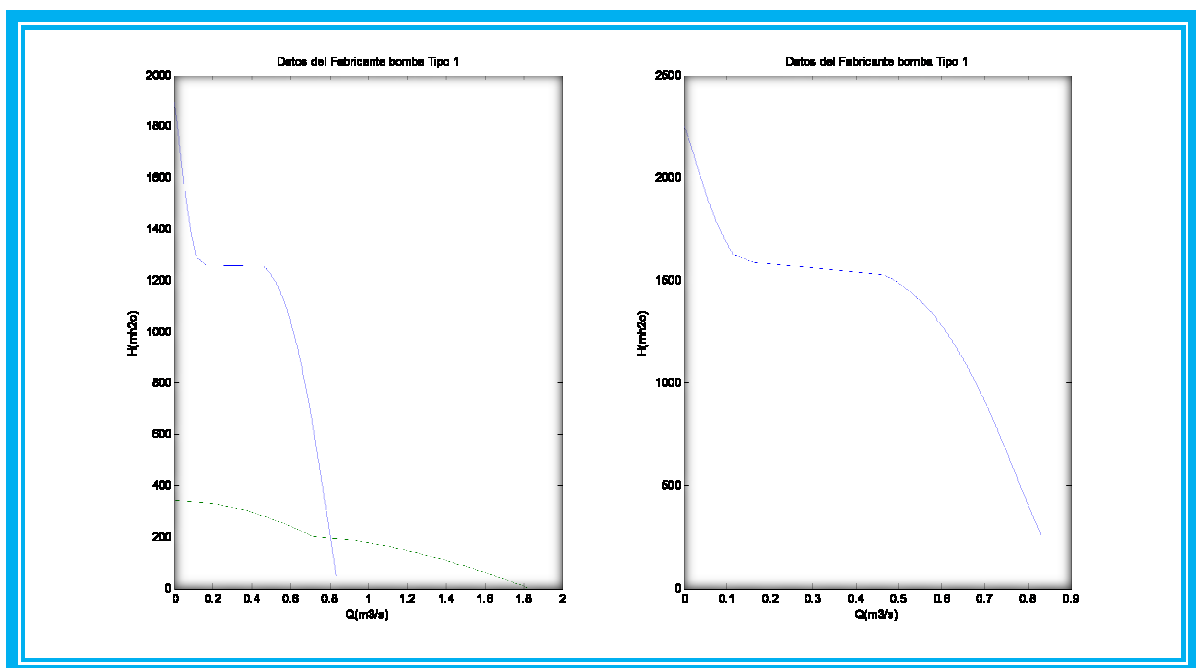


Figura 12. Curvas en serie del sistema de bomba centrífuga booster y alta presión.

Ya desarrollada las curvas del sistema de bombas booster y las curvas del sistema de bombas de alta presión la uniremos en serie para obtener la curva total del sistema. Esto se puede efectuar debido a que las pérdidas por fricción en las tuberías que unen los dos sistemas de bombas son despreciable y prácticamente trabajan como un gran sistema en serie.

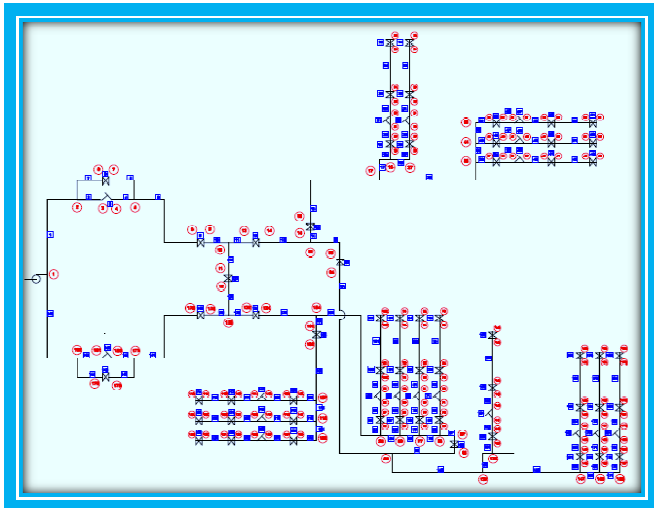
En el lado derecho de la figura 12 tenemos las dos curvas del sistema antes mencionado y en el lado derecho la curva total del sistema de bombas booster/inyección con la cual estaremos trabajando en los análisis posteriores, esta ecuación escrita matemáticamente es:

$$H_{\text{sistema total}} = 1424.6 Q^5 + 2187.4 Q^5 + 12281 Q^4 - 41147 Q^3 + 31145 Q^2 - 8474.2 Q + 2180.2$$

En el ANEXO D se encuentra el programa y los diagramas de flujo de las bombas booster.

CAPITULO IV

4. REDES HIDRAÚLICAS DE TUBERÍA



En este capítulo se desarrollará las ecuaciones en estado permanente para redes de tuberías aplicando el método de linealización de las ecuaciones para resolver el sistema de ecuaciones no lineales, previo a esto se recordará los principios mecánicos que gobiernan el flujo de fluido en redes de tuberías. Por otra parte se efectuará la introducción al flujo de fluidos en medios porosos de un yacimiento petrolero. El método de linealización fue desarrollado en la EPN por estudiantes de Ingeniería mecánica en las tesis aplicadas a redes y dirigida por el Ing. Lenín Ubidia

4.1 DESARROLLO DE REDES HIDRÁULICAS DE TUBERÍAS.

4.1.1 DEFINICIÓN

Las redes de tuberías son conductos cerrados ramificados que forman anillos o circuitos el cual son alimentados desde una o varias fuentes y conducen el fluido a los nudos o extremos finales (consumo) por más de un recorrido posible. En puntos específicos de una red puede descargar o salir fluido (nudo de consumo, nudo de cambio de características de la tubería, diámetro, rugosidad etc.).

En las redes hidráulicas de tuberías se debe establecer ecuaciones para los modelos matemáticos que garanticen una alta exactitud del sistema y rapidez en la convergencia para obtener las alturas piezométricas en los nudos y los caudales que fluyen por cada tubería de la red.

4.1.2 ECUACIONES FUNDAMENTALES DE RED DE TUBERÍAS.

Los principios que gobiernan en las redes de tuberías son: el principio de conservación de la energía y el principio de conservación de la masa o ecuación de continuidad, Kirchoff plantea dos leyes aplicadas a redes hidráulicas.

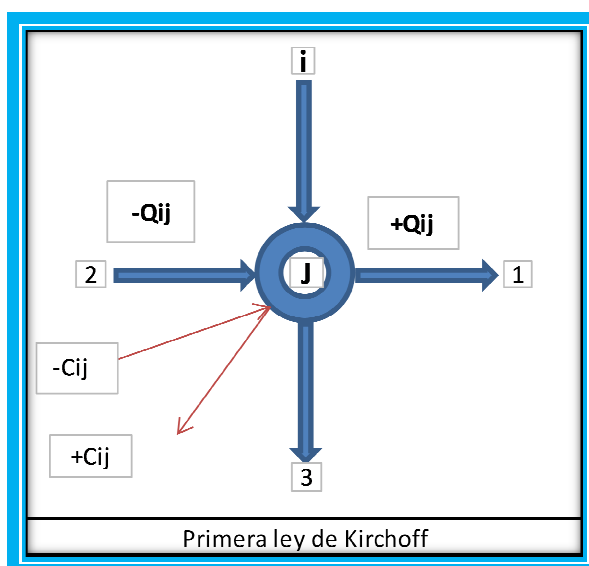


Figura 13. Primera ley de Kirchoff

4.1.2.1 Ecuación de continuidad en los nudos de la red

La primera ley de Kirchoff de conservación de la masa dice: la suma algebraica de los caudales másicos que convergen en un nudo debe ser igual a cero (0).

A este nudo llegará fluido al menos por una tubería y desde este nudo puede salir el flujo como consumo o también el flujo puede salir por una o más tuberías.

Sea Q_{ij} el caudal que circula por el tramo i , y que termina en el nudo j , y sea C_j el caudal que se descarga en el nudo j . La expresión matemática es la siguiente:

$$F_j = \sum_{i=1}^{NV} Q_{ij} + C_j = 0 \quad j = 1, NN \quad (18)$$

- Dónde:
- NN = número de nudos libres en la red
- Q_{ij} = caudal que circula en la línea que une el nudo i al j
- C_j = caudal de alimentación o consumo en el nudo j
- NV = número de nudos vecinos al nudo j

En cada nudo se adopta un criterio de signos: es positivo si el flujo se dirige del nudo i al j (entra al nudo) y negativo si el flujo se dirige de nudo j al i (sale del nudo), si se trata de flujos que circulan por líneas de la red. También es signo positivo aquellos flujos que entran a la red a través del nudo i (aporte) y negativo al flujo que sale del nudo (consumo).

En una red se pueden escribir tantas ecuaciones de continuidad como nudos se tengan.

4.1.2.2 Ecuación de la energía en los tramos de la red.

La segunda ley de Kirchoff de conservación de la energía dice: la suma algebraica de las pérdidas de cargas en los tramos que forman un circuito cerrado igual a cero.

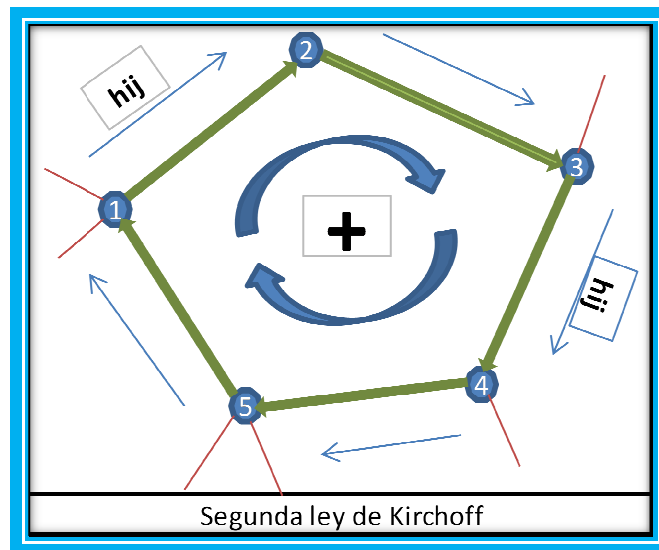


Figura 14. Segunda ley de Kirchoff

Esta expresión exige una convección para el signo de las pérdidas totales en cada tubería: Positivo si ocurre en la dirección del flujo o dirección del recorrido que se plantee y negativa en caso contrario. En todos los circuitos se debe tener la misma dirección de flujo. La mayoría de los textos recomiendan como dirección positiva la del sentido horario.

En una red cerrada se puede escribir tantas ecuaciones de circuito como circuitos elementales se tengan.

4.1.3 FORMULACIÓN DE LAS ECUACIONES EN ESTADO ESTABLE.

Aplicando la ecuación de la energía (Bernoulli), entre el extremo de suministro (tanque, descarga de una bomba) y el otro extremo de descarga, (nudo de consumo, tanque, atmósfera o el inicio de otro conducto), se expresa lo siguiente: la energía por unidad de peso del fluido en la sección aguas arriba, más la energía por unidad de peso cedida al mismo a través de elementos activos, tales como bombas (H_b) en el trayecto de i a j es igual a la energía por unidad de peso en la sección aguas abajo más las pérdidas de energía por unidad de peso entre las secciones i y j .

$$\frac{P_i}{\rho g} + Z_i + \frac{V_i^2}{2g} + H_b = \frac{P_j}{\rho g} + Z_j + \frac{V_j^2}{2g} + H_f + H_m \quad (20)$$

- Dónde:
- $\frac{P_i}{\rho g} = \text{altura de presión}$
- $Z_i = \text{cota geométrica}$
- $\frac{V_i^2}{2g} = \text{altura cinética}$
- $H_b = \text{altura de trabajo motriz}$
- $H_f = \text{pérdidas por fricción}$
- $H_m = \text{pérdidas menores}$

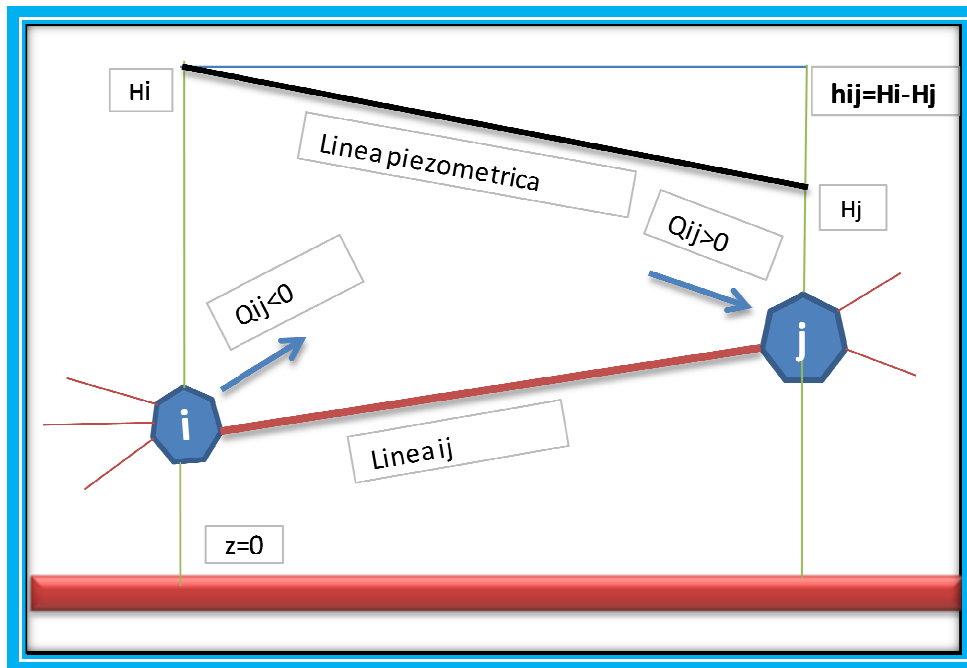


Figura 15. Líneas de energía

Como la velocidad es igual para una tubería de diámetro constante se tiene.

4.1.3.1 Tuberías.

Aplicando la ecuación de Darcy-Weisbach²¹ (para todo tipo de líquidos y regímenes de flujo) en el análisis de las pérdidas de energía en tubería y combinando la ecuación de continuidad se tiene el siguiente desarrollo del modelo.

$$\begin{aligned} & \dots \\ & \dots \\ & \dots \end{aligned}$$

$$H_f = \frac{8}{\pi^2 g} f \frac{L}{D^5} Q^2 = 0.0827 f \frac{L}{D^5} Q^2$$

$$c_{ij} = \frac{8}{\pi^2 g} f \frac{L_{ij}}{D_{ij}^5} \quad (24)$$

$$H_{fij} = c_{ij} Q_{ij}^2$$

$$H_i - H_j = c_{ij} Q_{ij}^2 \quad (25)$$

c_{ij} = Resistencia hidráulica de la tubería diámetro conocido

Esta ecuación la dejamos en función del caudal.

$$Q_{ij}^2 = \frac{(H_i - H_j)}{c_{ij}}$$

$$Q_{ij} = c_{ij}^{-1/2} * (H_i - H_j)^{1/2} \quad (26)$$

Para que tome en cuenta en forma automática la dirección del flujo tenemos.

$$Q_{ij} = \frac{H_i - H_j}{c_{ij}^{1/2} |H_i - H_j|^{1/2}}$$

$$Q_{ij} = c_{ij}^{-1/2} (H_i - H_j) |H_i - H_j|^{-1/2} \quad (27)$$

De la ecuación-22, "f" es un factor a dimensional de fricción, y este depende de ϵ coeficiente de rugosidad de Darcy-Weisbach, en caso de tubería nueva de acero $\epsilon=0.045$ mm, de lo cual la rugosidad relativa ϵ/D , considerando el diámetro de 8"=203.2mm sería:

$$\frac{\epsilon}{D} = 0.00022$$

Y el número de Reynolds:

$$Re = \frac{D * V * \rho}{\mu} \quad (28)$$

Considerando que el fluido de análisis es agua salada con una gravedad específica de 1030 Kg/m³.

Adicionalmente para este cálculo consideremos $D=0.2032m$, $Q=298,000BBLd=0.548m^3/s$ y $\mu=200cp=0,2kg/ms$, de lo cual. Diámetro y caudal en general debe ser cubierto por tramos, en nuestro caso incorporamos valores iniciales promedios o a límite de resistencia.

$$A = \pi \frac{D^2}{4} = 3.1416 * \frac{0.2032^2}{4} = 0.032m^2$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0.548m^3/s}{0.032m^2} = 17.125m/s$$

$$Re = \frac{D * V * \rho}{\mu} = \frac{0.2032m * 17.125m/s * 1030 \frac{Kg}{m^3}}{0,2 \frac{Kg}{ms}} = 17921$$

El coeficiente de fricción f finalmente lo calculamos con la Ecuación modificada de Colebrook-White propuesta por Guerrero²², esta es explícita y los datos se ajustan a los calculados con la fórmula implícita de Colebrook-White.

Donde:

$\frac{\epsilon}{D}$ = Rugosidad relativa del tubo

G y T parámetros de ajuste

$G = 4.555$, $T = 0.8764$ para $4000 \leq Re \leq 105$

$G = 6.732$, $T = 0.9104$ para $105 \leq Re \leq 3 \times 10^6$

$G = 8.982$, $T = 0.93$ para $3 \times 10^6 \leq Re \leq 10^8$

$$f = \frac{0.25}{\log_{10} \left(\frac{\epsilon}{3.7D} + \frac{G}{Re^T} \right)^2} = \frac{0.25}{\left(\log_{10} \left(\frac{0.00022}{3.7} + \frac{4.555}{17125^{0.8764}} \right) \right)^2} = 0.0278 \quad (29)$$

Consideramos, en el caso de calcular el factor de pérdidas “ f ” en la región laminar la ecuación propuesta por Poiseuille en 1846:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (30)$$

4.1.3.2 Válvulas

Para el desarrollo de pérdidas de energía en válvulas se plantea la ecuación general de las válvulas combinada con la ecuación de continuidad para obtener la ecuación general en función del caudal.

$$H = K_v \frac{V^2}{2g} \quad (31)$$

Aplicando la ecuación de continuidad tenemos:

$$H_{ij} = K_v \frac{Q^2}{2gA^2} = K_v \frac{Q^2}{2g\left(\frac{\pi D^2}{4}\right)^2} = \frac{8}{\pi^2 g} \frac{K_v}{D_{ij}^4} Q_{ij}^2 \quad (32)$$

$$c_{vij} = \frac{8}{\pi^2 g} \frac{K_v}{D_{ij}^4} \quad (33)$$

- $K_v =$ resistencia en válvulas.
- $c_{vij} =$ coeficiente de flujo en válvulas

$$H_i - H_j = c_{vij} Q_{ij}^2 \quad (34)$$

$$Q_{ij}^2 = \frac{(H_i - H_j)}{c_{vij}}$$

$$Q_{ij} = \frac{(H_i - H_j)^{1/2}}{c_{vij}^{1/2}}$$

$$Q_{ij} = c_{vij}^{-1/2} (H_i - H_j)^{1/2} \quad (35)$$

Tomando en cuenta la dirección del flujo tenemos.

$$Q_{ij} = \frac{H_i - H_j}{c_{vij}^{1/2} |H_i - H_j|^{1/2}}$$

$$Q_{ij} = c_{vij}^{-1/2} (H_i - H_j) |H_i - H_j|^{-1/2} \quad (36)$$

Las pérdidas menores que se originan en puntos singulares de las tuberías (cambios de dirección, codos, juntas etc.) y que se deben a fenómenos de turbulencia se calcula con la ecuación 33.

$$c_m = \frac{0.0827}{D^4} * \left(\sum_l K_{ij} \right)$$

La suma de estas pérdidas de cargas accidentales o localizadas más las pérdidas por rozamiento se obtienen las pérdidas de carga totales.

$$c_{ij} = \frac{0.0826}{D^4} * \left(\sum_l K_{ij} + \frac{f * L}{D} \right) \quad (37)$$

La tabla siguiente se describe el coeficiente “k” de perdidas menores para diferentes accesorios.

| Accesorios | Coficiente K Pérdidas menores |
|--------------------------------------|-------------------------------|
| T, Bridada, Línea de flujo | 0.2 |
| T, Roscado/soldado, Línea de flujo | 0.9 |
| T, Bridada, línea ramificada | 1.0 |
| T, Roscado/soldado, línea ramificada | 2.0 |
| Unión Roscado/soldado | 0.8 |

| | |
|--|------|
| Codo, Bridada Regular 90o | 0.3 |
| Codo, Roscado/soldado Regular 90o | 1.5 |
| Codo, Roscado/soldado Regular 45o | 0.4 |
| Codo, Bridado Radio largo 90o | 0.2 |
| Codo, Roscado/soldado Radio largo 90o | 0.7 |
| Codo, Bridado Radio largo 45o | 0.2 |
| Válvula de Globo, Totalmente abierta | 10 |
| Válvula angular, Totalmente abierta | 2 |
| Válvula de compuerta, Totalmente abierta | 0.15 |
| Válvula de compuerta, 1/4 Cerrada | 0.26 |
| Válvula de compuerta, 1/2 Cerrada | 2.1 |
| Válvula de compuerta, 3/4 Cerrada | 17 |
| Válvula de retención oscilante, Flujo hacia adelante | 2 |
| Válvula de Bola, Totalmente abierta | 0.05 |
| Válvula de Bola, 1/3 Cerrada | 5.5 |
| Válvula de Bola, 2/3 Cerrada | 200 |
| Válvula de diafragma, abierta | 2.3 |
| Válvula de diafragma, medio abierta | 4.3 |
| Válvula de diafragma, 1/4 abierta | 21 |
| Medidor de Agua | 7 |

http://www.engineeringtoolbox.com/minor-loss-coefficients-pipes-d_626.html

Tabla 1. Coeficiente “k” pérdidas menores.

4.1.3.3 Bombas Centrifugas

La ecuación general de las bombas centrifugas ya fue deducida en el capítulo 3, ecuación 8.

$$H_b = a + bQ + cQ^2$$

4.1.3.4 Potencia de las bombas Centrifugas

La carga de la bomba se la puede calcular empleando la fórmula de potencia hidráulica:

$$P_{bij} = \rho g Q_{ij} (H_j - H_i) \quad (38)$$

El flujo de la bomba siempre es de i a j siendo J un valor más alto que i.

$$Q_{ij} = \frac{Pb_{ij}}{\rho g(H_j - H_i)} \quad (39)$$

Pb_{ij} = potencia de la bomba en watts

Las ecuaciones antes descritas se las trasformar en ecuaciones de campo.

$$BHP = \frac{Q_{ij} (bpd) * (H_j - H_i (pies)) * \gamma}{135771 * n(\%)}$$

$$BHP = \frac{Q_{ij} (gpm) * (H_j - H_i (pies)) * \gamma}{3960 * n(\%)}$$

$$KW = \frac{Q_{ij} \left(\frac{m^3}{s}\right) * (H_j - H_i (m)) * g \left(\frac{m}{m}\right) * \rho \left(\frac{Kg}{m^3}\right)}{1000 * n(\%)}$$

$$BHP = \frac{Q_{ij} (bpd) * (H_j - H_i (psi)) * \gamma}{58900 * n(\%)}$$

La potencia eléctrica que utilizaremos en los cálculos son:

$$KVA = \frac{1.73 * V * I}{1000}$$

$$HP = \frac{1.73 * V * I}{746}$$

$$HP = 1.34 * KW$$

4.2 DESARROLLO DE LA LINEALIZACIÓN DE LAS ECUACIONES.

El sistema de ecuaciones de segundo grado correspondiente a la red de tuberías se resolverá por el método de linealización de la ecuación de la energía debido a que los errores están dentro de la tolerancia para este tipo de redes²⁰.

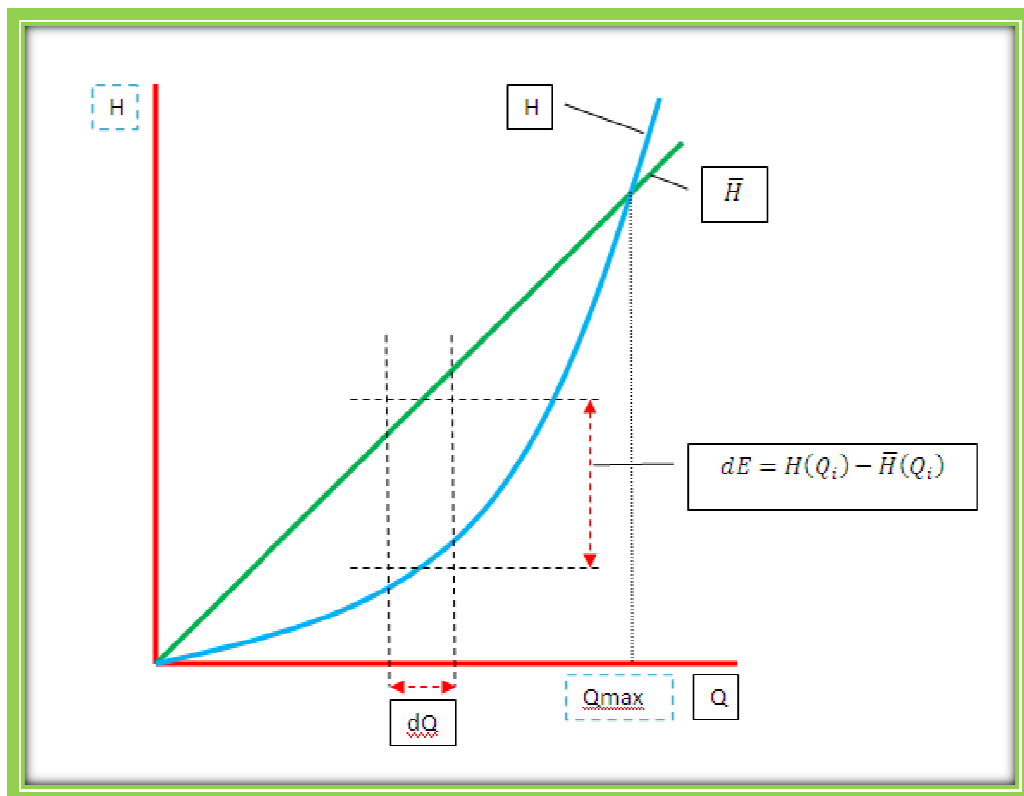


Figura 16. Curva cuadrática y lineal de la energía

La ecuación-25 de energía en tuberías previamente deducida es una ecuación cuadrática.

En forma lineal la ecuación de la energía en tubería es:

$$\bar{H}_{ij} = c_{Lij}Q_{ij} \quad (40)$$

En la figura 16 se visualiza graficada las ecuaciones 25 y 40 de la energía en tuberías cuadrática y lineal respectivamente, en la cual se observa un error entre estas curvas como se describe en la ecuación 41 que es una diferencial del error

$$dE = H(Q_i) - \bar{H}(Q_i) \quad (41)$$

Para minimizar el error a la ecuación 41 se la eleva al cuadrado además se integra entre los límites cero y caudal máximo.

$$dE = (H_{ij} - \bar{H}_{ij})^2 dQ$$

$$E = \int_0^{Q_o} (H_{ij} - \bar{H}_{ij})^2 dQ$$

$$E = \int_0^{Q_o} (c_{ij}Q^2 - c_{Lij}Q)^2 dQ$$

“E” es mínimo cuando es función de c_{ij} y c_{Lij} , entonces tenemos:

$$\frac{\partial E}{\partial c_{ij}} = 0 \quad y \quad \frac{\partial E}{\partial c_{Lij}} = 0$$

$$\frac{\partial E}{\partial c_{Lij}} = 0 = \frac{\partial}{\partial c_{Lij}} \int_0^{Q_o} (c_{ij}Q^2 - c_{Lij}Q)^2 dQ$$

$$\int_0^{Q_o} \frac{\partial}{\partial c_{Lij}} (c_{ij}Q^2 - c_{Lij}Q)^2 dQ = 0$$

$$\int_0^{Q_o} 2(c_{ij}Q^2 - c_{Lij}Q)(-Q)dQ = 0$$

$$\int_0^{Q_0} (-c_{ij}Q^3 + c_{Lij}Q^2)dQ = 0$$

$$\frac{c_{Lij}Q_0^3}{3} - \frac{c_{ij}Q_0^4}{4} = 0$$

$$c_{Lij} = \frac{3}{4}c_{ij} Q_0 \quad (42)$$

La ecuación 42 es la constante de pérdidas en tubería linealizada en función del parámetro Q_0 de linealización de los elementos de la red y la constante de pérdidas general en tuberías.

Por lo tanto la ecuación general linealizada que utilizaremos en los cálculos posteriores es:

$$\bar{H}_i - \bar{H}_j = \frac{3}{4}c_{ij} Q_0 * Q_{ij} \quad (43)$$

Re-arreglando la ecuación 43 en función de la altura $Q=f(H)$ tenemos:

$$Q_{ij} = \frac{\bar{H}_i - \bar{H}_j}{\frac{3}{4}c_{ij} Q_0}$$

La nueva constante de tubería linealizada y ecuación del caudal es:

$$c_{LTij} = \frac{4}{3c_{ij} Q_0} \quad (44)$$

$$Q_{ij} = c_{LTij}(\bar{H}_i - \bar{H}_j) \quad (45)$$

Para obtener la ecuación linealizada de la válvula se parte del mismo principio descrito para las tuberías, considerando la ecuación general en válvulas deducida con anterioridad tenemos.

$$C_{vij} = \frac{8}{\pi^2 g} \frac{K_v}{D_{ij}^4}$$

$$H_i - H_j = c_{vij} Q_{ij}^2$$

La ecuación lineal de las válvulas es:

$$\bar{H}_{ij} = c_{VLij} Q_{ij} \quad (46)$$

Las ecuaciones 47 y 48 fueron deducidas de igual forma que en las tuberías obteniéndose:

$$c_{VLij} = \frac{3}{4} c_{vij} Q_o \quad (47)$$

$$\bar{H}_i - \bar{H}_j = \frac{3}{4} c_{vij} Q_o * Q_{ij} \quad (48)$$

$$Q_{ij} = \frac{\bar{H}_i - \bar{H}_j}{\frac{3}{4} c_{vij} Q_o} \quad (49)$$

$$C_{VLvij} = \frac{4}{3 c_{vij} Q_o} \quad (50)$$

La ecuación linealizada para válvula es:

$$Q_{ij} = C_{VLvij} (\bar{H}_i - \bar{H}_j) \quad (51)$$

- $K_v =$ resistencia en válvulas.
- $c_{vij} =$ coeficiente de flujo en válvulas
- $c_{VLvij} =$ coeficiente de flujo en válvulas linealizada
- $c_{LTij} =$ coeficiente de resistencia en la tubería linealizada

4.3 ANÁLISIS DE FLUJO EN EL MEDIO POROSO DE UN YACIMIENTO DE PETRÓLEO.

La ecuación diferencial que gobierna el flujo de fluido en medios porosos es la ECUACIÓN DE DIFUSIVIDAD, la cual está compuesta por tres ecuaciones fundamentales que son:

- Ecuación de estado (propiedades físicas del fluido).
- Ecuación de Darcy (ecuación radial para flujo en pozos de petróleo).
- Ecuación de la continuidad (forma diferencial de la ley de conservación de la masa).

La ecuación de estado, relaciona las variaciones de las propiedades físicas de fluido como: densidad (ρ), volumen (v), viscosidad (μ), en función de la presión y temperatura. Para nuestro estudio consideraremos variaciones isotérmicas es decir que la densidad es función únicamente de la presión y para fluidos incompresibles como el petróleo y agua (no cambia con variación de la presión).

$$C = -\frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial P} \quad C = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial P}$$

- ✓ C = Compresibilidad del líquido.
- ✓ V =Volumen.
- ✓ P =Presión del reservorio.
- ✓ ρ = Densidad del líquido.

Las ecuaciones de estado de un líquido compresibilidad en función del radio del pozo y tiempo son las siguientes:

$$\frac{\partial P}{\partial r} = \frac{1}{c_p} \frac{\partial \rho}{\partial r} \quad \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{1}{c_p} \frac{\partial \rho}{\partial t}$$

Henry Darcy, físico francés, realizó experimentos de flujo de agua a través filtros de granos de arena, cuyos estudios dedujo la fórmula que lleva su nombre. La cual

establece que la velocidad de un fluido en un medio poroso es directamente proporcional al gradiente de presión e inversamente proporcional a la viscosidad del fluido.

La ley de Darcy para flujo radial de un fluido incompresible en estado continuo es:

$$q = -\frac{kA}{\mu} \frac{\partial P}{\partial r} \quad (52)$$

$$q = -\frac{2\pi rhk}{\mu} \frac{\partial P}{\partial r}$$

Integrando la ecuación anterior entre los límites de presión del pozo (P_{wf}) hasta la presión estática (P_e) y entre los radios del pozo (r_w) y el radio del reservorio (r_e) tenemos la ecuación siguiente:

$$q = \frac{2\pi hk}{\mu} \frac{(P_e - P_{wf})}{\ln(r_e/r_w)}$$

$$P_e - P_{wf} = \frac{q\mu}{2\pi hk} \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) \quad (53)$$

k = La permeabilidad trabaja como una constante de proporcionalidad de la ecuación, se la expresa en md (mildarcy) y es la facilidad que presenta una roca para el flujo de fluido a través del medio poroso.

La caída de presión en el borde del pozo causado por el lodo de perforación se refleja en la reducción de la permeabilidad representándose en la siguiente fórmula.

$$\Delta P_s = \frac{q\mu}{2\pi hk} S \quad (54)$$

Entonces la caída de presión total es:

$$P_e - P_{wf} - \Delta P_s \quad (55)$$

Remplazando la ecuación 54 en la ecuación 53 obtendremos la ecuación general de fluido en el yacimiento para flujo radial considerando el daño de formación.

$$P_e - P_{wf} = \frac{q\mu}{2\pi hk} \left[\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) + S \right] \quad (56)$$

Para obtener la ecuación de flujo estacionario en términos de la presión promedio del área de drenaje P_{prom} , se derivará la ecuación de difusividad o ecuación diferencial parcial para flujo de fluidos en medios porosos.

Un sin número de soluciones de la ecuación de difusividad pueden ser obtenida dependiendo de las condiciones iniciales y de borde impuestas. Estas ecuaciones son de segundo grado, para linealizar varios investigadores han trabajado en ella aplicando varios métodos matemáticos para su solución:

- ✓ Método de la línea fuente
- ✓ Transformada de Laplace.
- ✓ Diferencias finitas.
- ✓ Transformada de Boltzman.

La solución de esta ecuación sirve básicamente para el análisis de los métodos de estudios de presión de yacimientos de petróleo y gas.

$$\frac{\partial^2 P}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial r} = \frac{c\mu\phi}{k} \frac{\partial P}{\partial t} \quad (57)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial P}{\partial r} \right) = \frac{c\mu\phi}{k} \frac{\partial P}{\partial t} \quad (58)$$

La presión promedio de un yacimiento basado en los volúmenes de drenaje es:

$$P_{prom} = \frac{2}{r_e^2} \int_{r_w}^{r_e} P r dr \quad (59)$$

La solución de la ecuación se efectuará para flujos estacionario $\partial P/\partial t=0$ y semi-estacionario $\partial P/\partial t=cte$.

a. Para flujo estacionario.

- $P=P_e=cte$ y $r=r_e$

- $\partial P/\partial t=0$ para todo (r y t)

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial P}{\partial r} \right) = 0 \quad (60)$$

Al integrar la ecuación de difusividad para estado estacionario y aplicar la ecuación de Darcy incluyendo el daño de formación en el borde del pozo tenemos la ecuación linealizada a presión promedio del yacimiento:

$$r \frac{\partial P}{\partial r} = C1$$

$$P_{prom} - P_{wf} = \frac{q\mu}{2\pi hk} \left[\left(\text{Ln} \left(\frac{r_e}{r_w} \right) - \frac{1}{2} \right) + S \right]$$

$$q = \frac{2\pi hk}{\mu \left[\left(\text{Ln} \left(\frac{r_e}{r_w} \right) - \frac{1}{2} \right) + S \right]} (P_{prom} - P_{wf}) \quad (61)$$

$$q = IP(P_{prom} - P_{wf}) \quad (62)$$

$$q = IP(\Delta P) \quad (64)$$

b. Para flujo semi-estacionario.

- $\partial P/\partial r=0$ a $r=r_e$
- $\partial P/\partial t=cte.$ para todo (r y t)

De la misma forma la deducción de la ecuación de difusividad para estado semi-estacionario a presión estática y presión promedio se obtiene.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial P}{\partial r} \right) = \frac{c\mu\phi}{k} \frac{\partial P}{\partial t} \quad (65)$$

$$q = \frac{2\pi hk}{\mu \left[\left(\text{Ln} \left(\frac{r_e}{r_w} \right) - \frac{1}{2} \right) + S \right]} (P_e - P_{wf}) \quad (66)$$

$$q = \frac{2\Pi hk}{\mu \left[\left(\text{Ln} \left(\frac{r_e}{r_w} \right) - \frac{3}{4} \right) + S \right]} (P_{prom} - P_{wf}) \quad (67)$$

$$q = IP(P_{prom} - P_{wf}) \quad (68)$$

En las ecuaciones desarrolladas tenemos el **índice de productividad del pozo (IP)** el cual refleja el potencial que tiene un pozo para producir, está en función del espesor del yacimiento, permeabilidad, viscosidad, el daño que tiene la formación, el radio del pozo y el radio de drenaje del pozo. Para un pozo inyector el índice de productividad de un pozo IP pasa ser el **Índice de Inyección del pozo (II)**.

$$IP = \frac{2\Pi hk}{\mu B_w \left[\text{Ln} \left(\frac{r_e}{r_w} \right) + S \right]} \left(\frac{BPD}{PSI} \right) = II \quad (69)$$

- ✓ La relación **(k/μ)** representa la movilidad que tiene el fluido a fluir en el medio poroso.
- ✓ Bw= factor volumétrico del agua
- ✓ **S** representa el daño de formación que ocurre el momento de la perforación, completación e reinyección de agua de formación no tratada, los valores son:
 - S=0 Pozo sin daño de formación.
 - S>0 Pozo con daño de formación.
 - S<0 Pozo estimulado o removido el daño de formación.
 - Para un pozo inyector la presión fluyente del pozo es:

$$P_{wf} = P_i + P_h - \Delta P_f \quad (70)$$

Donde:

- Pwf = Presión fluyente en el fondo del pozo (psi).
- Pi = Presión de inyección en superficie (psi).
- Ph = Presión hidrostática (psi) = (gpD).
- D = Profundidad vertical a mitad de las perforaciones (pies).

- ΔP_f = Pérdida de presión en la completación de fondo (tubería, accesorios) (psi).
- P_e = presión de yacimiento (psi).

$$q = \Pi(P_i + P_h - \Delta P_f - P_e) \quad (71)$$

CAPITULO V

5. SOLUCIÓN DE LA RED POR EL METODO DE LINEALIZACIÓN DE ECUACIONES

| | | Tuberías | | | | | | |
|-------|-----|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | [1] | [2] | [3] | [4] | [5] | [6] | [7] |
| Nodos | (1) | -1 | 0 | -1 | -1 | 0 | 0 | 0 |
| | (2) | 1 | -1 | 0 | 0 | 0 | -1 | 0 |
| | (3) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| | (4) | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | -1 |
| | (5) | 0 | 0 | 0 | 1 | -1 | 0 | 0 |

En este capítulo aplicaremos el método de linealización de las ecuaciones para resolver el sistema de ecuaciones no lineales aplicada a una red de tuberías, se basa en la linealización de las ecuaciones de energía en cada tubería de la red, se aplica la ecuación de continuidad y energía en cada nodo de la red obteniendo un sistema de ecuaciones lineales la cual se puede resolver por cualquier método matricial.

5.1 TOPOLOGÍA DE LA RED.

Se describe a continuación la topología de la red hidráulica del sistema de inyección

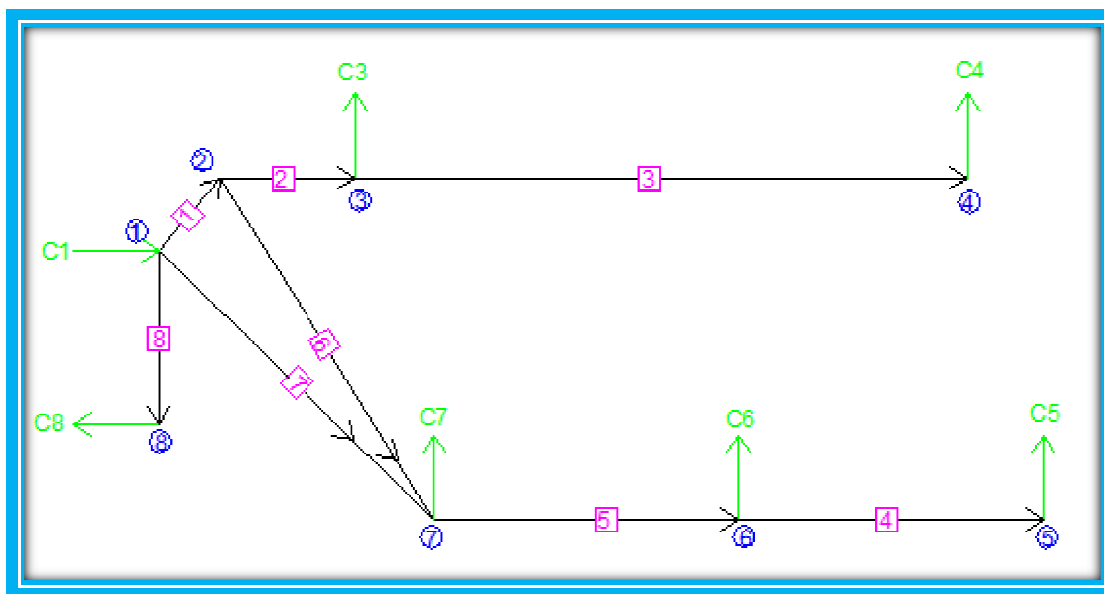


Figura 17. Topología de la red

Para resolver esta red del problema se adjunta en la tabla los datos de la tubería y los nodos que intervendrán en la modelación.

| ELEMENTOS | | NUDOS | | TUBERÍA | | |
|-----------|------|-------|---|---------|---------|--------|
| RAMAS | TIPO | i | j | L(m) | D(inch) | D(m) |
| 1 | T | 1 | 2 | 60 | 8 | 0.2032 |
| 2 | T | 2 | 3 | 682 | 8 | 0.2032 |
| 3 | T | 3 | 4 | 2338 | 8 | 0.2032 |
| 4 | T | 6 | 5 | 2140 | 12 | 0.3048 |
| 5 | T | 7 | 6 | 3232 | 12 | 0.3048 |
| 6 | T | 2 | 7 | 1974 | 8 | 0.2032 |
| 7 | T | 1 | 7 | 1974 | 12 | 0.3048 |
| 8 | T | 1 | 8 | 100 | 8 | 0.2032 |

Tabla 2. Topología de la red, ramas.

| ELEMENTOS | | Nudos | Incognita | Datos | |
|-----------|------|---------|-----------|-------|------|
| NUDO | TIPO | Vecinos | asociada | | (m) |
| 1 | B | 2,7,8 | C1 | H1 | 1413 |
| 2 | L | 3,1,7 | H2 | 0 | 0 |
| 3 | L | 2,4 | C3 | H3 | 1301 |
| 4 | L | 3 | C4 | H4 | 1230 |
| 5 | L | 6 | C5 | H5 | 1118 |
| 6 | L | 7,5 | C6 | H6 | 1132 |
| 7 | L | 2,6,1 | C7 | H7 | 1308 |
| 8 | L | 1 | C8 | H8 | 1371 |
| B=BASE | | | | | |
| L=LIBRE | | | | | |

Tabla 3. Topología de la red, nodos.

5.2 APLICACIÓN A REDES HIDRÁULICAS.

Aplicando la ecuación de continuidad (ec-72) en cada nodo a la red de tuberías del ejemplo tendremos un sistema de ecuaciones la cual ponemos resolverla por cualquier método matricial.

$$F_j = \sum_{i=1}^{NV} c_{LTij} (H_i - H_j) + C_j = 0 \quad j = 1, NN \quad (72)$$

$$c_{LTij} = \frac{4}{3c_{ij} Q_0}$$

Ecuación de continuidad en cada nodo.

$$\text{Nodo 1: } Q_{12} + Q_{17} + Q_{18} + C_1 = 0$$

$$\text{Nodo 2: } Q_{21} + Q_{23} + Q_{27} = 0;$$

$$\text{Nodo 3: } Q_{32} + Q_{34} + C_3 = 0$$

$$\text{Nodo 4: } Q_{43} + C_4 = 0$$

$$\text{Nodo 5: } Q_{56} + C_5 = 0$$

$$\text{Nodo 6: } Q_{65} + Q_{67} + C_6 = 0$$

$$\text{Nodo 7: } Q_{71} + Q_{72} + Q_{76} + C_7 = 0$$

$$\text{Nodo 8: } Q_{81} + C_8 = 0$$

Se aplica la ecuación de la energía a cada ecuación en el nodo.

$$c_{LT12}(H_2 - H_1) + c_{LT17}(H_7 - H_1) + c_{LT18}(H_8 - H_1) + C_1 = 0;$$

$$c_{LT21}(H_1 - H_2) + c_{LT23}(H_3 - H_2) + c_{LT27}(H_7 - H_2) = 0;$$

$$c_{LT32}(H_2 - H_3) + c_{LT34}(H_4 - H_3) + C_3 = 0$$

$$c_{LT43}(H_3 - H_4) + C_4 = 0$$

$$c_{LT56}(H_6 - H_5) + C_5 = 0$$

$$c_{LT65}(H_5 - H_6) + c_{LT67}(H_7 - H_6) + C_6 = 0$$

$$c_{LT71}(H_1 - H_7) + c_{LT72}(H_2 - H_7) + c_{LT76}(H_6 - H_7) + C_7 = 0$$

$$c_{LT18}(H_1 - H_8) + C_8 = 0$$

Sistema de ecuaciones de la red del problema.

$$c_{LT12}H_2 + C_1 = c_{LT17}(H_1 - H_7) + c_{LT18}(H_1 - H_8) + c_{LT12}H_1;$$

$$(c_{LT21} + c_{LT23} + c_{LT27})H_2 = c_{LT21}H_1 + c_{LT23}H_3 + c_{LT27}H_7;$$

$$c_{LT32}H_2 + C_3 = c_{LT34}(H_3 - H_4) + c_{LT32}H_3$$

$$C_4 = c_{LT43}(H_4 - H_3)$$

$$C_5 = c_{LT56}(H_5 - H_6)$$

$$C_6 = c_{LT65}(H_6 - H_5) + c_{LT67}(H_6 - H_7)$$

$$c_{LT72}H_2 + C_7 = c_{LT71}(H_7 - H_1) + c_{LT76}(H_7 - H_6) + c_{LT72}H_7$$

$$C_8 = c_{LT18}(H_8 - H_1)$$

Solución del sistema de ecuaciones.

Nodo 1 Base: $H_1 = 1418 \text{ m}$

2. $0.0115H_2 = 15.677$
3. $0.0017H_2 + C_3 = 2.276$
4. $C_4 = -0.0354$
5. $C_5 = -0.1071$
6. $C_6 = -0.0385$
7. $0.0008H_2 + C_7 = 0.9554$
8. $C_8 = -0.1324$

Para resolver la red se requiere NU-1 ecuaciones lineales, se debe suponer un caudal inicial en cada tubo y una altura conocida en el nudo base. Expresando en forma matricial el sistema de ecuaciones tenemos:

| Nodos | H_2 | <i>Tramos</i> | | | | | | | | |
|-------|--------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|--|
| | | C_3 | C_4 | C_5 | C_6 | C_7 | C_8 | | | |
| 2 | 0.0115 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | H_2 | 15.677 | |
| 3 | 0.0017 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | C_3 | 2.276 | |
| 4 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | C_4 | -0.0354 | |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | C_5 | -0.1071 | |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | C_6 | -0.0385 | |
| 7 | 0.0008 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | C_7 | 0.9554 | |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | C_8 | -0.1324 | |

$$AA * KK = HM$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones tenemos los valores de la altura y consumo en los nodos como se indica en la tabla 4.

| Nudo | Altura (m) | Consumo(m3/s) | Altura psi | Consumo(bpd) |
|------|------------|---------------|------------|--------------|
| 1 | 1387 | 0.5364 | 1970 | 291501 |
| 2 | 1369 | 0 | 1944 | 0 |
| 3 | 1289 | -0.1034 | 1830 | -56192 |
| 4 | 1282 | -0.0354 | 1820 | -19238 |
| 5 | 1130 | -0.1071 | 1605 | -58202 |
| 6 | 1160 | -0.0385 | 1647 | -20922 |
| 7 | 1251 | -0.1197 | 1776 | -65050 |
| 8 | 1380 | -0.1324 | 1960 | -71951 |

Tabla 4. Resultados del sistema de ecuaciones de la red de tuberías.

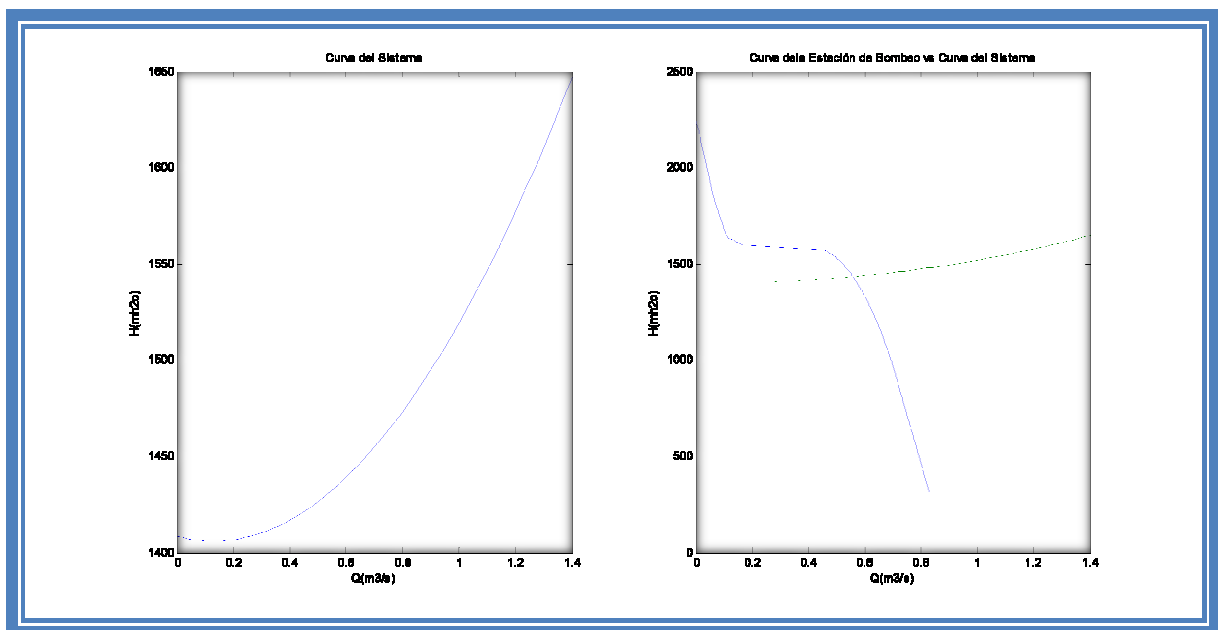


Figura 18. Curva del sistema de red y curva del punto de operación.

La curva del lado izquierdo de la figura 18 representa la curva del sistema de la red de tuberías y su ecuación matemática es la siguiente:

5.3 PUNTO DE OPERACIÓN DEL SISTEMA.

Después de haber desarrollado la curva del sistema de bombas y la curva del sistema de red en los capítulos anteriores, tenemos la herramienta necesaria para obtener el punto óptimo de operación de los dos sistemas, esto se logra graficando las dos ecuaciones en un mismo plano $H=f(Q)$ o igualando las ecuaciones para obtener el caudal y altura del sistema.

La curva del lado derecho de la figura 18 representa gráficamente el punto óptimo de operación. Matemáticamente el punto óptimo de operación se obtiene igualando las dos ecuaciones del sistema red-bomba siguiente:

$$H_{\text{sistema tubería}} = 141.26 Q^2 - 30.714 Q + 1376.7$$

$$H_{\text{sistema total}} = 1424.6 Q^5 + 2187.4 Q^5 + 12281 Q^4 - 41147 Q^3 + 31145 Q^2 - 8474.2 Q + 2180.2$$

El resultado después de correr el programa en las condiciones operativas del sistema de inyección es:

| Punto Operación | | | |
|-----------------|---------------------------|-------------|-------------|
| Altura(m) | Caudal(m ³ /s) | Altura(psi) | Caudal(bpd) |
| 1402.62 | 0.529 | 1992 | 287480 |

5.3.1 SISTEMA CON “N” BOMBAS EN PARALELO⁸

- Una de las ventajas que tenemos al seleccionar bombas en paralelo es tener mayor flexibilidad del sistema, tanto en la operación como en la instalación.
- Las desventajas son: tener más unidades a ser mantenidas, motores sobre dimensionados en relación al punto de operación; causando problemas con el factor de potencia, mayor espacio de la instalación, aumento en los costos de construcción.

De la figura 19, podemos observar 8 bombas en paralelo intersecando con la curva del sistema de redes, iniciando con la bomba 5^{ta} porque las primeras 4 bombas tiene un aporte constante de caudal al sistema, esto se debe a que las perdidas por fricción en la tubería son mínimas. Las 8 bombas restantes del sistema va reduciendo el caudal de aporte cada que se adicione una bomba, igualmente se debe al incremento de las pérdidas en la tubería. En el sistema se puede ingresar un gran número de bombas considerando que operativamente sea factible, siempre tomando en consideración que las bombas se encuentran operando en el rango recomendado por el fabricante y cualquier variación que exista en el sistema la bomba no opere en corte de flujo.

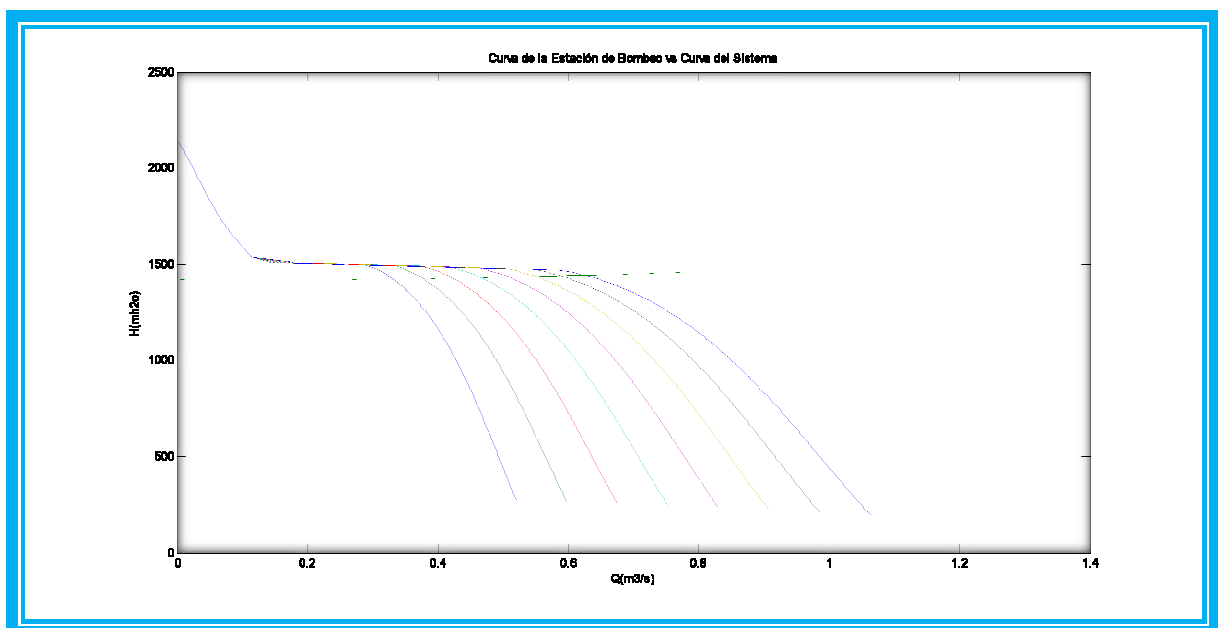
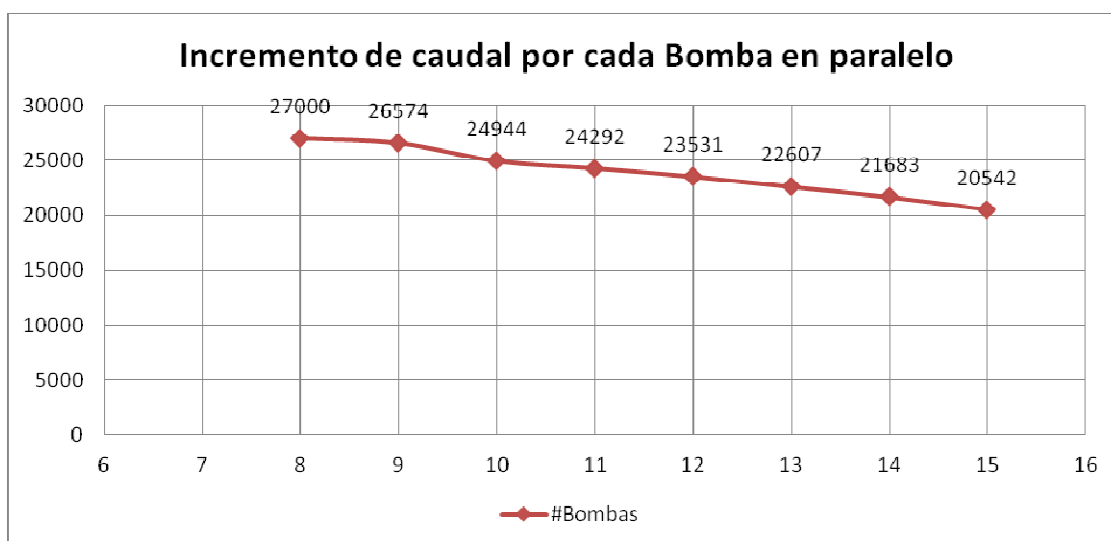


Figura 19. Curva del sistema de tuberías y bombas en paralelo a 3600 rpm.

En La figura 19, tenemos la intersección de las bombas en paralelo con el sistema de la red confirmando lo antes dicho, que cada que ingresa una bomba al sistema el aporte de caudal es menor y en el cuadro siguiente también podemos apreciar la tendencia negativa del sistema al incremento de bombas en paralelo.



Las precauciones que debemos tener al instalar bombas en paralelo son:

- ✓ Cuando salga de operación una de las unidades que está operando en el sistema, la bomba que permanece trabajando operará a la derecha de su punto de diseño, es decir, con un caudal mayor.
- ✓ Cuando el número de bombas es excesivo operando en paralelo, cada una de ellas operará a la izquierda de su punto de diseño, como se observa en la figura-19 con un caudal reducido.
- ✓ Entre más bombas operen en el sistema, mayor es el riesgo de que una pequeña fluctuación en el sistema apague una bomba o quede operando en corte de flujo.

Cuando una bomba centrífuga no opera en su mejor punto de eficiencia, es decir, acercándose a los caudales mínimos o caudales excesivos se tiene varios problemas que se detallará de la siguiente manera:

Caudal excesivo:

- ✓ El NPSH disponible es insuficiente, es decir, el NPSH requerido pasa a ser mayor que el NPSH disponible, en esas condiciones, la bomba podrá entrar en un régimen de cavitación.
- ✓ La eficiencia de la bomba baja.
- ✓ Esfuerzos radiales sobre el eje de la bomba.
- ✓ Hay un aumento de la potencia consumida, la que en muchos casos puede superar la potencia nominal del motor eléctrico utilizado.

El caudal excesivo puede ser controlado con una válvula de control a la descarga del sistema de bombas en paralelo, al cerrarse la válvula se producen pérdidas locales que obligan a cada bomba a operar con un caudal tal que no sobrecarguen su motor, evitando así la cavitación.

Caudal mínimo:

- ✓ Excesiva recirculación de flujo.
- ✓ Baja eficiencia de la bomba.
- ✓ Esfuerzos radiales excesivos.
- ✓ Calentamiento del líquido bombeado.

El calentamiento mencionado no es excesivo, pero en una operación continua en esas condiciones dañará el sistema de sellos mecánicos y disminuirá la vida útil de los rodamientos.

Las bombas de tamaño medio y grande, que tienen rodets de gran diámetro y que operan con caudales reducidos, pueden estar sujetas al problema de recirculación hidráulica (ruidos excesivos, vibraciones semejantes a la cavitación).

5.5 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UN POZO.

En el diseño de un sistema de inyección de agua o gas al yacimiento para utilizarlo como recuperación secundaria, debemos considerar los parámetros de la roca que conforma el yacimiento productor uno de esto es el Índice de Inyectividad (II) que es

el potencial del pozo y la presión de fractura la cual no debe de ser excedida en la cara de la arena P_{wf} .

Con estas premisas obtendremos la Presión de Inyección óptima para un diseño y evitar:

- Sobre o sub dimensionamiento de los equipos y líneas en superficie la cual está ligada con la eficiencia del sistema y el costo del proyecto.
- No sobrepasar la presión de fractura para que el sistema de recuperación secundaria sea eficiente.

La presión de fractura. Es la presión necesaria que se aplica a una estructura rocosa para que falle o se rompa.

Para obtener la presión de diseño del sistema de bombeo primeramente debemos saber cuál es la presión y el caudal máximo que acepta el yacimiento antes de que se fracture, escogeremos un pozos para efectuar los cálculos.

$$P_{fract} = Grad_{fract} * TVD \quad (73)$$

$$P_{fract} = 0.8 * 7717 = 6174 \text{ psi}$$

Vale recalcar que en estos cálculos utilizaremos las unidades de la industria petrolera.

Donde:

P_{fract} = Presión de fractura

$Grad_{fract}$ = Gradiente de fractura

TVD = profundidad vertical total

Seguidamente calcularemos el caudal máximo a la presión de fractura.

$$II = \frac{K * h}{141.2 * \mu_w * \beta_w * \left(\log \left(\frac{r_e}{r_w} \right) + S - 0.5 \right)}$$

$$II = \frac{1500 * 85}{141.2 * 10 * 1 * \left(\log \left(\frac{500}{8.4} \right) + 4 - 0.5 \right)} = 9 \text{ bpd/psi}$$

$$Q_{max} = II * (P_{fract} - P_{ym}) \quad (74)$$

$$Q_{max} = 9 * (6174 - 2200) = 35776 \text{ bpd}$$

Con el caudal máximo calculamos las pérdidas por fricción en la tubería de la completación del pozo.

$$Kt = 0.0000115 * \frac{G_{sw} * TMD * f}{Dia_{Tub}^2} \quad (76)$$

$$Kt = 0.0000115 * \frac{1.03 * 7717 * 0.015}{4.5^2} = 7.4304e - 007 \text{ psi/bpd}^2$$

$$\Delta Pt_{max} = Kt * (Q_{max})^2 \quad (75)$$

$$\Delta Pt_{max} = 7.4304e - 007 * (35776)^2 = 943 \text{ psi}$$

Seguidamente calcularemos la presión hidrostática a la profundidad del yacimiento.

$$Ph = 0.433 * G_{sw} * TVD \quad (77)$$

$$Ph = 0.433 * 1.03 * 7717 = 3442 \text{ psi}$$

Para inyectar todo el fluido calculado se debe tener presiones altas de inyección en la cabeza de pozo antes de que se fracture la roca del yacimiento, a continuación calcularemos la presión de inyección a las máximas condiciones.

$$P_{inymax} = P_{fract} - Ph + \Delta Pt_{max} \quad (78)$$

$$P_{inymax} = 6174 - 3442 + 943 = 3675 \text{ psi}$$

Como se puede observar para inyectar 35627 bfpd en este pozo se requiere una presión de inyección máxima de 3675 psi., para manejar estas presiones se

requieren equipos de bombeos y sistema de tuberías de alta presión el cual es muy costoso.

| DATOS DE ENTRADA | | | | | | | | |
|------------------|------|------|-----|------|------|------|----|--------|
| well | Piny | Pym | re | K | S | TVD | rw | DiaTub |
| 1 | 1915 | 2250 | 500 | 1400 | 4 | 7717 | 8 | 5 |
| 2 | 1915 | 2200 | 500 | 1500 | 4 | 7717 | 8 | 5 |
| 3 | 1915 | 2210 | 500 | 1300 | 4 | 7717 | 8 | 5 |
| 4 | 1720 | 2200 | 500 | 1100 | 0.1 | 7223 | 8 | 5 |
| 5 | 1720 | 2300 | 500 | 1028 | 0.6 | 8000 | 8 | 5 |
| 6 | 1812 | 2250 | 500 | 1000 | -1.9 | 7022 | 8 | 5 |
| 7 | 1812 | 2230 | 500 | 1000 | 2.5 | 7717 | 8 | 5 |
| 8 | 1812 | 2200 | 500 | 1100 | -0.4 | 8086 | 8 | 5 |
| 9 | 1805 | 2200 | 500 | 1130 | 0.5 | 7888 | 8 | 5 |
| 10 | 1805 | 2200 | 500 | 1000 | 1.5 | 9146 | 8 | 5 |
| 11 | 1805 | 2200 | 500 | 930 | 2 | 7858 | 8 | 5 |
| 12 | 1805 | 2200 | 500 | 1300 | 0.2 | 7848 | 8 | 5 |
| 13 | 1560 | 2200 | 500 | 863 | 0.3 | 7949 | 8 | 5 |
| 14 | 1520 | 2200 | 500 | 1100 | 2.5 | 7897 | 8 | 5 |
| 15 | 1520 | 2200 | 500 | 1136 | 2.5 | 8000 | 8 | 5 |
| 16 | 1520 | 2200 | 500 | 1112 | 0.3 | 7906 | 8 | 5 |

Tabla 5. Datos de entrada para el análisis del yacimiento

Del análisis a los pozos inyectoros en estudio y con un gradiente de presión de 0.8-1.0 psi/pie se deduce que podemos trabajar con una mayor presión de inyección al sistema de bombas por ende podemos inyectar un mayor volumen de agua, esto refleja en los cálculos Piny_{max} de la tabla 6.

| RESULTADOS | | | | | | | | | | | |
|------------|--------|----|-------|--------|------|----------|-------|----------|------|----------|--------|
| well | Pfract | ll | Qmax | DPTmax | Ph | Pinyamax | Qiny | DPTubing | Pwf | DPcasing | Qinysc |
| 1 | 6174 | 7 | 28970 | 624 | 3442 | 3356 | 20784 | 304 | 5052 | 17.1 | 22813 |
| 2 | 6174 | 9 | 35627 | 943 | 3442 | 3675 | 21155 | 304 | 5052 | 25.8 | 28071 |
| 3 | 6174 | 6 | 24639 | 451 | 3442 | 3183 | 21081 | 304 | 5052 | 12.4 | 19484 |
| 4 | 5778 | 9 | 33879 | 798 | 3221 | 3355 | 18745 | 214 | 4728 | 20.4 | 25762 |
| 5 | 6400 | 9 | 38032 | 1114 | 3568 | 3946 | 20403 | 237 | 5051 | 25.7 | 27478 |
| 6 | 5618 | 10 | 34306 | 796 | 3132 | 3282 | 18128 | 249 | 4694 | 22.1 | 27216 |
| 7 | 6174 | 5 | 19551 | 284 | 3442 | 3016 | 20392 | 274 | 4980 | 7.3 | 14954 |
| 8 | 6469 | 8 | 35183 | 964 | 3606 | 3826 | 21738 | 287 | 5131 | 23.8 | 26328 |
| 9 | 6310 | 7 | 30035 | 685 | 3518 | 3478 | 20596 | 346 | 4977 | 17.3 | 22694 |
| 10 | 7317 | 6 | 28717 | 726 | 4079 | 3964 | 24348 | 401 | 5483 | 16.5 | 20584 |
| 11 | 6286 | 5 | 20008 | 303 | 3505 | 3085 | 20507 | 345 | 4965 | 7.7 | 15187 |
| 12 | 6278 | 9 | 35925 | 975 | 3500 | 3754 | 20477 | 344 | 4961 | 24.6 | 27135 |
| 13 | 6359 | 6 | 23939 | 439 | 3545 | 3253 | 19285 | 305 | 4800 | 9.4 | 16667 |
| 14 | 6318 | 5 | 22455 | 383 | 3522 | 3179 | 18953 | 286 | 4756 | 8 | 15455 |
| 15 | 6400 | 6 | 23654 | 431 | 3568 | 3263 | 19266 | 290 | 4798 | 8.9 | 16214 |
| 16 | 6325 | 7 | 30591 | 712 | 3526 | 3511 | 18981 | 287 | 4759 | 14.8 | 20997 |

Tabla 6. Resultados del análisis del yacimiento

Para bajar las pérdidas de presión por fricción deberíamos inyectar directamente al pozo sin la completación del pozo, siempre y cuando no se exceda el límite de la tubería de revestimiento del pozo, el cual se lograría inyectar mayor volumen de fluido como se puede ver en la tabla 6 en la columna Qinysc.

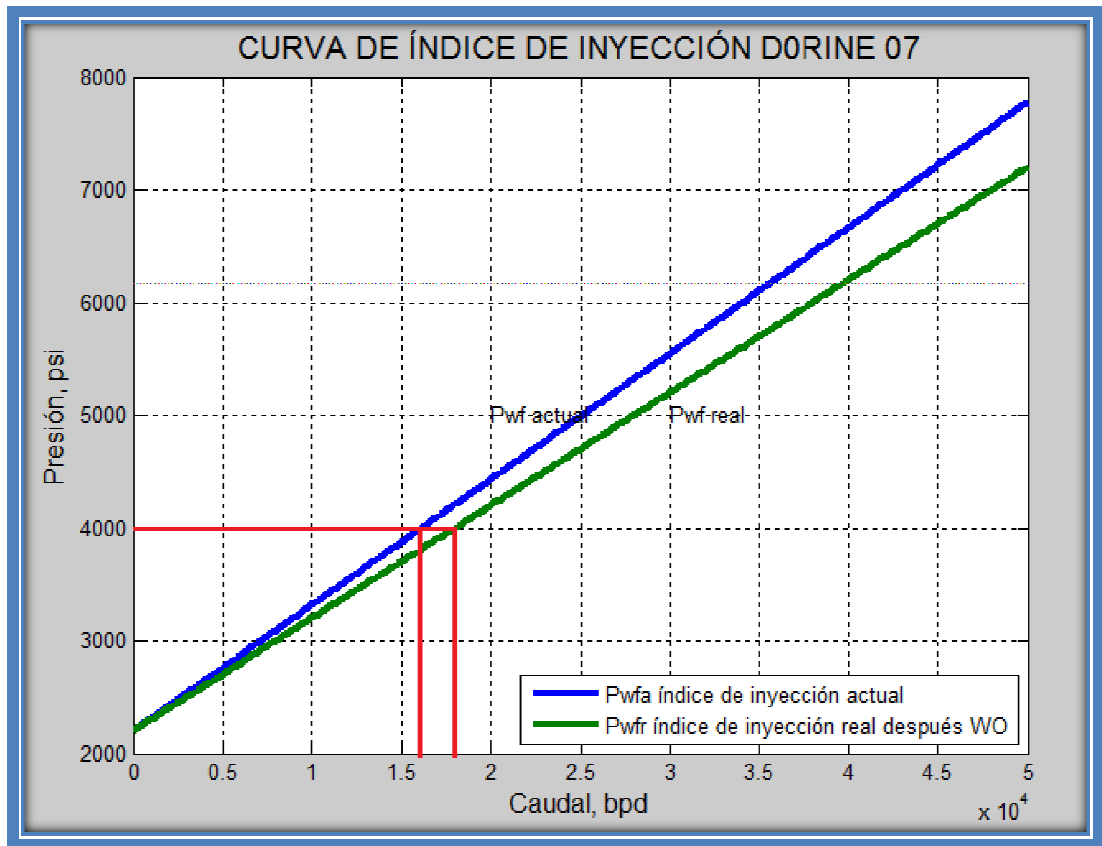


Figura 20. Curva del Potencial de un Pozo Inyector de agua.

En la grafica 20, es la curva del potencial de inyección de un pozo, se puede observar como varía el caudal de inyección en función del incremento de la presión de inyección. También se puede observar dos curvas, una del potencial de inyección actual y la otra del potencial de inyección después que se efectúa un trabajo de reparación del pozo, como resultado se obtiene que a la misma presión de inyección aumente el caudal de inyección.

CAPITULO VI

6. APLICACIÓN DEL MODELO EN EL SISTEMA DE INYECCIÓN DE AGUA DE FORMACIÓN

Después de haber integrado los datos registrados a nivel de campo y el programa desarrollado en MatLab a las condiciones de operación, efectuamos una corrida en el programa obteniendo el punto óptimo de operación del sistema de bombas y sistema de la red de tuberías (análisis de nodal) como resultado tenemos la altura y el flujo: **1403 m de cabeza y 0.529 m³/s.**

Obviamente se efectuó varias corridas del programa haciendo variar los parámetros operacionales que más podría afectar al sistema como: variación de las rpm, variación de las alturas en los manifold del pozo simulando un cierre y apertura de la válvula del cabezal del pozo, etc. Para esto hemos realizados varios escenarios el cual se describe a continuación.

6.1 ESCENARIO 1: VELOCIDAD DEL FLUIDO EN LA RED DE TUBERÍAS.

| Rama | NodoIzq. | NodoDer. | D(m) | L(m) | Q(m ³ /s) | H(m) | c | V(m/s) | Q(bpd) | H(psi) | V(ft/s) | D(in) |
|------|----------|----------|-------|------|----------------------|------|-------|--------|--------|--------|---------|-------|
| 1 | 1 | 2 | 0.203 | 60 | 0.174 | 1387 | 603 | 5.4 | 94298 | 1970 | 17.6 | 8 |
| 2 | 2 | 3 | 0.203 | 682 | 0.104 | 1369 | 7368 | 3.2 | 56573 | 1944 | 10.5 | 8 |
| 3 | 3 | 4 | 0.203 | 2338 | 0.027 | 1289 | 9949 | 0.8 | 14415 | 1830 | 2.7 | 8 |
| 4 | 6 | 5 | 0.305 | 2140 | 0.08 | 1282 | 4652 | 1.1 | 43641 | 1820 | 3.6 | 12 |
| 5 | 7 | 6 | 0.305 | 3232 | 0.109 | 1130 | 7639 | 1.5 | 59314 | 1605 | 4.9 | 12 |
| 6 | 2 | 7 | 0.203 | 1974 | 0.069 | 1160 | 24455 | 2.1 | 37725 | 1647 | 7 | 8 |
| 7 | 1 | 7 | 0.305 | 1974 | 0.129 | 1251 | 8114 | 1.8 | 70357 | 1776 | 5.8 | 12 |
| 8 | 1 | 8 | 0.203 | 100 | 0.099 | 1380 | 710 | 3.1 | 53963 | 1960 | 10 | 8 |

Tabla 7. Resultados de la red de tuberías en condiciones operativas

Del cuadro adjunto podemos analizar la velocidad del fluido en cada tubería de la red, en el tramo de tubería 1, tiene la velocidad del fluido alta (17.6 pies/s) que sobrepasan la velocidad del líquido en tuberías recomendadas de 3 a 15 pies/s para no causar abrasión en la tubería debido a las altas velocidades y depositaciones de sólidos debido a la baja velocidad como esto se puede observar en la tabla 7 de resultados de la red de tuberías. Los tramos 2 y 8 se encuentran con velocidades altas 10.5 y 10 pies/s respectivamente. En los tramos mencionados no se aconseja transportar más fluido de lo contrario llegaremos al límite de velocidad del fluido, si se incrementa pozos inyectores en los modos 2, 3 y 8 se debería considerar aumentar el diámetro de la tubería o instalar una nueva tubería en paralelo.

En el cuadro siguiente se ha efectuado un aumento del diámetro del tramo 1 de la red a 12 plg., se reduce la velocidad del fluido de 17.6 pies/s a 8.4 pies/s, por lo tanto las pérdidas por fricción en el tramo disminuyeron garantizando operar las bombas en un mejor punto de eficiencia.

| Rama | NodoIzq. | NodoDer. | D(m) | L(m) | Q(m ³ /s) | H(m) | c | V(m/s) | Q(bpd) | H(psi) | V(ft/s) | D(in) |
|------|----------|----------|-------|------|----------------------|------|-------|--------|--------|--------|---------|-------|
| 1 | 1 | 2 | 0.305 | 60 | 0.187 | 1387 | 104 | 2.6 | 101576 | 1970 | 8.4 | 12 |
| 2 | 2 | 3 | 0.203 | 682 | 0.113 | 1383 | 7353 | 3.5 | 61563 | 1964 | 11.5 | 8 |
| 3 | 3 | 4 | 0.203 | 2338 | 0.027 | 1289 | 9949 | 0.8 | 14415 | 1830 | 2.7 | 8 |
| 4 | 6 | 5 | 0.305 | 2140 | 0.08 | 1282 | 4652 | 1.1 | 43641 | 1820 | 3.6 | 12 |
| 5 | 7 | 6 | 0.305 | 3232 | 0.109 | 1130 | 7639 | 1.5 | 59314 | 1605 | 4.9 | 12 |
| 6 | 2 | 7 | 0.203 | 1974 | 0.074 | 1160 | 24416 | 2.3 | 40013 | 1647 | 7.4 | 8 |
| 7 | 1 | 7 | 0.305 | 1974 | 0.129 | 1251 | 8114 | 1.8 | 70357 | 1776 | 5.8 | 12 |
| 8 | 1 | 8 | 0.203 | 100 | 0.099 | 1380 | 710 | 3.1 | 53963 | 1960 | 10 | 8 |

Tabla 8. Resultados de la red de tuberías variando el diámetro de la tubería.

6.2 ESCENARIO 2: ADICIONANDO BOMBAS EN SERIE Y PARALELO.

| #Bombas | Altura (m) | Consumo(m3/s) | Altura(psi) | Caudal(bpd) | Inc cada bomba |
|---------|------------|---------------|-------------|-------------|----------------|
| 8 | 1382 | 0.3462 | 1962 | 188139 | 27000 |
| 9 | 1384 | 0.3951 | 1965 | 214713 | 26574 |
| 10 | 1390 | 0.441 | 1974 | 239657 | 24944 |
| 11 | 1397 | 0.4857 | 1984 | 263949 | 24292 |
| 12 | 1403 | 0.529 | 1992 | 287480 | 23531 |
| 13 | 1408 | 0.5706 | 1999 | 310087 | 22607 |
| 14 | 1414 | 0.6105 | 2008 | 331770 | 21683 |
| 15 | 1420 | 0.6483 | 2016 | 352312 | 20542 |

Bombas en rango mínimo

| HC27000 | min (bpd)= | 23500 | HC19000 | min (bpd)= | 12000 |
|---------|------------|-------|---------|------------|-------|
| | bep (bpd)= | 28000 | | bep (bpd)= | 19400 |
| | max (bpd)= | 33500 | | max (bpd)= | 24500 |

Tabla 9. Caudal óptimo de operación variando el número de bombas.

En el cuadro adjunto podemos apreciar que cada que ingresa una bomba al sistema el caudal optimo incrementa pero no es el caudal que se espera que aporte la bomba como se explico anterior mente se debe a que incrementa las perdidas en la red de tuberías debido a que existe mayor flujo por ellas.

- ✓ De la figura 19 cuando 8 bombas están en operación tenemos un caudal de aportación de 188139 bfpd con un promedio de aportación por bomba de 27000 bfpd.
- ✓ Cuando se añade las 4 bombas más al sistema es decir 12 bombas, en el sistema tenemos un caudal de 287400 bfpd y no un caudal de 305000 bpd que es lo esperado con los dos tipos de bombas a la presión de operación, con un promedio de aportación por bomba de 24835 bfpd.

- ✓ Al agregar 3 bombas adicionales al sistema, es decir 15 bombas tenemos un caudal de aportación de 352312 bfpd con un promedio de aportación por bomba de 23453 bfpd.
- ✓ Al incluir las tres bombas adicionales al sistema (bomba #13, #14 y #15) a las condiciones de operación del sistema 1992 psi, el aporte de las tres bombas es de 22607 bfpd, 21683 bfpd y 20542 bfpd respectivamente, con estos caudales de aporte estas bombas se encuentran operando cerca del rango mínimo de la bomba, como también la eficiencia de las bomba baja según se puede apreciar en la curva de la bomba de las figuras 21, 22, es obvio que la potencia de la bomba también baja lo cual también la refleja las curvas de potencia de las figuras 21, 22.
- ✓ Bajo estas perspectivas no se recomienda instalar las tres bombas adicionales al sistema actual, además un número excesivo de bombas en paralelo hace que cada una opere a la izquierda del punto de diseño

De la figura 19 obtenemos la siguiente conclusión:

- ✓ Un número excesivo de bombas en paralelo hace que cada una opere a la izquierda del punto de diseño
- ✓ Cuando operan las doce bombas a su mejor punto de eficiencia tenemos un caudal de 304000 bfpd, cada bomba entregará individualmente un caudal alrededor de 20000 bfpd (4 bombas) y 28000 bfpd (8 bombas) para los dos tipos de bombas.
- ✓ Cuando operan las doce bombas tenemos un caudal de 287460 bfpd, cada bomba entregará individualmente un caudal alrededor de 18500 bfpd y 26685 bpd para los dos tipos de bombas.
- ✓ Se nota también que el aporte de caudal a partir de la octava bomba es más pequeño, esto se debe a que las curvas del sistema y bombas son cuadráticas por tanto afectará a la selección del número máximo de bombas en un sistema.

La figura 21, 22, son simuladas con el programa Autograph PC de la empresa Baker Hughes, esta simulación fue realizada con presión de succión y descarga de 250 y 2000 psi respectivamente, a su mejor punto de eficiencia, dando como resultado que una bomba necesita 51 etapas para obtener 28000 bfpd y la otra bomba necesita 57 etapas para obtener 19664 bfpd a las condiciones de presión antes mencionadas.

En estas graficas podemos obtener las tres curvas de las bombas centrifugas que son comúnmente utilizadas $H=f(Q)$, $P=f(Q)$, $n=f(Q)$, de estas curvas podemos concluir que para bombas operando en serie, la eficiencia es igual, la potencia aumenta con cada bomba o etapas en serie y la altura aumenta en función del número de etapas,

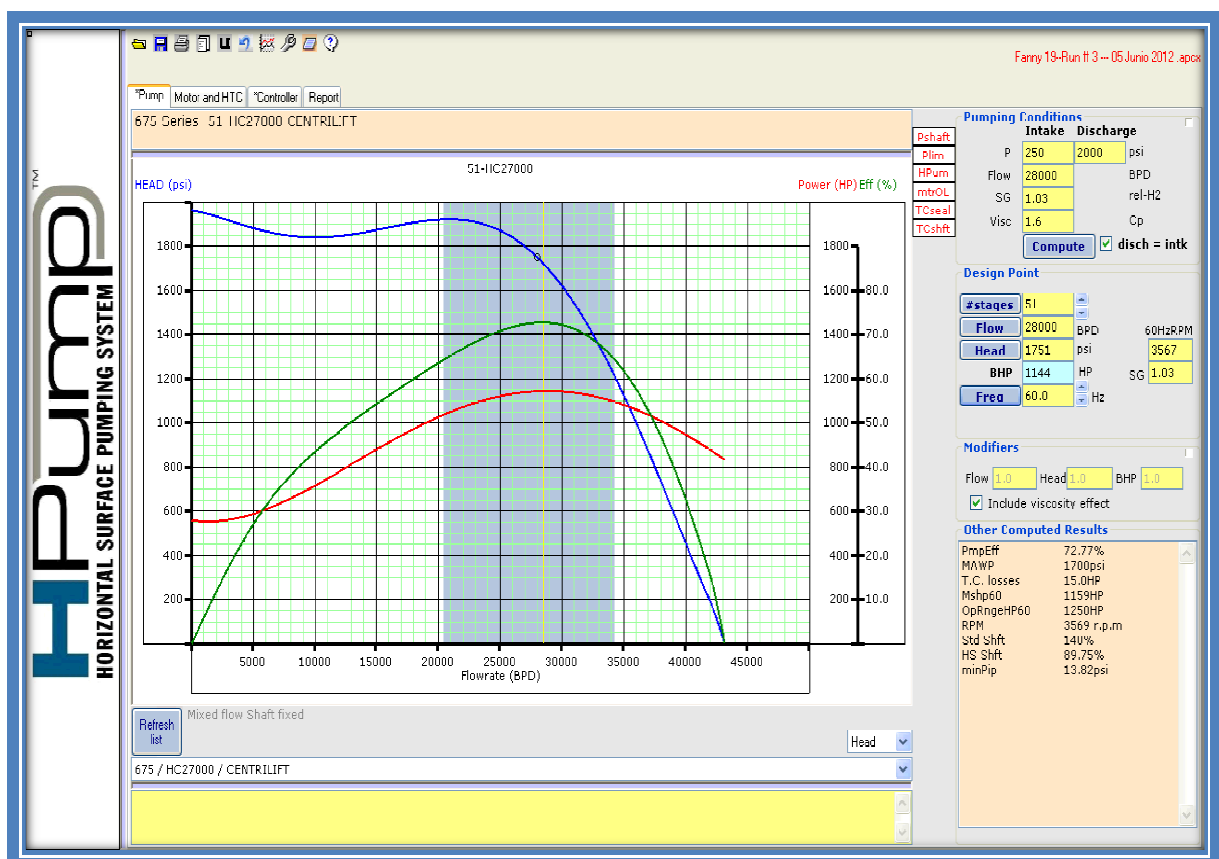


Figura 21. Curva de la bomba Centrilift HC-27000 con 51 etapas a 3600 rpm.

Para bombas operando en paralelo, la eficiencia total de la estación mejora, la potencia aumenta debido a que aumenta el número de bombas, y la altura permanece constan.

Cuando existe variación de frecuencia en una bomba, la eficiencia es la misma, la potencia aumenta al cubo de la frecuencia y la altura aumenta al cuadrado de su frecuencia.

Cuando usted se estrangula el sistema con una válvula, la curva del sistema se mueve hacia la izquierda disminuyendo el volumen de flujo, requerimientos de eficiencia, potencia y succión neta, disminuyen. Debido a que hay menos líquido para mover.

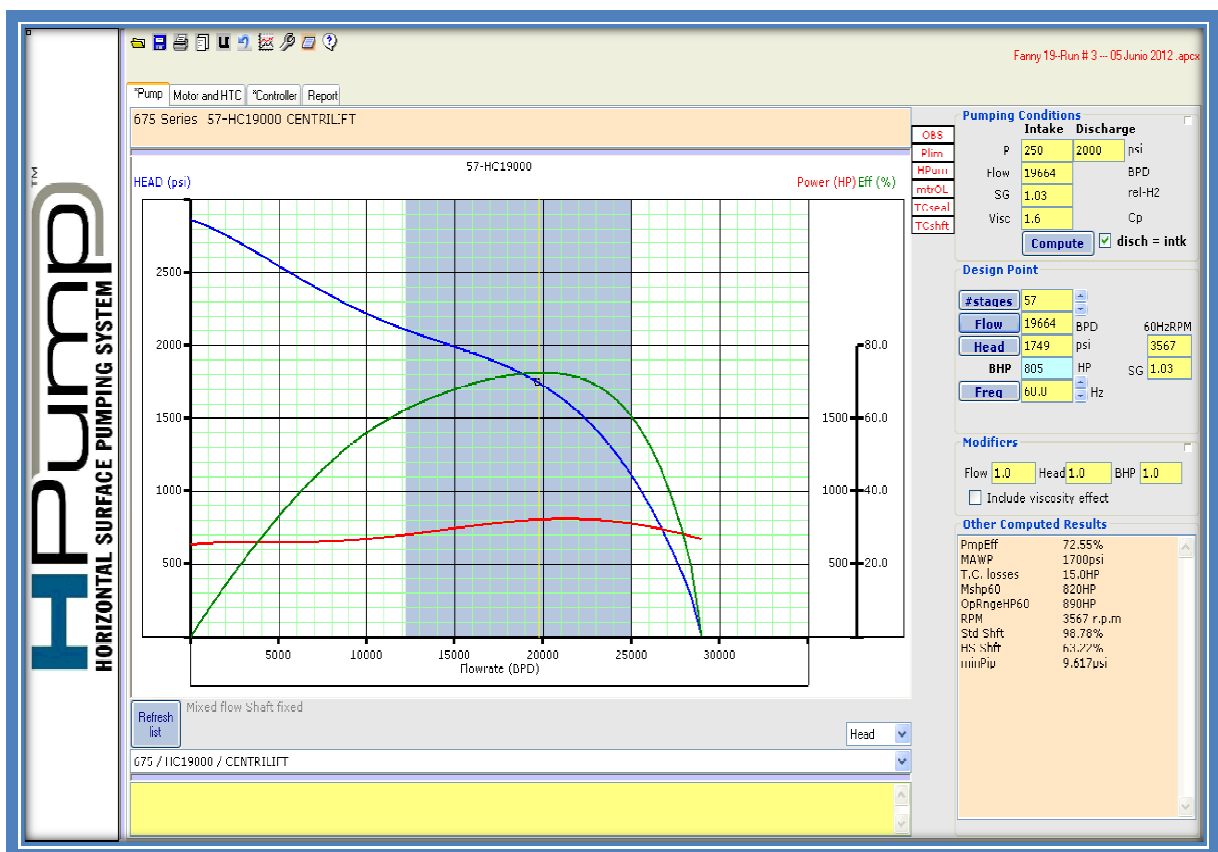


Figura 22. Curva de la bomba Centrilift HC-19000 con 57 etapas a 3600 rpm.

En la tabla 10, podemos apreciar los resultados de una corrida en el programa del comportamiento del sistema apagando una bomba de inyección de 28000 bwpd.

Los resultados indican que al apagar una bomba del sistema no se disminuyen los 28000 bwpd que aporta la bomba, si no que disminuye 13300 bwpd al reducir la presión del sistema de 1999 psi a 1939 psi. Al reducir el caudal que pasa por la red hace que las pérdidas en la tubería disminuyan, por lo tanto las otras bombas del sistema en paralelo operarán a más baja presión, por ende aportarán más fluido al sistema, es decir que funcionarán a la derecha del punto de operación.

También podemos observar que en las tuberías 1, 2 y 3 las velocidades del fluido han bajado cerca a los rangos recomendados.

| Nudo | Consumo(bpd) | H(psi) | Rama | Q(bpd) | V(ft/s) | Altura(psi) | Caudal(bpd) |
|------|-----------------------------|--------------------|--------------------|--------|---------|--|-------------|
| 1 | 310629 | 1979 | 1 | 91883 | 17.1 | Condiciones Normales de operación del sistema | 285675 |
| 2 | 0 | 1945 | 2 | 54488 | 10.1 | | |
| 3 | -41095 | 1850 | 3 | 23667 | 4.4 | | |
| 4 | -31556 | 1825 | 4 | 28900 | 2.4 | | |
| 5 | -38534 | 1630 | 5 | 55751 | 4.6 | | |
| 6 | -35801 | 1650 | 6 | 37395 | 7 | | |
| 7 | -72755 | 1781 | 7 | 72922 | 6 | | |
| 8 | -90888 | 1950 | 8 | 68166 | 12.7 | | |
| Nudo | Consumo(bpd) | H(psi) | Rama | Q(bpd) | V(ft/s) | Altura(psi) | Caudal(bpd) |
| 1 | 251697 | 1910 | 1 | 82161 | 15.3 | Apagando una Bomba en el Sistema, 28000 bwpd | 272347 |
| 2 | 0 | 1882 | 2 | 47338 | 8.8 | | |
| 3 | -35500 | 1811 | 3 | 20713 | 3.9 | | |
| 4 | -27617 | 1791 | 4 | 31896 | 2.6 | | |
| 5 | -42527 | 1600 | 5 | 52279 | 4.3 | | |
| 6 | -27178 | 1624 | 6 | 34823 | 6.5 | | |
| 7 | -66701 | 1740 | 7 | 67482 | 5.6 | | |
| 8 | -52173 | 1900 | 8 | 39130 | 7.3 | | |
| | | Altura(psi) | Caudal(bpd) | | | | |
| | Condiciones Normales | 1999 | 285675 | | | | |
| | Apagado 1 bomba | 1939 | 272347 | | | | |
| | | -60 | -13328 | | | | |

Tabla 10. Resultados de las corridas del programa apagando bomba.

6.3 ESCENARIO 3: VARIACIÓN DE LA ALTURA DE NIVEL DE TANQUES PARA SUMINISTRO DE FLUIDO.

| NPSHrequerido (m) | Perdidas(hfs) (m) | NPSHdmin (m) | Altura min (hsmin) | | Altura Nivel Tanque (Z1) | | Altura booster (Hsb) | |
|----------------------|-----------------------|-----------------|--------------------|-------|--------------------------|--------|----------------------|-------|
| | | | (m) | (psi) | (m) | (pies) | (m) | (psi) |
| 5.8 | 0.866 | 7.3 | 1.415 | 2.009 | 2 | 6.6 | 1.134 | 1.61 |
| 5.8 | 0.866 | 7.3 | 1.415 | 2.009 | 3 | 9.8 | 2.134 | 3.03 |
| 5.8 | 0.866 | 7.3 | 1.415 | 2.009 | 4 | 13.1 | 3.134 | 4.45 |
| 5.8 | 0.866 | 7.3 | 1.415 | 2.009 | 5 | 16.4 | 4.134 | 5.87 |
| 5.8 | 0.866 | 7.3 | 1.415 | 2.009 | 6 | 19.7 | 5.134 | 7.29 |

Tabla 11. Presión de succión de las bombas booster.

En la tabla adjunta podemos observar un análisis de la presión de succión de las bombas booster en función de los niveles de los tanques de almacenamiento.

- La presión mínima requerida para que no exista cavitación en las bombas booster es de 2 psi.
- Un nivel mínimo operativo del nivel de agua en el tanque de almacenamiento debe de ser 4 m para obtener una presión de succión en las bombas de 4.45 psi y evitar cavitación.
- Pero como experiencia, operativa para tener un mejor tratamiento del agua de inyección se necesita aumentar el tiempo de residencia por lo tanto se debe de trabajar de 19 a 20 pies de altura de nivel en el tanque el cual tendríamos una presión de succión en las bombas de 7.3 psi, con esto nos garantiza 2 hrs de residencia y aproximadamente 1 hr de disponibilidad de tiempo en caso de contingencia o evento en el sistema de inyección.

6.4 ESCENARIO 4: VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD DE LAS BOMBAS DE INYECCIÓN.

| rpm | Altura(m) | Caudal(m3/s) | Altura(psi) | Caudal(bpd) | Observaciones |
|------|-----------|--------------|-------------|-------------|---|
| 3700 | 1408 | 0.5747 | 1999 | 312315 | Operan las 12 bombas, operación ok. |
| 3600 | 1403 | 0.529 | 1992 | 287480 | Operan las 12 bombas, Operación óptima del sistema |
| 3550 | 1394 | 0.5056 | 1979 | 274763 | Operan las 12 bombas, mínima rpm de operación del sistema |
| 3500 | 1393 | 0.4735 | 1978 | 257319 | Operan las 12 bombas, limite corte de flujo bomba 11 y 12 |
| 3450 | 1380 | 0.4428 | 1960 | 240635 | Solo operan 9 bombas (4-HC19000 Y 5-HC27000) |
| 3400 | 1377 | 0.1467 | 1955 | 79723 | Solo operan 4 bombas (4-HC19000) |

Tabla 12. Punto optimo de operación variando las rpm.

En la tabla se adjunta los resultados de varias corridas del programa variando las rpm. Si hacemos un análisis del sistema variando las velocidades de las bombas desde 3400 a 3700 rpm, se concluye que todo el sistema de bombas debe de operar a 3600 rpm para tener un sistema estable.

En esta figura se puede observar que el comportamiento de las curvas del sistema de bombas y sistema de tuberías variando la velocidad de la bomba a 3700 rpm, se tiene una operación estable del sistema.

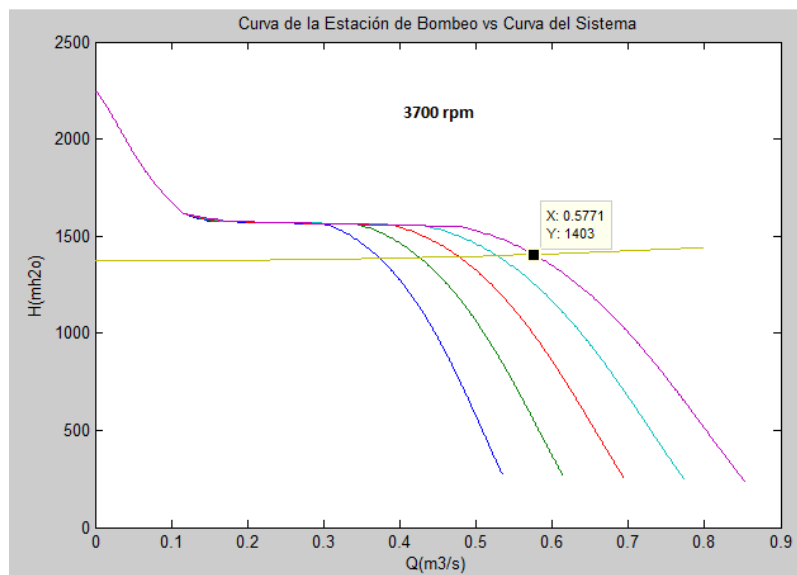


Figura 23. Curva del sistema de tuberías y bombas a 3700 rpm

En esta figura podemos observar que al operar el sistema bombas a 3500 rpm tenemos una operación de las bombas al límite de un corte de flujo, un pequeño aumento en la presión del sistema afectaría drásticamente a la bomba # 12.

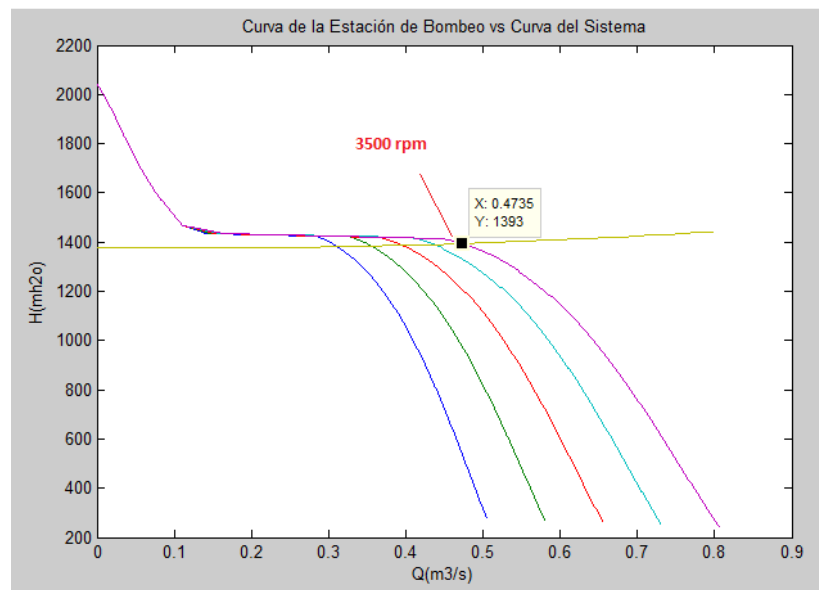


Figura 24. Curva del sistema de tuberías y bombas a 3500 rpm

En la figura podemos observar que no se puede operar a 3450 rpm el sistema de bombas porque las bombas prácticamente operan en corte de flujo.

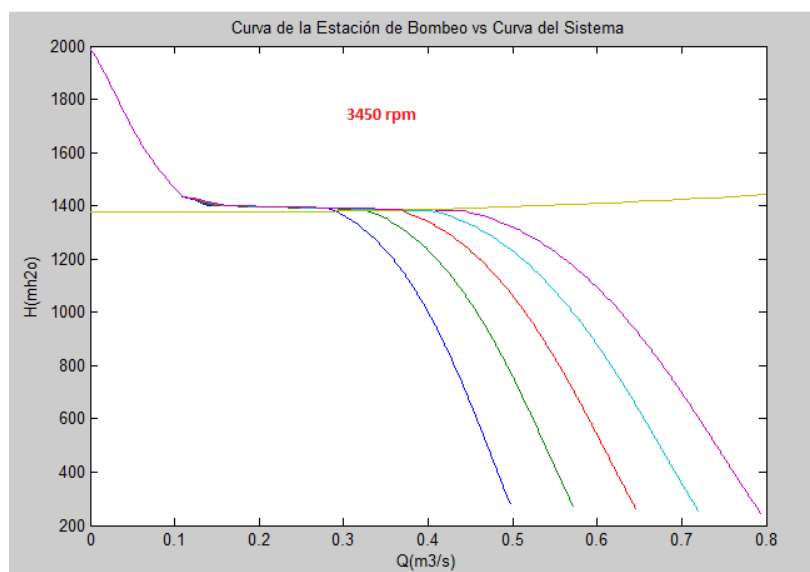


Figura 25. Curva del sistema de tuberías y bombas a 3450 rpm

Potencia del sistema de bombas en paralelo.

En la tabla 13 podemos observar las potencias de las bombas que operan en el sistema, estas potencias las detallaremos a continuación.

Primeramente calculamos la potencia total del sistema a partir de los datos de placa del motor eléctrico obteniendo 10448 Kw.

El cálculo de la potencia al mejor punto de eficiencia fue obtenido a partir de las presiones de succión, descarga y caudal de diseño, obteniendo una potencia total al mejor punto de eficiencia de 9506 Kw.

Para calcular la potencia a las condiciones de operación se midió los parámetros eléctricos de amperaje y voltaje de los motores, como también el factor de potencia de la línea de alimentación, obteniendo una potencia total de operación de 8795 Kw.

Se puede decir que 710 Kw de potencia se requiere para aumentar 19870 bwpd para operar el sistema de bombas en el mejor punto de eficiencia. Dicho de otra manera el sistema no está operando eficientemente.

Por otra parte se ha obtenido el caudal que está aportando cada bomba en función de los parámetros eléctricos y las condiciones de presión del sistema haciendo variar la eficiencia de las bombas en tres puntos, mínimo, máximo y bep del rango de operación de las bombas centrífugas, obteniéndose un caudal aproximado del sistema de 282786 bwpd con una eficiencia de las bombas de 72.7 %

| POTENCIA DE LAS BOMBAS DE INYECCIÓN | | | | | | | | | | | | | |
|---|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|
| #BOMBAS | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | TOTAL |
| CÁLCULO DE LA POTENCIA DE PLACA | | | | | | | | | | | | | |
| I | 151 | 151 | 151 | 151 | 151 | 151 | 151 | 151 | 123 | 123 | 123 | 123 | |
| V | 4160 | 4160 | 4160 | 4160 | 4160 | 4160 | 4160 | 4160 | 4160 | 4160 | 4160 | 4160 | |
| FP | 0.858 | 0.858 | 0.858 | 0.858 | 0.858 | 0.858 | 0.858 | 0.858 | 0.843 | 0.843 | 0.843 | 0.843 | |
| HP | 1250 | 1250 | 1250 | 1250 | 1250 | 1250 | 1250 | 1250 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | |
| KWplaca | 933 | 933 | 933 | 933 | 933 | 933 | 933 | 933 | 746 | 746 | 746 | 746 | 10,448 |
| CÁLCULO DE LA POTENCIA AL MEJOR PUNTO DE EFICIENCIA | | | | | | | | | | | | | |
| Pd(psi) | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | |
| Ps(psi) | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 | |
| Q(bpd) | 28000 | 28000 | 28000 | 28000 | 28000 | 28000 | 28000 | 28000 | 19664 | 19664 | 19664 | 19664 | 302,656 |
| n(%) | 72.77 | 72.77 | 72.77 | 72.77 | 72.77 | 72.77 | 72.77 | 72.77 | 72.77 | 72.55 | 72.55 | 72.55 | |
| γ | 1.03 | 1.03 | 1.03 | 1.03 | 1.03 | 1.03 | 1.03 | 1.03 | 1.03 | 1.03 | 1.03 | 1.03 | |
| Kwbep | 879 | 879 | 879 | 879 | 879 | 879 | 879 | 879 | 619 | 619 | 619 | 619 | 9,506 |
| CÁLCULO DE LA POTENCIA A CONDICIONES DE OPERACIÓN | | | | | | | | | | | | | |
| I | 138 | 136 | 137 | 136 | 132 | 131 | 134 | 136 | 97 | 80 | 86 | 87 | |
| V | 4160 | 4160 | 4160 | 4160 | 4160 | 4160 | 4160 | 4160 | 4160 | 4160 | 4160 | 4160 | |
| HP | 1142 | 1126 | 1134 | 1126 | 1093 | 1084 | 1109 | 1126 | 789 | 651 | 699 | 708 | |
| KWoper | 852 | 840 | 846 | 840 | 815 | 809 | 828 | 840 | 589 | 486 | 522 | 528 | 8,795 |
| CÁLCULO DEL CAUDAL DE OPERACIÓN A DIFERENTES EFICIENCIAS | | | | | | | | | | | | | |
| Pd(psi) | 1974 | 1994 | 1991 | 1973 | 1990 | 2005 | 2005 | 2010 | 1979 | 1979 | 1979 | 1979 | |
| Ps(psi) | 246 | 255 | 256 | 245 | 258 | 257 | 256 | 257 | 264 | 264 | 264 | 264 | |
| γ | 1.03 | 1.03 | 1.03 | 1.03 | 1.03 | 1.03 | 1.03 | 1.03 | 1.03 | 1.03 | 1.03 | 1.03 | |
| n(%) bep | 72.77 | 72.77 | 72.77 | 72.77 | 72.77 | 72.77 | 72.77 | 72.77 | 72.55 | 72.55 | 72.55 | 72.55 | |
| n(%) min | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 63 | 63 | 63 | 63 | |
| n(%) max | 64 | 64 | 64 | 64 | 64 | 64 | 64 | 64 | 60 | 60 | 60 | 60 | |
| Q(bpd) bep | 27508 | 26938 | 27198 | 27109 | 26251 | 25814 | 26390 | 26722 | 19083 | 15739 | 16919 | 17116 | 282,786 |
| Q(bpd) min n | 26461 | 25912 | 26163 | 26077 | 25252 | 24831 | 25385 | 25705 | 16571 | 13667 | 14692 | 14863 | 265,579 |
| Q(bpd) max n | 24193 | 23691 | 23920 | 23842 | 23087 | 22703 | 23209 | 23502 | 15782 | 13016 | 13992 | 14155 | 245,093 |

Tabla 13. Resultados de las potencia de las bombas

6.5 ESCENARIO 5: ESTRANGULAMIENTO DE LOS POZOS INYECTORES.

Cuando se tiene que hacer algún trabajo en un pozo que involucre cerrar, abrir o estrangular el pozo inyector existe variación en las presiones del sistema. Como se trata de una red, la presión en el nodo donde se estrangulará el pozo sufre un incremento de la presión, como también incrementa la presión en los otros nodos inclusive incrementa la presión de descarga del sistema de bomba. Esto se puede reflejar en el cuadro adjunto el cual es el resultado de una prueba de campo cerrando los pozos en los diferentes nodos.

| INYECTORES CERRADOS | Pd bomba (PSI) | PRESIÓN MANIFOLD (PSI) | | | | | |
|-----------------------------|----------------|------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | Nodo 3 | Nodo 4 | Nodo 5 | Nodo 6 | Nodo 7 | Nodo 8 |
| CONDICIONES NORMALES | 1980 | 1850 | 1840 | 1630 | 1660 | 1790 | 1950 |
| Pozo Nodo 4 Cerrado | 2017 | 1950 | 1940 | 1650 | 1680 | 1800 | 2000 |
| Pozo Nodo 3 Cerrado | 2039 | 1960 | 1950 | 1660 | 1700 | 1810 | 2000 |
| Pozo Nodo 8 Cerrado | 2040 | 1860 | 1850 | 1660 | 1700 | 1810 | 2010 |
| Pozo Nodo 7 Cerrado | 2013 | 1850 | 1840 | 1680 | 1710 | 1830 | 1990 |
| Pozo Nodo 6 Cerrado | 2000 | 1850 | 1840 | 1680 | 1720 | 1810 | 1980 |
| Pozo Nodo 5 Cerrado | 2005 | 1850 | 1840 | 1720 | 1740 | 1810 | 1990 |

Tabla 14. Variación de la presión en cabezal de los pozos.

En el cuadro siguiente se efectúa varias corridas en el programa cerrando los pozos en los diferentes nodos e introduciendo las presiones de las pruebas de campo efectuadas. Como resultado se obtiene las alturas y caudales óptimas del sistema, a condiciones normales de operación y a las condiciones de prueba el cual refleja una reducción del caudal mostrado en la columna “Qperdido” el restante del caudal para llegar al caudal real “Qreal” se deba a:

- Un parte del caudal es inyectado a los pozos adyacentes como producto del ligero incremento de las presiones en los nodos adyacentes, “en pozos inyectoros a mayor presión de inyección mayor caudal inyectado”.

- La otra parte es producto del menor flujo que imparte el sistema de bomba debido al incremento de presión en la descarga de las bombas.

| Condición | Altura(psi) | Caudal(bpd) | Qperdido(bpd) | Qreal(bpd) |
|-------------|-------------|-------------|---------------|------------|
| CN | 1999 | 285675 | | |
| OFF well N3 | 2052 | 271188 | -14487 | -30300 |
| OFF well N4 | 2045 | 273535 | -12140 | -19400 |
| OFF well N5 | 2022 | 279958 | -5717 | -23600 |
| OFF well N6 | 2022 | 279958 | -5717 | -16000 |
| OFF well N7 | 2037 | 275771 | -9904 | -22600 |
| OFF well N8 | 2052 | 271188 | -14487 | -28700 |

Tabla 15. Punto de operación cerrando los pozos inyectores.

En el cuadro numero 1 de la Tabla 14, tenemos una simulación a condiciones normales de operación del sistema el cual refleja velocidades altas del fluido en la tubería y el incremento o reducción de los consumos en los diferentes nodos producto del incremento de presión en los nodos.

Si cerramos un pozo en el nudo 4, podemos ver que en el tramo 1, 2, 8 la velocidad del fluido en las tuberías baja, por condiciones operativas se debe estrangular el fluido en este nodo para operar con menos pérdidas en las tuberías.

| Nudo | Consumo(bpd) | H(psi) | Rama | Q(bpd) | V(ft/s) | Altura(psi) | Caudal(bpd) |
|------|--------------|--------|------|--------|---------|--|-------------|
| 1 | 306962 | 1979 | 1 | 90990 | 16.9 | Condiciones Normales de operación del sistema | 285675 |
| 2 | 0 | 1946 | 2 | 54680 | 10.2 | | |
| 3 | (53837) | 1850 | 3 | 14303 | 2.7 | | |
| 4 | (19070) | 1840 | 4 | 35506 | 2.9 | | |
| 5 | (47342) | 1630 | 5 | 55751 | 4.6 | | |
| 6 | (26993) | 1660 | 6 | 36310 | 6.8 | | |
| 7 | (68832) | 1791 | 7 | 71065 | 5.9 | | |
| 8 | (90888) | 1950 | 8 | 68166 | 12.7 | | |

| Nudo | Consumo(bpd) | H(psi) | Rama | Q(bpd) | V(ft/s) | Altura(psi) | Caudal(bpd) |
|------|--------------|--------|------|--------|---------|-------------------------------------|-------------|
| 1 | 272199 | 2016 | 1 | 76758 | 14.3 | Cerrando un Pozo del Nodo Cuatro | 273535 |
| 2 | 0 | 1992 | 2 | 36330 | 6.8 | | |
| 3 | (29370) | 1950 | 3 | 14303 | 2.7 | | |
| 4 | (19070) | 1940 | 4 | 35506 | 2.9 | | |
| 5 | (47342) | 1650 | 5 | 53567 | 4.4 | | |
| 6 | (24082) | 1680 | 6 | 40428 | 7.5 | | |
| 7 | (83814) | 1801 | 7 | 76000 | 6.3 | | |
| 8 | (68522) | 1999 | 8 | 51391 | 9.6 | | |

Operativamente no se aconseja cerrar o estrangular los pozos en los nodos 5, 7 y 8 debido a que aumenta la velocidad del fluido en las tuberías 1,2 y 8.

| Nudo | Consumo(bpd) | H(psi) | Rama | Q(bpd) | V(ft/s) | Altura(psi) | Caudal(bpd) |
|------|--------------|--------|------|--------|---------|--|-------------|
| 1 | 290994 | 2005 | 1 | 96933 | 18 | 2022 | 279958 |
| 2 | 0 | 1967 | 2 | 60484 | 11.3 | Cerrando un Pozo del Nodo Cinco | |
| 3 | (61576) | 1850 | 3 | 14303 | 2.7 | | |
| 4 | (19070) | 1840 | 4 | 28900 | 2.4 | | |
| 5 | (38534) | 1720 | 5 | 40968 | 3.4 | | |
| 6 | (16090) | 1740 | 6 | 36448 | 6.8 | | |
| 7 | (90150) | 1811 | 7 | 72132 | 6 | | |
| 8 | (65574) | 1989 | 8 | 49181 | 9.2 | | |

| Nudo | Consumo(bpd) | H(psi) | Rama | Q(bpd) | V(ft/s) | Altura(psi) | Caudal(bpd) |
|------|--------------|--------|------|--------|---------|--|-------------|
| 1 | 305106 | 2014 | 1 | 97574 | 18.2 | 2037 | 275771 |
| 2 | 0 | 1975 | 2 | 62556 | 11.6 | Cerrando un Pozo del Nodo Siete | |
| 3 | (64337) | 1850 | 3 | 14303 | 2.7 | | |
| 4 | (19070) | 1840 | 4 | 35506 | 2.9 | | |
| 5 | (47342) | 1680 | 5 | 53567 | 4.4 | | |
| 6 | (24082) | 1710 | 6 | 35019 | 6.5 | | |
| 7 | (68578) | 1830 | 7 | 69982 | 5.8 | | |
| 8 | (81698) | 1989 | 8 | 61274 | 11.4 | | |

| Nudo | Consumo(bpd) | H(psi) | Rama | Q(bpd) | V(ft/s) | Altura(psi) | Caudal(bpd) |
|------|--------------|--------|------|--------|---------|---|-------------|
| 1 | 337687 | 2041 | 1 | 105006 | 19.5 | 2052 | 271188 |
| 2 | 0 | 1996 | 2 | 65283 | 12.2 | Cerrando un Pozo del Nodo Ocho | |
| 3 | (67975) | 1860 | 3 | 14303 | 2.7 | | |
| 4 | (19070) | 1850 | 4 | 41083 | 3.4 | | |
| 5 | (54777) | 1660 | 5 | 51292 | 4.2 | | |
| 6 | (13613) | 1700 | 6 | 39723 | 7.4 | | |
| 7 | (89207) | 1811 | 7 | 78474 | 6.5 | | |
| 8 | (93046) | 2009 | 8 | 69784 | 13 | | |

Tabla 16. Resultados de las corridas del programa cerrando los pozos.

El mismo efecto de estrangulamiento, abrir o cerrar válvulas ocurre cuando existe taponamiento de la formación o reparación la formación debido a trabajos de reacondicionamiento el cual mejora el índice de inyectividad del yacimiento.

Al variar los parámetros de yacimientos específicamente el índice de inyección (II) el cual es un factor de reservorio hace variar las presiones en el sistema. Cuando

aumenta el índice de inyección las presiones en cabeza de pozo serán menores debido a que tiene menor restricción en el yacimiento, caso contrario sucede cuando se reduce el índice de inyección. Para aumentar el índice de inyección se debe efectuar varios trabajos al pozo obviamente dependiendo del daño que se haya analizado, esto se refleja en la figura 20 el cual indica una ganancia en el volumen de inyección a la misma presión de inyección.

CAPITULO VII

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

- Las velocidades de los fluidos en la rama 1, 2 y 8 tienen velocidades del fluido alta que pueden causar abrasión, por lo tanto hay que aumentarle el diámetro si a futuro se tiene previsto aumentar el volumen de inyección en estos manifolds.
- La presión y caudal optimo del sistema de operación en las condiciones actuales es de: 1.403 m y 0.5290 m³/s respectivamente.
- No se debe instalar más bombas de inyección en el sistema debido a que el aportaran de fluido es tal que trabajaría bajo el límite mínimo.
- El diseño de las bombas del sistema de reinyección se las efectúa tomando en consideración la presión de inyección máxima en superficie que se le puede aplicar al yacimiento antes de que se fracture, esta presión máxima es 3000 psi.
- Para mejor tratamiento del agua de inyección se necesita aumentar el tiempo de residencia por lo tanto se debe de trabajar de 19 a 20 pies de altura de nivel en el tanque con esto tenemos una presión de succión en las bombas de 7.3 psi, garantizando 2 hrs de residencia y aproximadamente 1 hr de disponibilidad de tiempo en caso de contingencia o evento en el sistema de inyección.
- El sistema de bombas debe de operar a 3600 rpm para tener un sistema estable, al bajar las revoluciones las bombas operarán cercano al corte de flujo.

- Cuando operativamente exista maniobra de cerrar o abrir pozos inyectores se recomienda cerrar los pozos del nodo 4 para poder disminuir las velocidad del fluido en las líneas 1 y 2 y no cerrar los pozos de los nodos 5, 7 y 8, operativamente no conviene debido a que aumenta la velocidad del fluido en las líneas 1, 2 y 8.

7.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda cambiar el tramo de tubería 1, el diámetro se debe de incrementar a 12 plg para reducir la velocidad del fluido a 8.4 pies/s.
- No operar los niveles de los tanques menor de 4 metros de agua para que no caviten las bombas booster.
- Si se requiere ampliar la capacidad de inyección se debe instalar las nuevas bombas en un sistema completamente separado, ya que el aporte de las nuevas bombas en el sistema tiende a llegar al rango mínimo el cual reduciría su vida útil
- Los estudiantes deberían ir actualizando y desarrollar mejores técnicas de redes hidráulicas y simulaciones de bombas en serie y paralelo para obtener el punto óptimo de operación del sistema.

BIBLIOGRAFIA

1. Manual de servicio de campo. CENTRILIFT.
2. Manual de operaciones. REDA.
3. Tesis de grado. Ing. Holguer Chicaiza.
4. Bombeo eléctrico sumergible. Ing. Ramiro Almeida Martínez.
5. Apuntes de Bombeo eléctrico sumergible. Universidad Central del Ecuador.
6. The technology of artificial lift methods. Kermit Brown.
7. Ing. Yaset Martínez Valdés, Características peculiares de la operación de bombas centrifugas en paralelo.
8. Manual de Entrenamiento, KSB Compañía Sudamericana de Bombas S.A.
9. Apuntes de bombas centrifugas, Maestría en sistema de transporte de petróleos y derivados, Ing. Lenín Ubidia.
10. Electrical submersible pumping, Rio de Janeiro-2006, Mauricio Prado.
11. Bombas centrifugas y volumétricas, Pedro Fernández Díez.
12. Programa de entrenamiento para operadores de ductos, 1995 IPL Technology & Consulting Services Inc.
13. Postgrado Ing. Mecánica Escuela Politécnica Nacional Quito– Marzo 2009. Ing. Luis Farfan.
14. Jaime Cadena Rodríguez, Calculo y diseño de redes de distribución de agua potable, Tesis previa a la obtención del título de Ingeniero mecánico, EPN, 1979.
15. Jorge Brito y Edgar Jumbo, Calculo de redes de distribución de fluidos de trabajo para campos petroleros, previa a la obtención del título de Ingeniero mecánico, EPN.
16. Andrzej J. Osiadacz, 1987, Simulation and analysis of gas networks.
17. Jorge Pazmiño Urquiza, 1993, Sistemas para diseñar instalaciones superficiales de producción.
18. Halliburton, Recopilación técnica ingeniería de yacimientos.

19. Juan Saldarriaga, 2009, Hidráulica de tuberías.
20. Mauricio Ubidia y Alberto San Andrés, Calculo y diseño de redes de distribución de gas natural es estado estable, Tesis previa a la obtención del título de Ingeniero mecánico, EPN, 1980.
21. Academia Hütte de Berlín (1965). *Manual del Ingeniero*. Editorial Gustavo Gili, S. A.
22. Guerrero O. (1995). *Ecuación Modificada de Colebrook-White*. Revista Ingeniería Hidráulica de México, Vol. X, pp. 43-48, Enero-Abril.

ANEXOS

ANEXO A - Leyes de Afinidad de las Bombas Centrifugas.

Al cambiar la velocidad operacional de una bomba centrífuga, las características de desempeño de la bomba cambiarán respectivamente. Estos cambios se pueden predecir mediante el uso de las Leyes de Afinidad, las cuales gobiernan el desempeño de la bomba centrífuga a medida que ocurren cambios en la velocidad de operación.

Las leyes mostraron que para condiciones dinámicamente similares o relativamente comunes, algunos parámetros adimensionales permanecían constantes. Cuando se aplican a cada punto sobre una curva de desempeño altura de columna-caudal, estas leyes demuestran que cuando cambiamos la velocidad de operación:

- La capacidad es directamente proporcional a la velocidad.
- La altura de columna generada es proporcional al cuadrado de la velocidad.
- La potencia al freno es proporcional al cubo de la velocidad
- La potencia generada por el motor es directamente proporcional a la velocidad.

Utilizaremos la primera ecuación de Euler para deducir las leyes de semejanza de las bombas centrifugas, para esto asumiremos que la bomba opere a su mejor punto de eficiencia BEP, $V_{u1}=0$, esto quiere decir que no hay pre-rotación

$$gH = (U_2 V_{U2} - U_1 V_{U1})$$

$$gH = U_2 V_{U2}$$

$$H_B = \frac{\Delta P}{\rho g} = \frac{4\pi^2}{g} N^2 r_2^2 - \frac{1}{g \tan \beta_2} \frac{N}{\epsilon} Q$$

Re-arreglado tenemos:

$$\frac{gH_B}{4\pi^2 N^2 r^2} = 1 - \frac{Q}{4\pi^2 N r^2 \epsilon \tan \beta}$$

$$\frac{gH_B}{4\pi^2 N^2 r^2} = 1 - \frac{Q}{4\pi^2 N r^3} \frac{r}{\epsilon \tan \beta}$$

Definimos las siguientes variables adimensionales tenemos:

$$H_d = \frac{gH_B}{4\pi^2 N^2 r^2}$$

$$Q_d = \frac{Q}{4\pi^2 N r^3} \frac{r}{\epsilon \tan \beta}$$

La ecuación de Euler en forma adimensional se puede escribir:

$$H_d = 1 - Q_d$$

Si efectuamos dos estados equivalentes y lo evaluamos tenemos:

$$Q_d = \frac{Q_1}{4\pi^2 N_1 r_1^3} \frac{r_1}{\epsilon_1 \tan \beta_1} = \frac{Q_2}{4\pi^2 N_2 r_2^3} \frac{r_2}{\epsilon_2 \tan \beta_2}$$

$$H_d = 1 - Q_d = \frac{gH_{B1}}{4\pi^2 N_1^2 r_1^2} = \frac{gH_{B2}}{4\pi^2 N_2^2 r_2^2}$$

Simplificando:

$$\frac{r_1}{r_2} = \left(\frac{Q_1}{Q_2} \frac{N_2}{N_1} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{r_1 \epsilon_2 \tan \beta_2}{r_2 \epsilon_1 \tan \beta_1} \right)^{\frac{1}{3}} = \frac{D_1}{D_2}$$

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{D_1^3 N_1}{D_2^3 N_2}; \quad Q_1 = \frac{N_1}{N_2} \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^3 Q_2 \quad (1.33)$$

$$\frac{r_1}{r_2} = \left(\frac{gN_2^2 H_{B1}}{gN_1^2 H_{B2}} \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{D_1}{D_2}$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{N_1^2 D_1^2}{N_2^2 D_2^2}; \quad H_1 = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 H_2$$

$$\frac{BHP_1}{BHP_2} = \frac{N_1^3 D_1^5}{N_2^3 D_2^5}$$

Dependiendo del uso que se utilice se puede mantener iguales las revoluciones o diámetros, si mantenemos iguales diámetros en la semejanza tenemos las siguientes ecuaciones:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{N_1^2}{N_2^2}$$

$$\frac{BHP_1}{BHP_2} = \frac{N_1^3}{N_2^3}$$

Reemplazando las ecuaciones anteriores en la curva real de la bomba centrífuga y efectuando las respectivas operaciones tenemos la ecuación general de la curva para diferentes revoluciones y diámetros con la cual podemos construir las diferentes curvas de cabeza caudal para una etapa.

- Deduciremos la ecuación general de las bombas centrífugas para quinto grado debido al cual se ajusta la curva de las bombas de alta presión del caso de estudio, manteniendo un diámetro constante del rodete $D_1=D_2$.
- Para las curvas de las bombas booster deduciremos la ecuación de segundo grado variando revoluciones y diámetros.

Curva general de quinto grado para bombas de alto caudal y cabeza.

$$H_1 = aQ_1^5 + bQ_1^4 + cQ_1^3 + dQ_1^2 + eQ_1 + f \text{ curva de fabrica}$$

Utilizando las ecuaciones 1.36 y 1.37 en la ecuación 91.39) tenemos:

$$H_2 \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 = a \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^5 Q_2^5 + b \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^4 Q_2^4 + c \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^3 Q_2^3 + d \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 Q_2^2 + e \left(\frac{N_1}{N_2}\right) Q_2 + f$$

Dividiendo toda la ecuación para $\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2$.

$$H_2 = a \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^3 Q_2^5 + b \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 Q_2^4 + c \left(\frac{N_1}{N_2}\right) Q_2^3 + d Q_2^2 + e \left(\frac{N_2}{N_1}\right) Q_2 + f \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2$$

Para varias etapas la ecuación queda de la siguiente forma:

$$H_2 = Netapas * \left[a \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^3 Q_2^5 + b \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 Q_2^4 + c \left(\frac{N_1}{N_2}\right) Q_2^3 + d Q_2^2 + e \left(\frac{N_2}{N_1}\right) Q_2 + f \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \right]$$

Curva general de segundo grado para bombas booster, baja presión y alto caudal.

$$H_1 = aQ_1^2 + bQ_1 + c; \quad \text{curva de fabrica}$$

Utilizando las ecuaciones de semejanza tenemos.

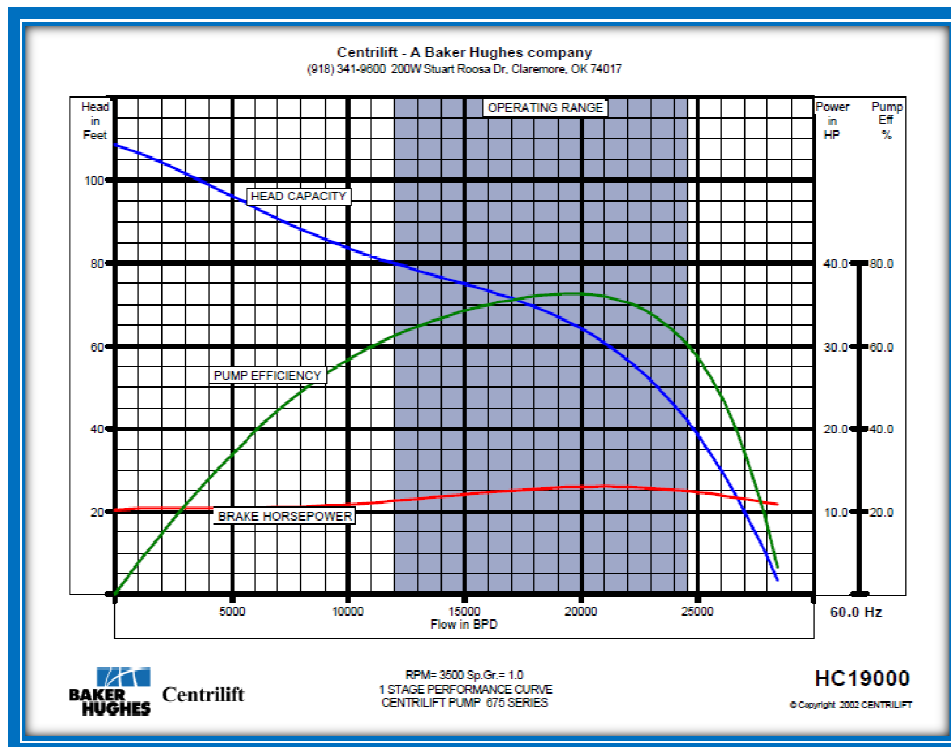
$$\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 H_2 = a \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^5 Q_2^2 + b \left(\frac{N_1}{N_2}\right) \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^3 Q_2 + c$$

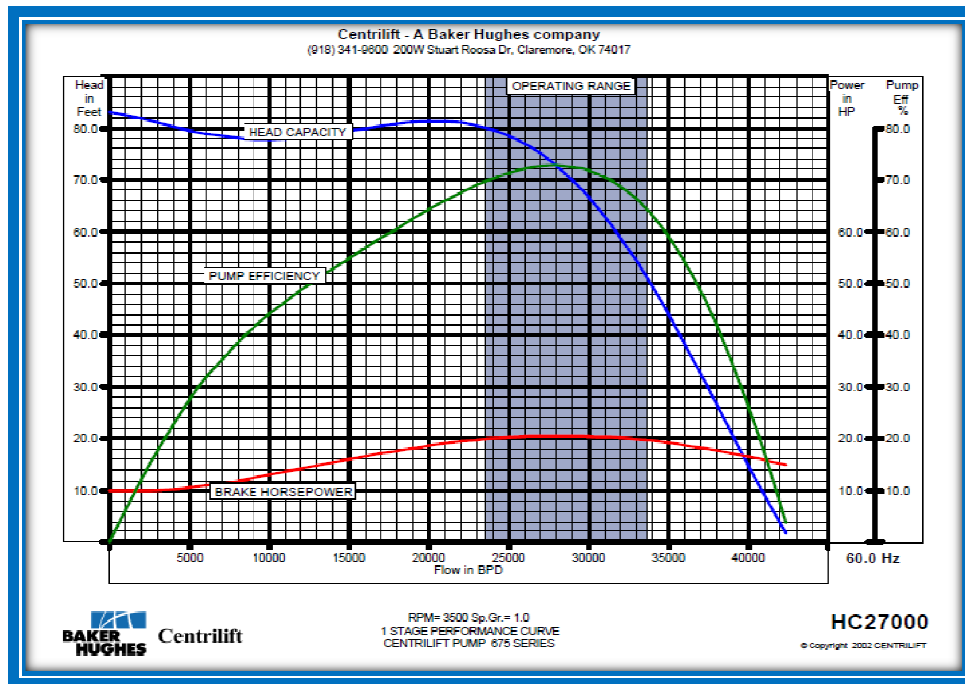
Luego dividimos para: $\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2$ tenemos:

$$H_2 = a \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^3 Q_2^2 + b \left(\frac{N_2}{N_1}\right) \left(\frac{D_1}{D_2}\right) Q_2 + c \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2$$

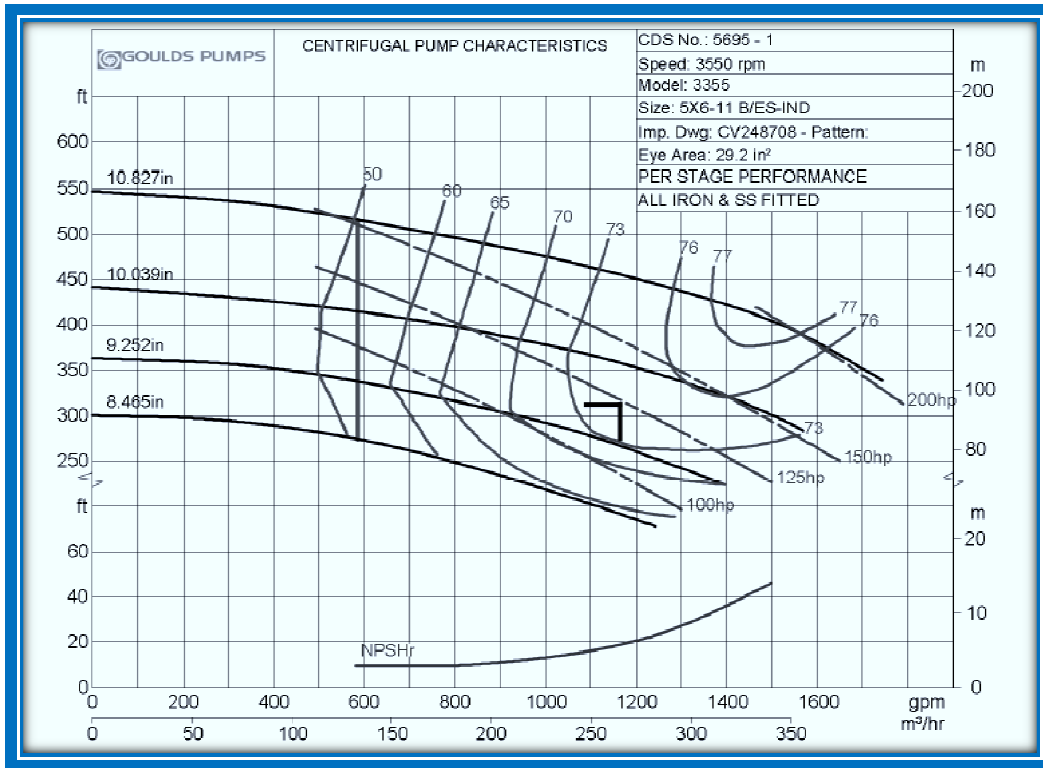
ANEXO B

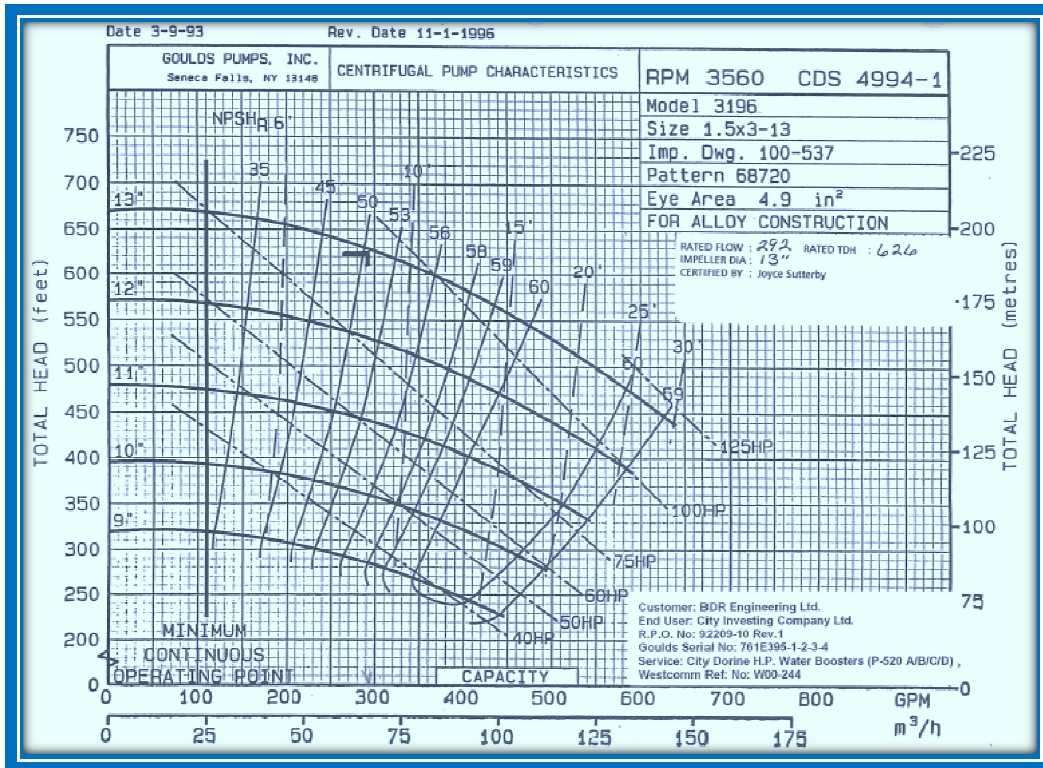
B.1 Curva de bombas centrifugas de inyección de agua Cía. Centrilift





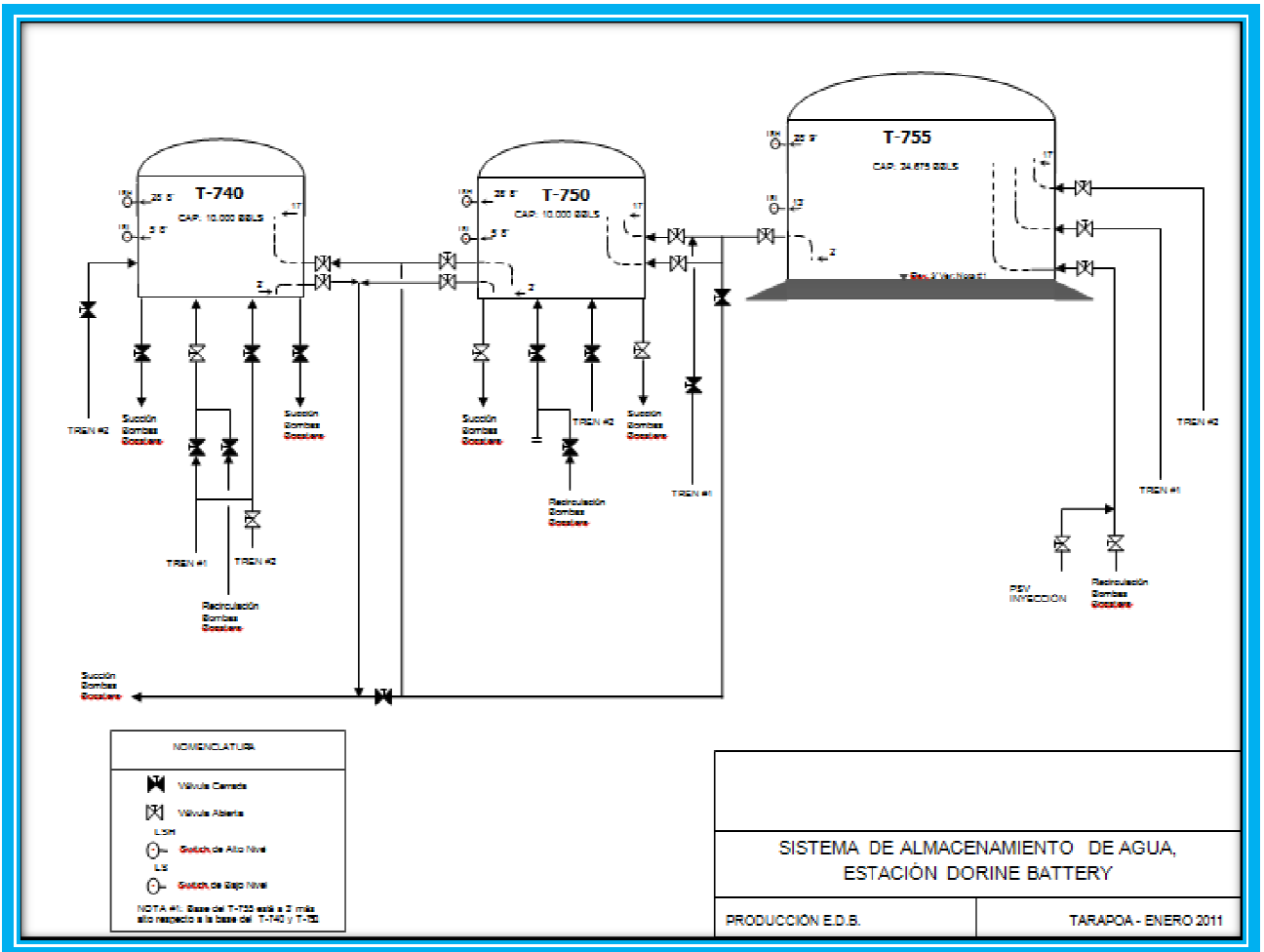
B.2 Curva de bombas centrifugas de booster Cía. Goulds pumps

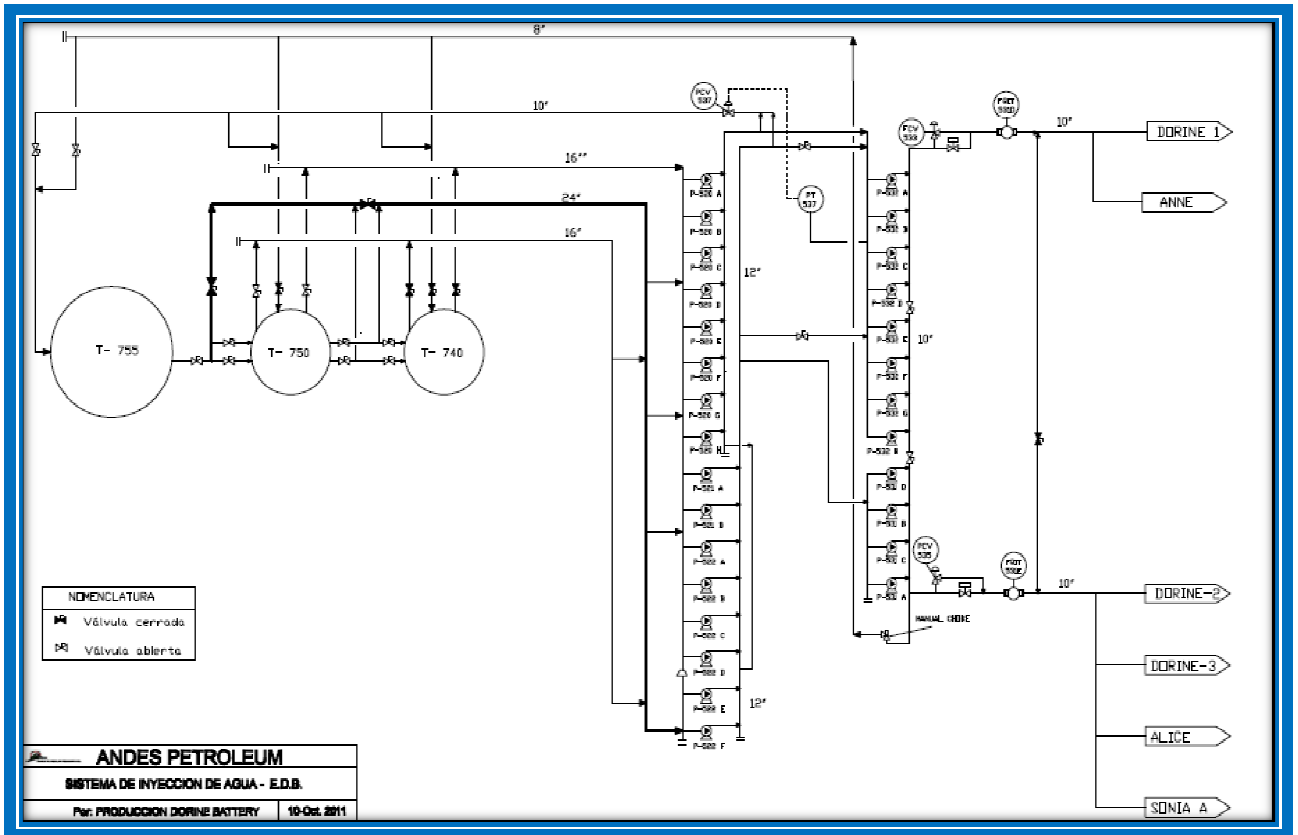


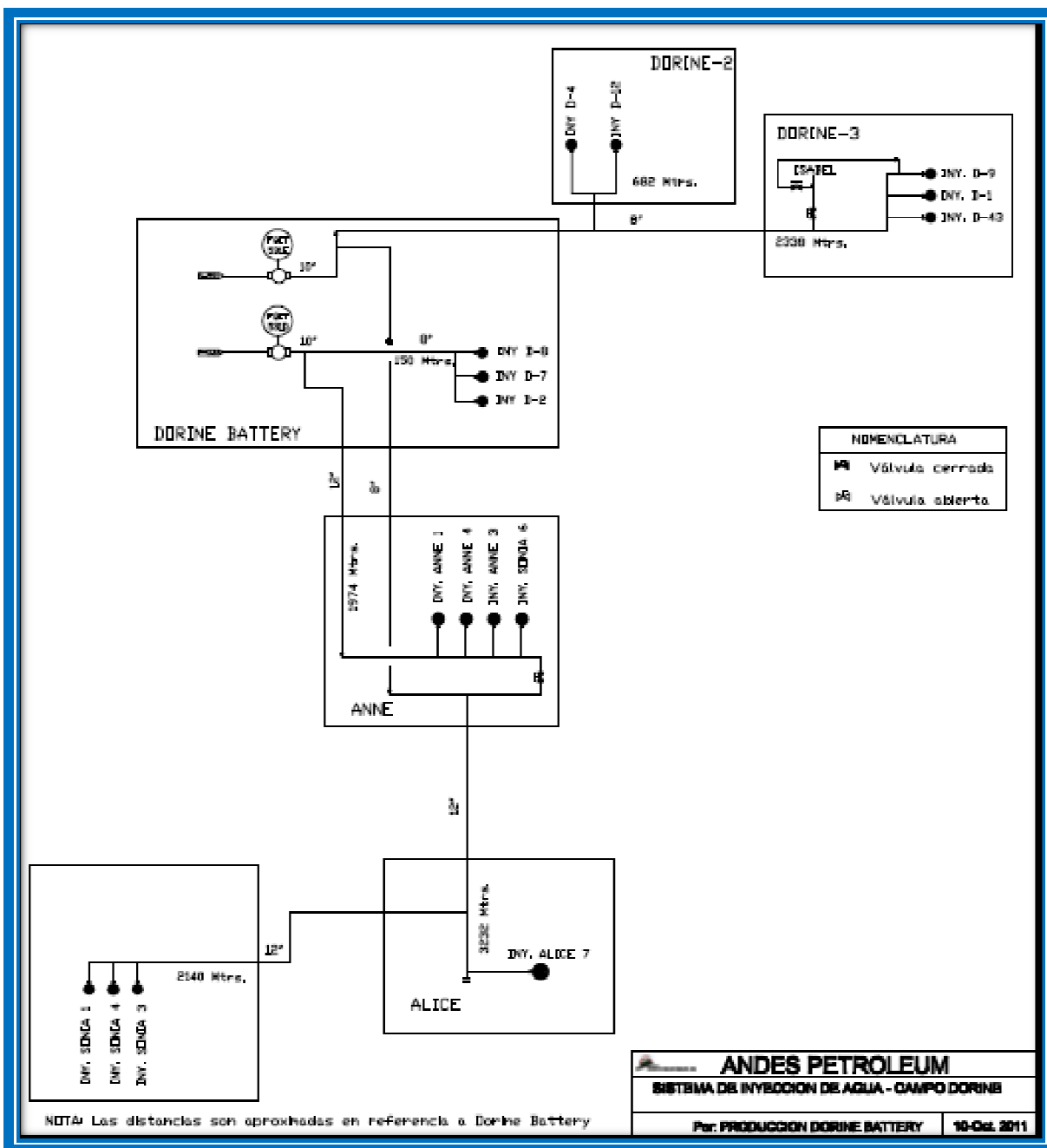


ANEXO C

C.1 Diagrama de conexiones del proceso de agua, sistema de bombeo y red de tubería







NOTA: Las distancias son aproximadas en referencia a Dorine Battery

ANEXO D - Desarrollo de Soluciones en MATLAB

PROGRAMA BOMBAS

D.1. SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO (TANQUE)

D.1.1. Descripción:

1. Ls.- longitud en metros de la tubería de succión del sistema de bombeo,
2. Ds.- Diámetro de la tubería en metros,
3. f.- factor de pérdidas,
4. g.- constante de la gravedad en m/s,
5. Z1.- altura en metros desde el eje de la bomba al nivel medio de conservación del tanque,
6. Pa.- presión atmosférica (Kg/m^3)
7. Pv.- Presión de vapor a la densidad y temperatura del líquido,
8. Dw.- densidad del agua en Kg/m^3
9. T.- temperatura promedio en $^{\circ}\text{F}$,
10. Q.- caudal en m^3/s ,
11. NPSHr.- Presión neta de succión requerida (net positive suction head required), es probado y entregado por el fabricante de las bombas en nuestro caso GOULDS.
12. NPSHd.- Presión neta de succión disponible de un líquido en la boca de succión de la bomba, de forma que no se produzca cavitación en la bomba. Es la diferencia entre la energía total del fluido en la aspiración de la bomba y la presión de vapor del líquido.¹
13. $h_{fs}=0.0827*f*L_s*Q^2/D_s^5$ pérdidas por fricción en la línea de succión.
14. $NPSH_{dm}=NPSH_r+1.5$.- Valor mínimo del sistema NPSHd
15. $h_{smin}=(NPSH_r+1.5)-(P_a-P_v)/(g*D_w)$.- hsm, altura mínima requerida
16. $P_{smin}=h_{smin}*1.42$.- en psi, presión mínima de succión

¹ http://www.mavainsa.com/documentos/6_bombas.pdf

17. $H_{sb}=Z_1-h_{fs}$.- en m, altura de succión de las bombas booster
18. $P_{ss}=H_{sb}*1.42$.- en psi, presión de succión de las bombas booster
19. Para el cálculo de la presión de descarga, consideramos:
20. L_d .- longitud en metros de la tubería de descarga
21. D_d .- diámetro de la descarga en metros
22. P_{siny} .- en psi, presión de succión de las bombas de inyección
23. $H_2=P_{siny}/1.42$.- en metros.
24. Vamos a hacer un bucle que nos permita graficar la altura de la descarga en función del caudal generado
25. j .- contador
26. i .- valores que generará el bucle y que equivale al caudal generado
27. $j=j+1$; $qs(j)=i$.- generación del vector de caudales
28. $H_{fd}(j)=0.0827*f*L_d*qs(j)^2/D_d^5$.- cálculo de la altura en función del caudal.
29. $H_d(j)=H_2+H_{fd}(j)$.- altura de descarga total

D.1.2. Codificación:

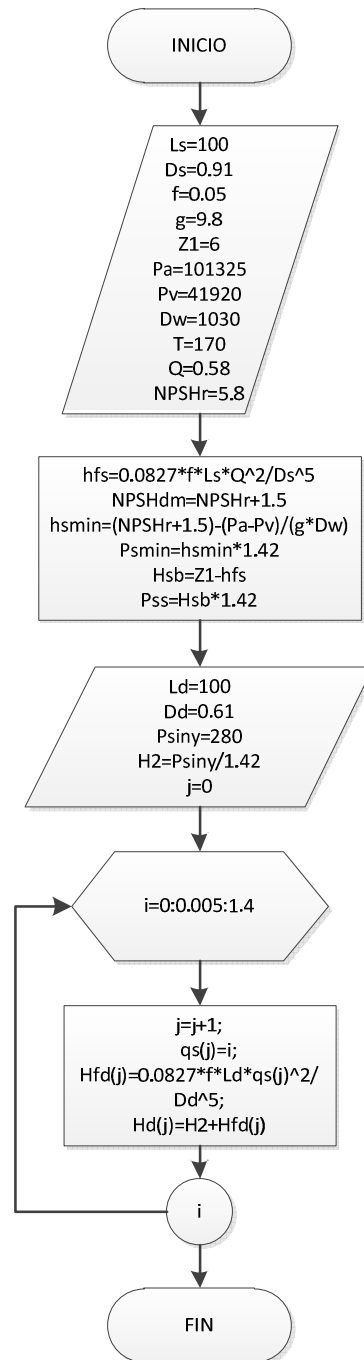
```

% bombas.m
%
clc;clf; clear all;format short g
Ls=100; % m
Ds=0.89; % 2 lineas de 24 +12 in
f=0.19;
g=9.8; % m/s^2
Z1=4; % m, diferencia de altura desde ojo de bomba al nivel del tanque
Pa=101325; %Pa (Kg/m^2) presion atmosferica
Pv=41920; %Pa, presion de vapor a la densidad y temperatura del liquido
Dw=1030; % Kg/m3 densidad del agua
T=170; %F
Q=0.5548; %m3/s
NPSHr=5.8; % NPSHr dado por el fabricante,Bombas Goulds, cabiar
dependiendo del caudal de bomba
hfs=0.0827*f*Ls*Q^2/Ds^5; %Calculo de las perdidas por friccion en la
tubería de succión.
NPSHdm=NPSHr+1.5; %Valor minimo del sistema NPSHd
hsmn=(NPSHr+1.5)-(Pa-Pv)/(g*Dw); %hsm, altura minima requerida
Psmn=hsmn*1.42; % psi, presion minima de succión
Hsb=Z1-hfs; %m, altura de succión de las bombas booster
Pss=Hsb*1.42; %psi, presión de succión de las bombas booster
Ld=100; %m
Dd=0.61; % 2 lineas de 12"

```

```
Psiny=280; % psi, presion de succión de las bombas de inyección
H2=Psiny/1.42; %m
j=0
for i=0:0.005:1.4;
    j=j+1;
    qs(j)=i;
    Hfd(j)=0.0827*f*Ld*qs(j)^2/Dd^5;
    Hd(j)=H2+Hfd(j);
end
```

D.1.3. Diagrama de Flujo:



Luego de este proceso que es de verificación de la altura de succión en las bombas BOOSTER, vamos a un proceso interactivo que determina las curvas y puntos de operación de las bombas y el sistema

D.2. SISTEMA DE BOMBEO DE BAJA PRESIÓN (BOMBAS BOOSTER).

D.2.1. Descripción:

1. ntipos.- Número de tipos de bombas. Consideramos que en una estación y de acuerdo a las necesidades y posibilidades se pueden instalar diferentes tipos y características de bombas,
2. grado.- las Curvas Características seguirán un patrón de comportamiento experimentado y definido por el fabricante, en nuestro caso ajustamos a una curva polinómica de grado 2, con los datos del fabricante y para cada tipo se ingresan sus datos de placa.
3. netapas.- Número de etapas de cada arreglo en serie de cada tipo de bomba,
4. nbombas.- Número de bombas en paralelo, para cada tipo de bombas se puede generar un arreglo con un número determinado de bombas.
5. No.- velocidad de placa de la bomba en RPM.
6. Do.- Diámetro en pulgadas del impeler de la bomba.
7. Qbomba1 o Qbomba2 o Qbomba3.- Caudal de la bomba tomado en par ordenado de la curva característica del fabricante en gpm (galones por minuto).
8. $Q_{bomba1} = Q_{bomba1} * 0.00006308$.- cambio de unidades de gpm a m^3/s , igual a Qbomba2 y Qbomba3.
9. Hbomba1 o Hbomba2 o Hbomba3.- presión en pies de H_2O
10. $H_{bomba1} = H_{bomba1} * 0.3048$.- cambio de unidades de pies a metros de H_2O , igual a Hbomba2 y Hbomba3.

Ingresado los datos anteriores, es posible entonces desplegar la curva característica generada por los datos de la bomba de cada tipo.

1. Nnew.- Para cada bomba del mismo tipo se puede en operación trabajar en distinta velocidad a la de placa del fabricante, siempre relacionada con el motor que transmite en rpm.

2. D_{new} .- Diámetro del impeler real, cada bomba puede en determinada circunstancia trabajar con diferente diámetro al de placa, el fabricante diseña diferentes diámetros de impeler para cada modelo de bomba.
3. $N=N_{new}/N_o$.- relación entre la velocidad de placa y la de operación.
4. $D=D_{new}/D_o$.- relación entre la velocidad de placa y la de operación.
5. $coefbomba11=polyfit(Q_{bomba1}, H_{bomba1}, grado)$.- coeficientes originados en los datos de la curva original proporcionados por el fabricante de la marca.
6. m .- número asignado a cada tipo de bomba
7. n .- número asignado a cada bomba de cada tipo formadas en paralelo.
8. $coefbomba(m,n,1)=coefbomba11(1)*((D_o(m)/D_{new}(m,n))^3$.- Ajustamos el primer coeficiente de la curva en relación a la velocidad y diámetro del impeler en operación.
9. $coefbomba(m,n,2)=coefbomba11(2)*((D_o(m)/D_{new}(m,n))*(N_{new}(m,n)/N_o(m)))$.- Ajustamos el segundo coeficiente de la curva en relación a la velocidad y diámetro del impeler en operación.
10. $coefbomba(m,n,3)=coefbomba11(3)*((D_{new}(m,n)/D_o(m))^2*((N_{new}(m,n)/N_o(m))^2)$.- Ajustamos el tercer coeficiente de la curva en relación a la velocidad y diámetro del impeler en operación.
11. i.- Presión en metros generada como variable para un determinado rango en el que se ajustará la curva en adición al número de bombas en paralelo, el valor inicial siempre será el tercer coeficiente o constante.
12. c.= $coefbomba(m,n,3)$ -i.- definición de la constante de la ecuación cuadrática, para la interacción con Newton, esta depende del rango y siempre será el residuo del tercer coeficiente con la presión generada desde la variable i .
13. c1.- cuando el caudal es una adición de dos interacciones utilizamos también una segunda definición de la constante de la ecuación cuadrática.
14. j.- contador, este nos permite construir los vectores.

- 15.x.- interacción de Newton para ajustar la curva a los datos vecinos cercanos, aquí de acuerdo al método debemos establecer un rango de ajuste que no distorsione la curva a valores lejanos.
- 16.Hs.- altura del par ordenado de la curva en metros de agua.
17. Qs.- Caudal en m^3/s del par ordenado de la curva.
- 18.Hpd.- Altura de la curva que adicionado en paralelo varias bombas del mismo tipo.
- 19.Qpd.- Caudal de la curva que adicionado en paralelo varias bombas del mismo.
- 20.Hcomp.- valor comparativo de mayor altura para el algoritmo.
- 21.Hps.-Vector de presiones del par ordenado en paralelo – total.
- 22.Qps.- Vector de caudales del par ordenado en paralelo – total
- 23.Hpsd.-Vector de presiones del par ordenado en paralelo – del mismo tipo de bombas.
- 24.Qpsd.-Vector de presiones del par ordenado en paralelo – del mismo tipo de bombas.
- 25.Qpsuccion1.-Vector de caudales generado del par ordenado en paralelo del vector Qps.
- 26.Hpsuccion1.-Vector de presiones generado del par ordenado en paralelo – del vector Hps.
27. $\text{coefgrupo1}=\text{polyfit}(\text{Qpsuccion1}(m,:),\text{Hpsuccion1}(m,:),\text{grado})$.- coeficiente de la curva ajustada al grado definido en nuestro caso cuadrática para cada formación, igual coefgrupo2 y coefgrupo3.
- 28.Q1s.- Caudales generado del par ordenado en paralelo de 2 formaciones diferentes.
- 29.H1s.- Presiones generado del par ordenado en paralelo de 2 formaciones diferentes.
- 30.Q2s.- Caudales generado del par ordenado en paralelo de 3 formaciones diferentes.

31. H2s.- Presiones generados del par ordenado en paralelo de 3 formaciones diferentes.

D.2.2. Codificación:

```

%% %%%
% PROGRAMA: BOMBEO HIDRÁULICO SISTEMA DE REINYECCIÓN DE AGUA %
% ----- %
% BOMBAS BOOSTER - SUCCIÓN %
% bombasbooster.m %
%% %%%
clf,clc;format short g % limpieza de memoria y pantalla
%%
ntipos= 3; % Número de tipos de bombas
grado=2; % grado de ajuste de las curvas ecuaciones
for m=1:ntipos
%% %%%
% Bomba N° 1 % 522 %
% Goulds - DIA 10.827" %
% GPM 1168 FT HD 617 RPM 3600 %
% MOD 3355 SIZE 5X6-11B %
% A20 MAT L CONSTR, 316 SS %
% SERIE X252C298-3 %
% TIPE FLOOD OIL %
%% %%%
% Bombas similares,  $H = a + c \cdot Q^2$ 
if m==1
netapas(m)=1; % número de etapas de cada arreglo en serie
nbombas(m)=6; % número de bombas en paralelo Tipo1
% Velocidad RPM
No(m)=3600; % RPM de placa
% Diámetro en pulgadas
Do(m)=10.827; % inchs de placa
% Datos de curva característica dados por el fabricante
Qbomba1=[0 100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000 1100 1200 1300 1400 1500 1600 1700
1762.2];% gpm
Qbomba1=Qbomba1*0.00006308; %m3/s
Hbomba1=[1131 1118 1113 1109 1090 1081 1062 1044 1029 1006 987 959 935 903 875 837 790
739 692];%fth20 (bomba 1)
Hbomba1=Hbomba1*0.3048; %mh2O
% grafica bombas en paralelo 1
figure (1)
subplot(3,2,1),plot(Qbomba1,Hbomba1),title('Datos del Fabricante Bomba Tipo
1'),xlabel('Q(m3/s)'),ylabel('H(mh2o)')
for n=1:nbombas(m);
if n==1;
Nnew(m,n)=3600;% RPMs que se puede variar bomba 11
Dnew(m,n)=10.827;% diámetro que se puede variar bomba 11

```

```

N(m,n)=Nnew(m,n)/No(m);
D(m,n)=Dnew(m,n)/Do(m);
elseif n==2;
    Nnew(m,n)=3600;% RPMs que se puede variar bomba 12
    Dnew(m,n)=10.827;% diámetro que se puede variar bomba 12
    N(m,n)=Nnew(m,n)/No(m);
    D(m,n)=Dnew(m,n)/Do(m);
elseif n==3;
    Nnew(m,n)=3600;% RPMs que se puede variar bomba 13
    Dnew(m,n)=10.827;% diámetro que se puede variar bomba 13
    N(m,n)=Nnew(m,n)/No(m);
    D(m,n)=Dnew(m,n)/Do(m);
elseif n==4;
    Nnew(m,n)=3600;% RPMs que se puede variar bomba 14
    Dnew(m,n)=10.827;% diámetro que se puede variar bomba 14
    N(m,n)=Nnew(m,n)/No(m);
    D(m,n)=Dnew(m,n)/Do(m);
elseif n==5;
    Nnew(m,n)=3600;% RPMs que se puede variar bomba 15
    Dnew(m,n)=10.827;% diámetro que se puede variar bomba 15
    N(m,n)=Nnew(m,n)/No(m);
    D(m,n)=Dnew(m,n)/Do(m);
else
    Nnew(m,n)=3600;% RPMs que se puede variar bomba 16
    Dnew(m,n)=10.827;% diámetro que se puede variar bomba 16
    N(m,n)=Nnew(m,n)/No(m);
    D(m,n)=Dnew(m,n)/Do(m);
end
end
% coeficientes de la ECUACION DE LA CURVA ORIGINAL tomada de los datos
% del fabricante
coefbomba11=polyfit(Qbomba1,Hbomba1,grado);% primera bomba en orden
for n=1:nbombas(m);
    coefbomba(m,n,1)=coefbomba11(1)*((Do(m)/Dnew(m,n))^3);
    coefbomba(m,n,2)=coefbomba11(2)*((Do(m)/Dnew(m,n))*(Nnew(m,n)/No(m)));
    coefbomba(m,n,3)=coefbomba11(3)*((Dnew(m,n)/Do(m))^2)*((Nnew(m,n)/No(m))^2);
end
% Data para las curvas de todas las BOMBAS Tipo1
for n=1:nbombas(m);
    j=0;
    for i=coefbomba(m,n,3):-5:0;
        c=coefbomba(m,n,3)-i;
        j=j+1;
        x=Newt_m('eqn_2',0.5,coefbomba(m,n,1),coefbomba(m,n,2),c);
        Hs(m,n,j)=i;
        Qs(m,n,j)=x;
        if n==1
            Hpd(1,j)=i;
            Qpd(1,j)=x;
        end
    end
end
end

```

```

end
figure(1)
subplot(3,2,2),plot(Qpd(1,:),Hpd(1,:)),title('Curva Polinómica Bombas Tipo 1 en
Paralelo'),xlabel('Q(m3/s)'),ylabel('H(mh2o)')
hold on
% Bombas formación en paralelo
% Comparamos entre la primera y la segunda bomba.
% newton primera y segunda bomba
if coefbomba(m,1,3)==coefbomba(m,2,3);
j=0;
Hcomp=coefbomba(m,1,3);% valor comparativa de mayor altura
for i=coefbomba(1,3):-5:0;
j=j+1;
c=coefbomba(m,1,3)-i;
c1=coefbomba(m,2,3)-i;

x=Newt_m('eqn_2',0.5,coefbomba(m,1,1),coefbomba(m,1,2),c)+Newt_m('eqn_2',0.5,coefbomba(m,2,1
),coefbomba(m,2,2),c1);
Hps(m,1,j)=i;
Qps(m,1,j)=x;
Hpsd(1,j)=i;
Qpsd(1,j)=x;
end
elseif coefbomba(m,1,3)>coefbomba(m,2,3);
j=0;
Hcomp(1)=coefbomba(m,1,3);% valor comparativa de mayor altura
for i=coefbomba(m,1,3):-5:coefbomba(m,2,3);
j=j+1;
c=coefbomba(m,1,3)-i;
x=Newt_m('eqn_2',0.5,coefbomba(m,1,1),coefbomba(m,1,2),c);
Hps(m,1,j)=i;
Qps(m,1,j)=x;
Hpsd(1,j)=i;
Qpsd(1,j)=x;
end
for i=coefbomba(m,2,3):-5:0;
j=j+1;
c=coefbomba(m,1,3)-i;
c1=coefbomba(m,2,3)-i;

x=Newt_m('eqn_2',0.5,coefbomba(m,1,1),coefbomba(m,1,2),c)+Newt_m('eqn_2',0.5,coefbomba(m,2,1
),coefbomba(m,2,2),c1);
Hps(m,1,j)=i;
Qps(m,1,j)=x;
Hpsd(1,j)=i;
Qpsd(1,j)=x;
end
else coefbomba(m,2,3)>coefbomba(m,1,3);
j=0;
Hcomp(1)=coefbomba(m,2,3);% valor comparativa de mayor altura
for i=coefbomba(m,2,3):-5:coefbomba(m,1,3);

```

```

j=j+1;
c=coefbomba(m,2,3)-i;
x=Newt_m('eqn_2',0.5,coefbomba(m,2,1),coefbomba(m,2,2),c);
Hps(m,1,j)=i;
Qps(m,1,j)=x;
Hpsd(1,j)=i;
Qpsd(1,j)=x;
end
for i=coefbomba(m,1,3):-5:0;
j=j+1;
c=coefbomba(m,2,3)-i;
c1=coefbomba(m,1,3)-i;

x=Newt_m('eqn_2',0.5,coefbomba(m,1,1),coefbomba(m,1,2),c1)+Newt_m('eqn_2',0.5,coefbomba(m,2,
1),coefbomba(m,2,2),c);
Hps(m,1,j)=i;
Qps(m,1,j)=x;
Hpsd(1,j)=i;
Qpsd(1,j)=x;
end
end
figure(1)
subplot(3,2,2),plot(Qpsd(1,:),Hpsd(1,:)),title('Curva Polinómica Bombas Tipo 1 en
Paralelo'),xlabel('Q(m3/s)'),ylabel('H(mh2o)')
hold on
% Adición de bombas en paralelo con las anteriores hasta el total de la
% formación.
for n=2:nbombas(m)-1;
if Hcomp(n-1)==coefbomba(m,n+1,3);
j=0;
Hcomp(n)=Hcomp(n-1); % valor comparativo de mayor altura
for i=Hcomp(n-1):-5:0;
j=j+1;
c=coefbomba(m,n+1,3)-i;
x=Newt_m('eqn_2',0.5,coefbomba(m,n+1,1),coefbomba(m,n+1,2),c)+Qps(m,n-1,j);%
adicionamos los caudales
Hps(m,n,j)=i;
Qps(m,n,j)=x;
Hpsd(n,j)=i;
Qpsd(n,j)=x;
end
elseif Hcomp(n-1)>coefbomba(m,n+1,3);
j=0;
Hcomp(n)=Hcomp(n-1); % valor comparativa de mayor altura
for i=Hcomp(n-1):-5:coefbomba(m,n+1,3);
j=j+1;
x=Qps(m,n-1,j);
Hps(m,n,j)=i;
Qps(m,n,j)=x;
Hpsd(n,j)=i;
Qpsd(n,j)=x;

```

```

end
Hcambio=Hps(m,n,j);
for i=Hcambio-5:-5:0;
    j=j+1;
    c=coefbomba(m,n+1,3)-i;
    x=Qps(m,n-1,j)+Newt_m('eqn_2',0.5,coefbomba(m,n+1,1),coefbomba(m,n+1,2),c);
    Hps(m,n,j)=i;
    Qps(m,n,j)=x;
    Hpsd(n,j)=i;
    Qpsd(n,j)=x;
end
else coefbomba(m,n+1,3)>Hcomp(n-1);
j=0;
Hcomp(n)=coefbomba(m,n+1,3); % valor comparativa de mayor altura
for i=coefbomba(m,n+1,3):-5:Hcomp(n-1)+5;
    j=j+1;
    c=coefbomba(m,n+1,3)-i;
    x=Newt_m('eqn_2',0.5,coefbomba(m,n+1,1),coefbomba(m,n+1,2),c);
    Hps(m,n,j)=i;
    Qps(m,n,j)=x;
    Hpsd(n,j)=i;
    Qpsd(n,j)=x;
end
k=0;
for i=Hcomp(n-1):-5:0;
    j=j+1;
    k=k+1;
    x=Qps(m,n-1,k)+Newt_m('eqn_2',0.5,coefbomba(m,n+1,1),coefbomba(m,n+1,2),c);
    Hps(m,n,j)=i;
    Qps(m,n,j)=x;
    Hpsd(n,j)=i;
    Qpsd(n,j)=x;
end
end
comp(m)=j
figure(1)
subplot(3,2,2),plot(Qpsd(n,:),Hpsd(n,:)),title('Curva Polinómica Bombas Tipo 1 en
Paralelo'),xlabel('Q(m3/s)'),ylabel('H(mh2o)')
hold on
end
%%
%%
%% Bomba N° 2 %% 521 %
% Goulds - DIA 12.75" %
% GPM 390 FT HD 550 RPM 3600 %
% MOD 3196 SIZE 1.50X3-13 %
% A20 MAT L CONSTR, 316 SS %
% SERIE 786E790.2 %
% TIPE FLOOD OIL %
%%
% Bombas similares,  $H = a + c \cdot Q^2$ 

```

```

elseif m==2
netapas(m)=1; % número de etapas de cada arreglo en serie
nbombas(m)=2; % número de bombas en paralelo Tipo1
% Velocidad RPM
No(m)=3600; % RPM de placa
% Diámetro en pulgadas
Do(m)=12.75; % inchs de placa
% Datos de curva característica dadospor el fabricante
Qbomba2=[0 50 100 150 200 250 300 350 400 450 500 550 600 639.7];% gpm
Qbomba2=Qbomba2*0.00006308; %m3/s
Hbomba2=[647 647 639 639 628 614 600 582 560 539 510 478 442 416.4];%fth20 (boma 1)
Hbomba2=Hbomba2*0.3048; %mh2O
% grafica bombas en paralelo 1
figure (1)
subplot(3,2,3),plot(Qbomba2,Hbomba2),title('Datos del Fabricante Bomba Tipo
2'),xlabel('Q(m3/s)'),ylabel('H(mh2o)')
for n=1:nbombas(m);
    if n==1;
        Nnew(m,n)=3600;% RPMs que se puede variar bomba 11
        Dnew(m,n)=12.75;% diámetro que se puede variar bomba 11
        N(m,n)=Nnew(m,n)/No(m);
        D(m,n)=Dnew(m,n)/Do(m);
    else
        Nnew(m,n)=3600;% RPMs que se puede variar bomba 16
        Dnew(m,n)=12.75;% diámetro que se puede variar bomba 16
        N(m,n)=Nnew(m,n)/No(m);
        D(m,n)=Dnew(m,n)/Do(m);
    end
end
end
% coeficientes de la ECUACION DE LA CURVA ORIGINAL tomada de los datos
% delfabricante
coefbomba12=polyfit(Qbomba2,Hbomba2,grado);% primera bomba en orden
for n=1:nbombas(m);
    coefbomba(m,n,1)=coefbomba12(1)*((Do(m)/Dnew(m,n))^3);
    coefbomba(m,n,2)=coefbomba12(2)*((Do(m)/Dnew(m,n))*(Nnew(m,n)/No(m)));
    coefbomba(m,n,3)=coefbomba12(3)*((Dnew(m,n)/Do(m))^2)*((Nnew(m,n)/No(m))^2);
end
end
% Data para las curvas de todas las BOMBAS Tipo1
clear Hpd Qpd
for n=1:nbombas(m);
    j=0;
    for i=coefbomba(m,n,3):-5:0;
        c=coefbomba(m,n,3)-i;
        j=j+1;
        x=Newt_m('eqn_2',0.5,coefbomba(m,n,1),coefbomba(m,n,2),c);
        Hs(m,n,j)=i;
        Qs(m,n,j)=x;
    if n==1
        Hpd(1,j)=i;
        Qpd(1,j)=x;
    end
end

```



```

end
end
figure(1)
subplot(3,2,4),plot(Qpd(1,:),Hpd(1,:)),title('Curva Polinómica Bombas Tipo 2 en
Paralelo'),xlabel('Q(m3/s)'),ylabel('H(mh2o)')
hold on
% Bombas formación en paralelo
% Comparamos entre la primera y la segunda bomba.
% newton primera y segunda bomba
clear Qpsd Hpsd
if coefbomba(m,1,3)==coefbomba(m,2,3);
j=0;
Hcomp=coefbomba(m,1,3);% valor comparativa de mayor altura
for i=coefbomba(1,2):-5:0;
j=j+1;
c=coefbomba(m,1,3)-i;
c1=coefbomba(m,2,3)-i;

x=Newt_m('eqn_2',0.5,coefbomba(m,1,1),coefbomba(m,1,2),c)+Newt_m('eqn_2',0.5,coefbomba(m,2,1
),coefbomba(m,2,2),c1);
Hps(m,1,j)=i;
Qps(m,1,j)=x;
Hpsd(1,j)=i;
Qpsd(1,j)=x;
end
elseif coefbomba(m,1,3)>coefbomba(m,2,3);
j=0;
Hcomp(1)=coefbomba(m,1,3);% valor comparativa de mayor altura
for i=coefbomba(m,1,3):-5:coefbomba(m,2,3);
j=j+1;
c=coefbomba(m,1,3)-i;
x=Newt_m('eqn_2',0.5,coefbomba(m,1,1),coefbomba(m,1,2),c);
Hps(m,1,j)=i;
Qps(m,1,j)=x;
Hpsd(1,j)=i;
Qpsd(1,j)=x;
end
for i=coefbomba(m,2,3):-5:0;
j=j+1;
c=coefbomba(m,1,3)-i;
c1=coefbomba(m,2,3)-i;

x=Newt_m('eqn_2',0.5,coefbomba(m,1,1),coefbomba(m,1,2),c)+Newt_m('eqn_2',0.5,coefbomba(m,2,1
),coefbomba(m,2,2),c1);
Hps(m,1,j)=i;
Qps(m,1,j)=x;
Hpsd(1,j)=i;
Qpsd(1,j)=x;
end
else coefbomba(m,2,3)>coefbomba(m,1,3);
j=0;

```

```

Hcomp(1)=coefbomba(m,2,3);% valor comparativa de mayor altura
for i=coefbomba(m,2,3):-5:coefbomba(m,1,3);
    j=j+1;
    c=coefbomba(m,2,3)-i;
    x=Newt_m('eqn_2',0.5,coefbomba(m,2,1),coefbomba(m,2,2),c);
    Hps(m,1,j)=i;
    Qps(m,1,j)=x;
    Hpsd(1,j)=i;
    Qpsd(1,j)=x;
end
for i=coefbomba(m,1,3):-5:0;
    j=j+1;
    c=coefbomba(m,2,3)-i;
    c1=coefbomba(m,1,3)-i;

x=Newt_m('eqn_2',0.5,coefbomba(m,1,1),coefbomba(m,1,2),c1)+Newt_m('eqn_2',0.5,coefbomba(m,2,
1),coefbomba(m,2,2),c);
    Hps(m,1,j)=i;
    Qps(m,1,j)=x;
    Hpsd(1,j)=i;
    Qpsd(1,j)=x;
end
end
comp(m)=j
figure(1)
subplot(3,2,4),plot(Qpsd(1,:),Hpsd(1,:)),title('Curva Polinómica Bombas Tipo 2 en
Paralelo'),xlabel('Q(m3/s)'),ylabel('H(mh2o)')
hold on
%%
%%
%% Bomba N°3  % 520 %
% Goulds - DIA 13" %
% GPM 292 FT HD 626 RPM 3600 %
% MOD 3196 SIZE 1.50X3-13 %
% A20 MAT L CONSTR, 316 SS %
% SERIE 762E946.1 %
% TIPE FLOOD OIL %
%%
%-----
else m==3
netapas(m)=1; % número de etapas de cada arreglo en serie
nbombas(m)=8; % número de bombas en paralelo Tipo1
% Velocidad RPM
No(m)=3600; % RPM de placa
% Diámetro en pulgadas
Do(m)=10.827; % inchs de placa
% Datos de curva característica dadospor el fabricante
Qbomba3=[0 50 100 150 200 250 300 350 400 450 500 550 600 606.9];% gpm
Qbomba3=Qbomba3*0.00006308; %m3/s
Hbomba3=[671 675 664 661 646 632 610 582 560 532 503 463 436 423.6];%fth20 (boma 1)
Hbomba3=Hbomba3*0.3048; %mh2O

```

```

% grafica bombas en paralelo 1
figure (1)
subplot(3,2,5),plot(Qbomba3,Hbomba3),title('Datos del Fabricante Bomba Tipo
3'),xlabel('Q(m3/s)'),ylabel('H(mh2o)')
for n=1:nbombas(m);
    if n==1;
        Nnew(m,n)=3600;% RPMs que se puede variar bomba 11
        Dnew(m,n)=10.827;% diámetro que se puede variar bomba 11
        N(m,n)=Nnew(m,n)/No(m);
        D(m,n)=Dnew(m,n)/Do(m);
    elseif n==2;
        Nnew(m,n)=3600;% RPMs que se puede variar bomba 12
        Dnew(m,n)=10.827;% diámetro que se puede variar bomba 12
        N(m,n)=Nnew(m,n)/No(m);
        D(m,n)=Dnew(m,n)/Do(m);
    elseif n==3;
        Nnew(m,n)=3600;% RPMs que se puede variar bomba 13
        Dnew(m,n)=10.827;% diámetro que se puede variar bomba 13
        N(m,n)=Nnew(m,n)/No(m);
        D(m,n)=Dnew(m,n)/Do(m);
    elseif n==4;
        Nnew(m,n)=3600;% RPMs que se puede variar bomba 14
        Dnew(m,n)=10.827;% diámetro que se puede variar bomba 14
        N(m,n)=Nnew(m,n)/No(m);
        D(m,n)=Dnew(m,n)/Do(m);
    elseif n==5;
        Nnew(m,n)=3600;% RPMs que se puede variar bomba 15
        Dnew(m,n)=10.827;% diámetro que se puede variar bomba 15
        N(m,n)=Nnew(m,n)/No(m);
        D(m,n)=Dnew(m,n)/Do(m);
    elseif n==6;
        Nnew(m,n)=3600;% RPMs que se puede variar bomba 14
        Dnew(m,n)=10.827;% diámetro que se puede variar bomba 14
        N(m,n)=Nnew(m,n)/No(m);
        D(m,n)=Dnew(m,n)/Do(m);
    elseif n==7;
        Nnew(m,n)=3600;% RPMs que se puede variar bomba 15
        Dnew(m,n)=10.827;% diámetro que se puede variar bomba 15
        N(m,n)=Nnew(m,n)/No(m);
        D(m,n)=Dnew(m,n)/Do(m);
    else
        Nnew(m,n)=3600;% RPMs que se puede variar bomba 16
        Dnew(m,n)=10.827;% diámetro que se puede variar bomba 16
        N(m,n)=Nnew(m,n)/No(m);
        D(m,n)=Dnew(m,n)/Do(m);
    end
end
% coeficientes de la ECUACION DE LA CURVA ORIGINAL tomada de los datos
% delfabricante
coefbomba13=polyfit(Qbomba3,Hbomba3,grado);% primera bomba en orden
for n=1:nbombas(m);

```

```

coefbomba(m,n,1)=coefbomba13(1)*((Do(m)/Dnew(m,n))^3);
coefbomba(m,n,2)=coefbomba13(2)*((Do(m)/Dnew(m,n))*(Nnew(m,n)/No(m)));
coefbomba(m,n,3)=coefbomba13(3)*((Dnew(m,n)/Do(m))^2)*((Nnew(m,n)/No(m))^2);
end
% Data para las curvas de todas las BOMBAS Tipo1
for n=1:nbombas(m);
    j=0;
    for i=coefbomba(m,n,3):-5:0;
        c=coefbomba(m,n,3)-i;
        j=j+1;
        x=Newt_m('eqn_2',0.06,coefbomba(m,n,1),coefbomba(m,n,2),c);
        Hs(m,n,j)=i;
        Qs(m,n,j)=x;
        if n==1
            Hpd(1,j)=i;
            Qpd(1,j)=x;
        end
    end
end
figure(1)
subplot(3,2,6),plot(Qpd(1,:),Hpd(1,:)),title('Curva Polinómica Bombas Tipo 3 en
Paralelo'),xlabel('Q(m3/s)'),ylabel('H(mh2o)')
hold on
% Bombas formación en paralelo
% Comparamos entre la primera y la segunda bomba.
% newton primera y segunda bomba
clear Qpsd Hpsd
if coefbomba(m,1,3)==coefbomba(m,2,3);
    j=0;
    Hcomp=coefbomba(m,1,3);% valor comparativa de mayor altura
    for i=coefbomba13(3):-5:0;
        j=j+1;
        c=coefbomba(m,1,3)-i;
        c1=coefbomba(m,2,3)-i;

x=Newt_m('eqn_2',0.5,coefbomba(m,1,1),coefbomba(m,1,2),c)+Newt_m('eqn_2',0.5,coefbomba(m,2,1
),coefbomba(m,2,2),c1);
        Hps(m,1,j)=i;
        Qps(m,1,j)=x;
        Hpsd(1,j)=i;
        Qpsd(1,j)=x;
    end
elseif coefbomba(m,1,3)>coefbomba(m,2,3);
    j=0;
    Hcomp(1)=coefbomba(m,1,3);% valor comparativa de mayor altura
    for i=coefbomba(m,1,3):-5:coefbomba(m,2,3);
        j=j+1;
        c=coefbomba(m,1,3)-i;
        x=Newt_m('eqn_2',0.5,coefbomba(m,1,1),coefbomba(m,1,2),c);
        Hps(m,1,j)=i;
        Qps(m,1,j)=x;
    end
end

```

```

    Hpsd(1,j)=i;
    Qpsd(1,j)=x;
end
for i=coefbomba(m,2,3):-5:0;
    j=j+1;
    c=coefbomba(m,1,3)-i;
    c1=coefbomba(m,2,3)-i;

x=Newt_m('eqn_2',0.5,coefbomba(m,1,1),coefbomba(m,1,2),c)+Newt_m('eqn_2',0.5,coefbomba(m,2,1),coefbomba(m,2,2),c1);
    Hps(m,1,j)=i;
    Qps(m,1,j)=x;
    Hpsd(1,j)=i;
    Qpsd(1,j)=x;
end
else coefbomba(m,2,3)>coefbomba(m,1,3);
    j=0;
    Hcomp(1)=coefbomba(m,2,3);% valor comparativa de mayor altura
    for i=coefbomba(m,2,3):-5:coefbomba(m,1,3);
        j=j+1;
        c=coefbomba(m,2,3)-i;
        x=Newt_m('eqn_2',0.5,coefbomba(m,2,1),coefbomba(m,2,2),c);
        Hps(m,1,j)=i;
        Qps(m,1,j)=x;
        Hpsd(1,j)=i;
        Qpsd(1,j)=x;
    end
    for i=coefbomba(m,1,3):-5:0;
        j=j+1;
        c=coefbomba(m,2,3)-i;
        c1=coefbomba(m,1,3)-i;

x=Newt_m('eqn_2',0.5,coefbomba(m,1,1),coefbomba(m,1,2),c1)+Newt_m('eqn_2',0.5,coefbomba(m,2,1),coefbomba(m,2,2),c);
    Hps(m,1,j)=i;
    Qps(m,1,j)=x;
    Hpsd(1,j)=i;
    Qpsd(1,j)=x;
end
end
figure(1)
subplot(3,2,6),plot(Qpsd(1,:),Hpsd(1,:)),title('Curva Polinómica Bombas Tipo 3 en Paralelo'),xlabel('Q(m3/s)'),ylabel('H(mh2o)')
hold on
% Adición de bombas en paralelo con las anteriores hasta el total de la
% formación.
for n=2:nbombas(m)-1;
    if Hcomp(n-1)==coefbomba(m,n+1,3);
        j=0;
        Hcomp(n)=Hcomp(n-1); % valor comparativo de mayor altura
        for i=Hcomp(n-1):-5:0;

```

```

j=j+1;
c=coefbomba(m,n+1,3)-i;
x=Newt_m('eqn_2',0.5,coefbomba(m,n+1,1),coefbomba(m,n+1,2),c)+Qps(m,n-1,j);%
adicionamos los caudales
Hps(m,n,j)=i;
Qps(m,n,j)=x;
Hpsd(n,j)=i;
Qpsd(n,j)=x;
end
elseif Hcomp(n-1)>coefbomba(m,n+1,3);
j=0;
Hcomp(n)=Hcomp(n-1); % valor comparativa de mayor altura
for i=Hcomp(n-1):-5:coefbomba(m,n+1,3);
j=j+1;
x=Qps(m,n-1,j);
Hps(m,n,j)=i;
Qps(m,n,j)=x;
Hpsd(n,j)=i;
Qpsd(n,j)=x;
end
Hcambio=Hps(m,n,j);
for i=Hcambio-5:-5:0;
j=j+1;
c=coefbomba(m,n+1,3)-i;
x=Qps(m,n-1,j)+Newt_m('eqn_2',0.5,coefbomba(m,n+1,1),coefbomba(m,n+1,2),c);
Hps(m,n,j)=i;
Qps(m,n,j)=x;
Hpsd(n,j)=i;
Qpsd(n,j)=x;
end
else coefbomba(m,n+1,3)>Hcomp(n-1);
j=0;
Hcomp(n)=coefbomba(m,n+1,3); % valor comparativa de mayor altura
for i=coefbomba(m,n+1,3):-5:Hcomp(n-1)+5;
j=j+1;
c=coefbomba(m,n+1,3)-i;
x=Newt_m('eqn_2',0.5,coefbomba(m,n+1,1),coefbomba(m,n+1,2),c);
Hps(m,n,j)=i;
Qps(m,n,j)=x;
Hpsd(n,j)=i;
Qpsd(n,j)=x;
end
k=0;
for i=Hcomp(n-1):-5:0;
j=j+1;
k=k+1;
x=Qps(m,n-1,k)+Newt_m('eqn_2',0.5,coefbomba(m,n+1,1),coefbomba(m,n+1,2),c);
Hps(m,n,j)=i;
Qps(m,n,j)=x;
Hpsd(n,j)=i;
Qpsd(n,j)=x;
end

```

```

        end
    end
    comp(m)=j
    figure(1)
    subplot(3,2,6),plot(Qpsd(n,:),Hpsd(n:)),title('Curva Polinómica Bombas Topo 3 en
Paralelo'),xlabel('Q(m3/s)'),ylabel('H(mh2o)')
    hold on
end
end
end
%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% BOMBAS BOOSTER DISTINTAS EN PARALELO TOTAL EN LA SUCCION %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
bomabasbooster2
%
% %%%%%%%%%%%
% PROGRAMA: BOMBEO HIDRÁULICO SISTEMA DE REINYECCIÓN DE AGUA %
% ----- %
% BOMBAS BOOSTER - SUCCIÓN %
% bomabasbooster2.m %
% %%%%%%%%%%%
%
% Bombas distintas,  $Q = Q1 + Q2 / Q1 = Q1 (H) / Q2 = Q2 (H) // Q1 (H) + Q2 (H) = Q$ 
%
% %%%%%%%%%%%
% BOMBAS BOOSTER DISTINTAS EN PARALELO TOTAL EN LA SUCCION %
% %%%%%%%%%%%
%
% Determinamos el punto mas alto en la curva en cada uno de los grupos
% que en este caso es la constante asi tendremos un inicio al sumar Q
% Comparamos
clc
%% Primera Grupo de Bombas tipo 1 con el segundo tipo2
% newton primera y segunda bomba
% Generamos una función para cada grupo de bombas
m=1;
for m=1:ntipos
    clear Qpsuccion1 Hpsuccion1
    j=0
    for i=1:comp(m)
        if Qps(m,nbombas(m)-1,i)>0
            j=j+1
            Qpsuccion1(m,j)=Qps(m,nbombas(m)-1,i)
            Hpsuccion1(m,j)=Hps(m,nbombas(m)-1,i)
        end
    end
end
if m==1
    coefgrupo1=polyfit(Qpsuccion1(m,:),Hpsuccion1(m,:),grado);
elseif m==2

```

```

        coefgrupo2=polyfit(Qpsuccion1(m,:),Hpsuccion1(m,:),grado);
    else
        coefgrupo3=polyfit(Qpsuccion1(m,:),Hpsuccion1(m,:),grado);
    end
end
if coefgrupo1(3)==coefgrupo2(3);
    j=0;
    Hpcomp=coefgrupo1(3)% valor comparativa de mayor altura
    for i=coefgrupo1(3):-5:0;
        j=j+1;
        c=coefgrupo1(3)-i

x=Newt_m('eqn_2',0.5,coefgrupo1(1),coefgrupo1(2),c)+Newt_m('eqn_2',0.5,coefgrupo2(1),coefgrupo2
(2),c);
        H1s(j)=i;
        Q1s(j)=x;
    end
elseif coefgrupo1(3)>coefgrupo2(3);
    j=0;
    Hcomp=coefgrupo1(3)% valor comparativa de mayor altura
    for i=coefgrupo1(3):-5:coefgrupo2(3)+5;
        j=j+1;
        c=coefgrupo1(3)-i
        x=Newt_m('eqn_2',0.5,coefgrupo1(1),coefgrupo1(2),c);
        H1s(j)=i;
        Q1s(j)=x;
    end
    k=0;
    for i=coefgrupo2(3):-5:0;
        j=j+1;
        c1=coefgrupo1(3)-i
        c=coefgrupo2(3)-i

x=Newt_m('eqn_2',0.5,coefgrupo1(1),coefgrupo1(2),c1)+Newt_m('eqn_2',0.5,coefgrupo2(1),coefgrupo
2(2),c);
        H1s(j)=i;
        Q1s(j)=x;
    end
else coefgrupo2(3)>coefgrupo1(3);
    j=0;
    Hcomp=coefgrupo2(3)% valor comparativa de mayor altura
    for i=coefgrupo2(3):-5:coefgrupo1(3)+5;
        j=j+1;
        c=coefgrupo2(3)-i
        x=Newt_m('eqn_2',0.5,coefgrupo2(1),coefgrupo2(2),c);
        H1s(j)=i;
        Q1s(j)=x;
    end
    k=0;
    for i=coefgrupo1(3):-5:0;
        j=j+1;

```



```

c=coefgrupo2(3)-i
c1=coefgrupo1(3)-i

x=Newt_m('eqn_2',0.5,coefgrupo1(1),coefgrupo1(2),c1)+Newt_m('eqn_2',0.5,coefgrupo2(1),coefgrupo
2(2),c);
    H1s(j)=i;
    Q1s(j)=x;
end
end
contador=i
%% Segundo Grupo de Bombas tipo 1 y 2 con el tercero tipo3
if H1s(1)==coefgrupo1(3);
    j=0;
    for i=H1s(1):-5:contador;
        j=j+1;
        c=H1s(1)-i
        x=Q1s(j)+Newt_m('eqn_2',0.5,coefgrupo3(1),coefgrupo3(2),c);
        H2s(j)=i;
        Q2s(j)=x;
    end
elseif H1s(1)>coefgrupo1(3);
    j=0;
    for i=H1s(1):-5:coefgrupo1(3);
        j=j+1;
        c=H1s(1)-i
        x=Q1s(j);
        H2s(j)=i;
        Q2s(j)=x;
    end
    k=H2s(j)-5
    for i=k:-5:0;
        j=j+1;
        c=k-i
        x=Q1s(j)+Newt_m('eqn_2',0.5,coefgrupo3(1),coefgrupo3(2),c);
        H2s(j)=i;
        Q2s(j)=x;
    end
else coefgrupo1(3)>H1s(1);
    j=0;
    for i=coefgrupo3(3):-5:H1s(1)+5;
        j=j+1;
        c=coefgrupo3(3)-i
        x=Newt_m('eqn_2',0.5,coefgrupo3(1),coefgrupo3(2),c);
        H2s(j)=i;
        Q2s(j)=x;
    end
    k=0;
    for i=H1s(1):-5:0;
        j=j+1;
        k=k+1;
        c=coefgrupo3(3)-i

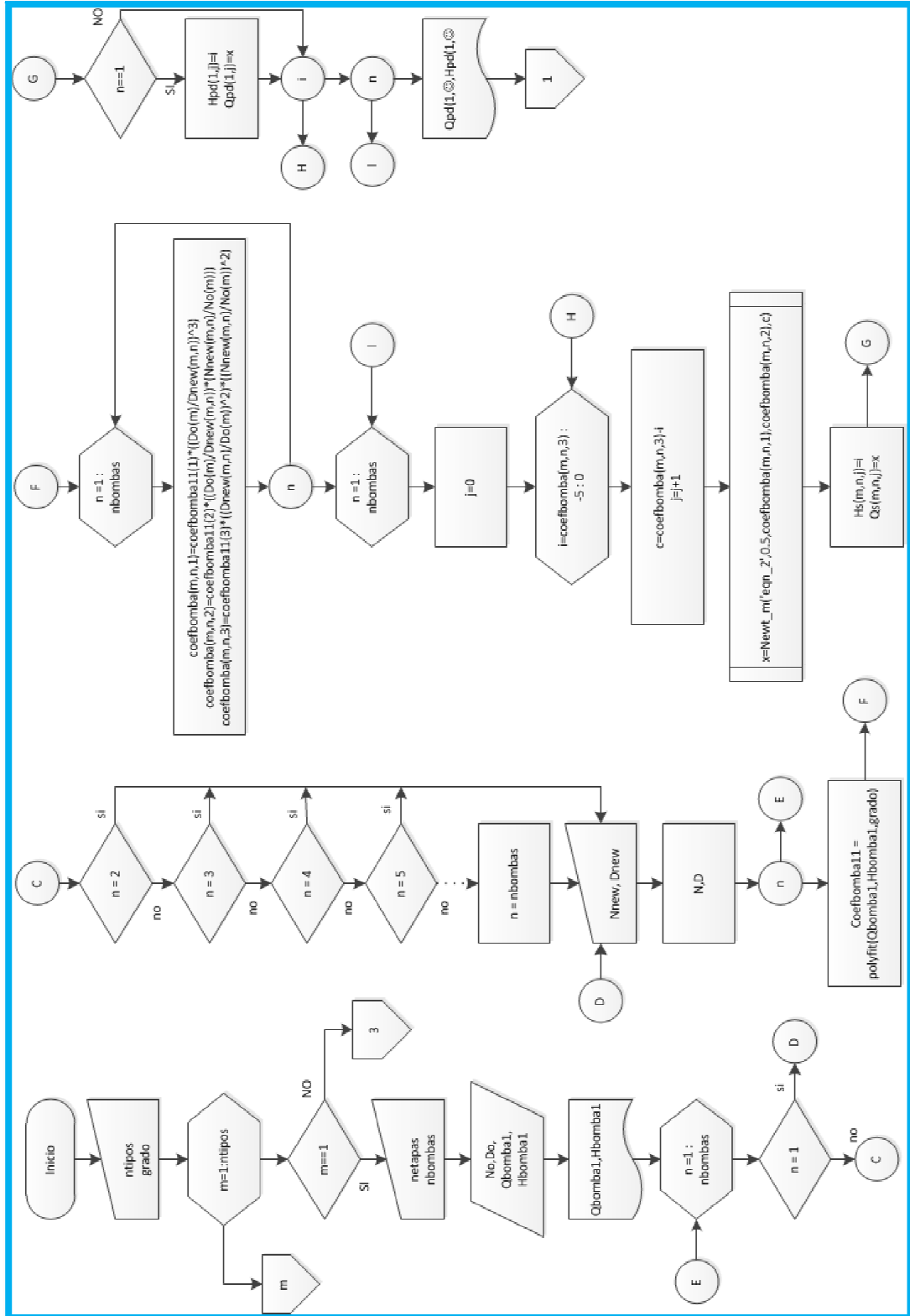
```

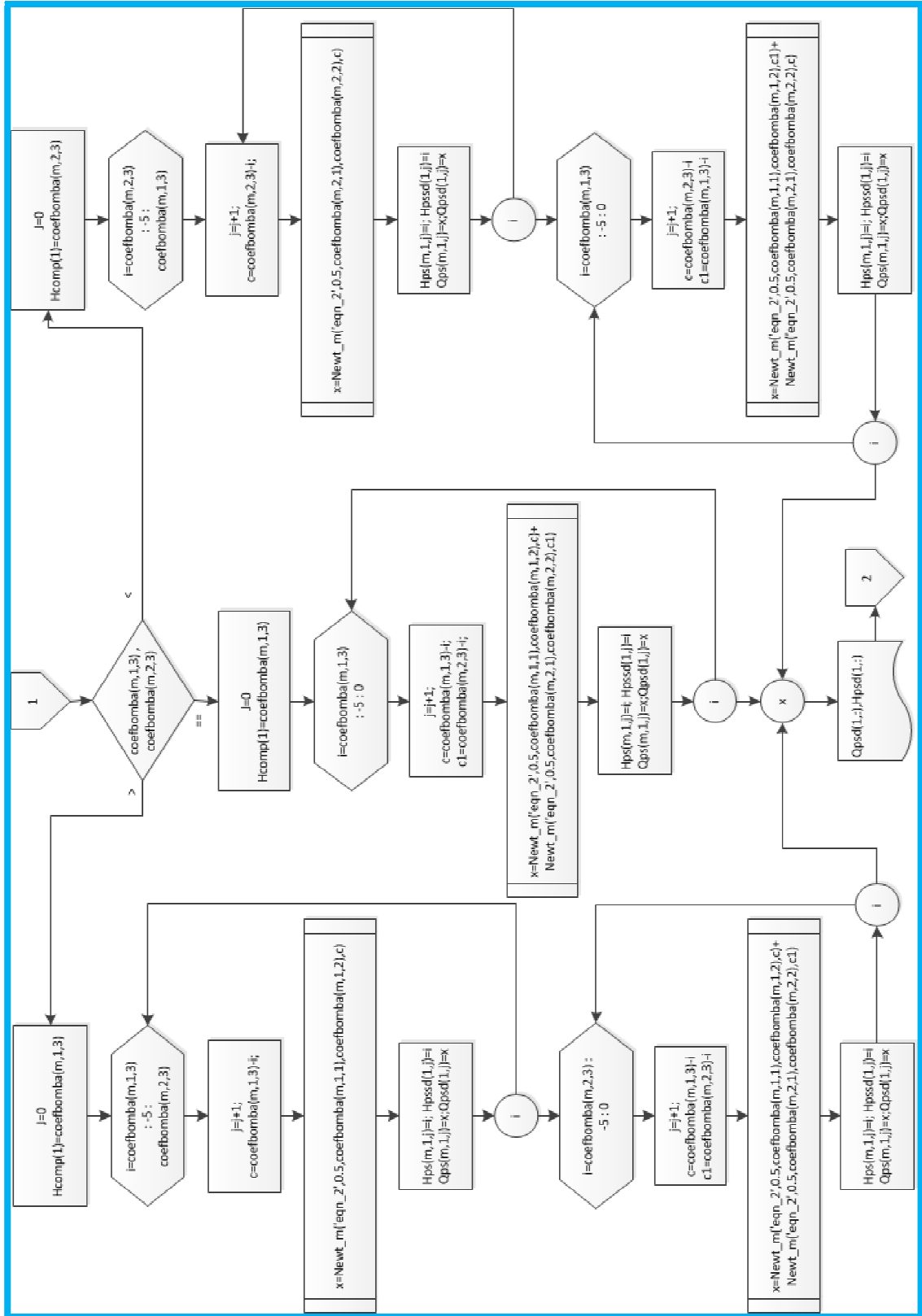
```

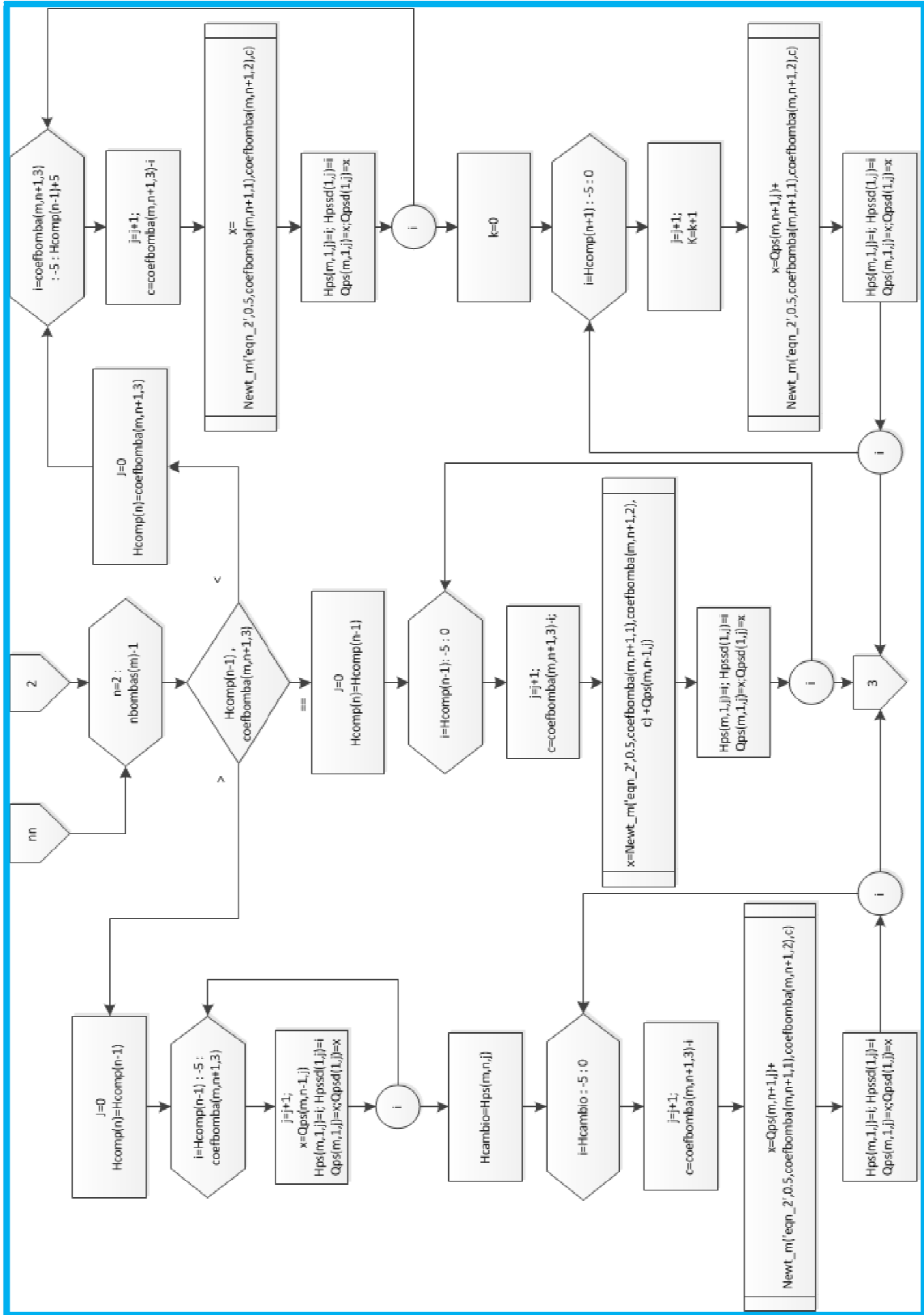
x=Q1s(k)+Newt_m('eqn_2',0.5,coefgrupo3(1),coefgrupo3(2),c)
H2s(j)=i;
Q2s(j)=x;
end
end
figure (2)
subplot(1,2,1),plot(Qpsuccion1(1,:),Hpsuccion1(1,:),Q1s,H1s,Q2s,H2s),title('Curvas Característica
Bombas de Diferente tipo en Paralelo '),xlabel('Q(m3/s)'),ylabel('H(mh2o)');
subplot(1,2,2),plot(Q2s,H2s),title('Curva Característica Resultante Bombas Booster
'),xlabel('Q(m3/s)'),ylabel('H(mh2o)');

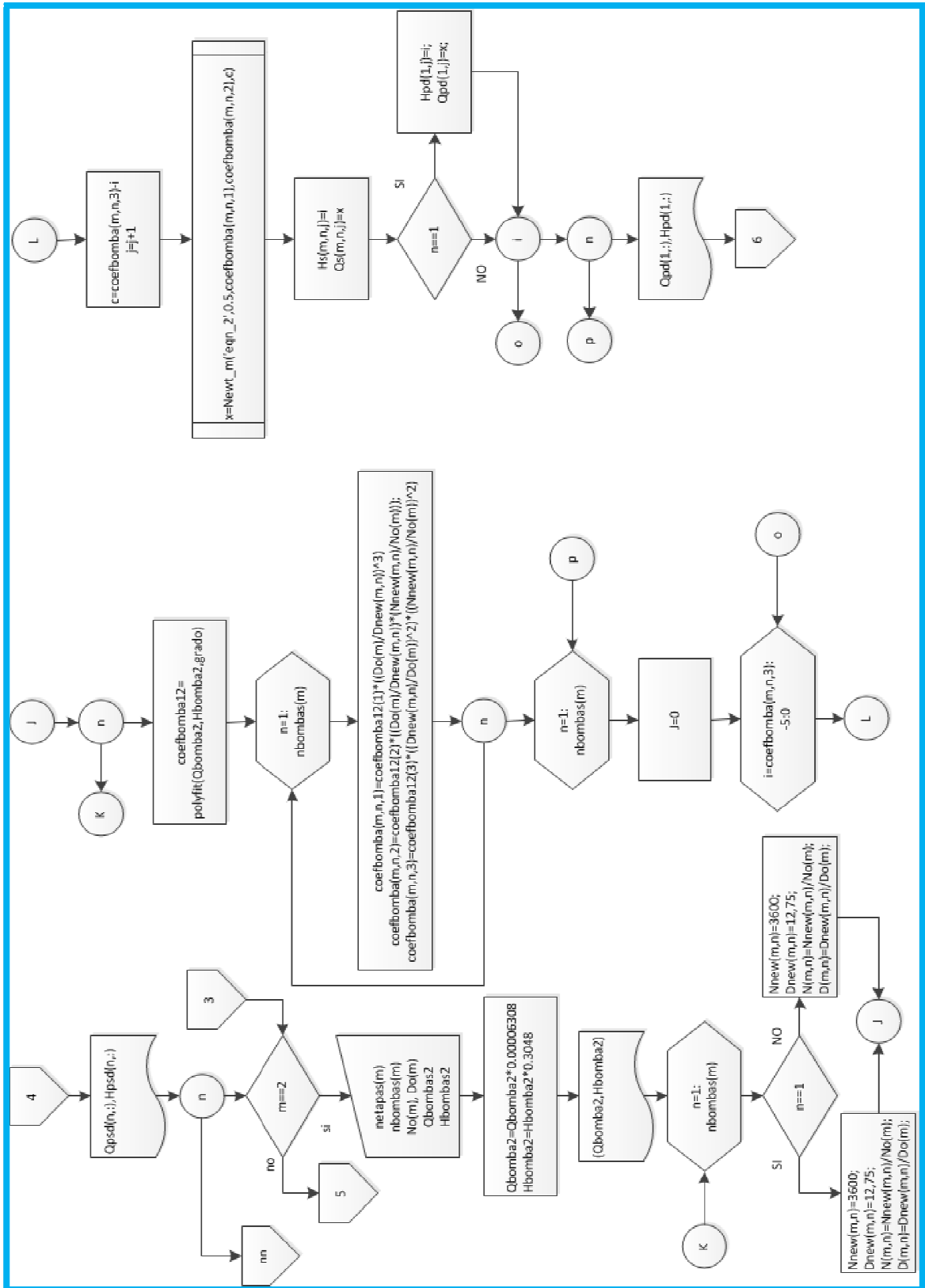
```

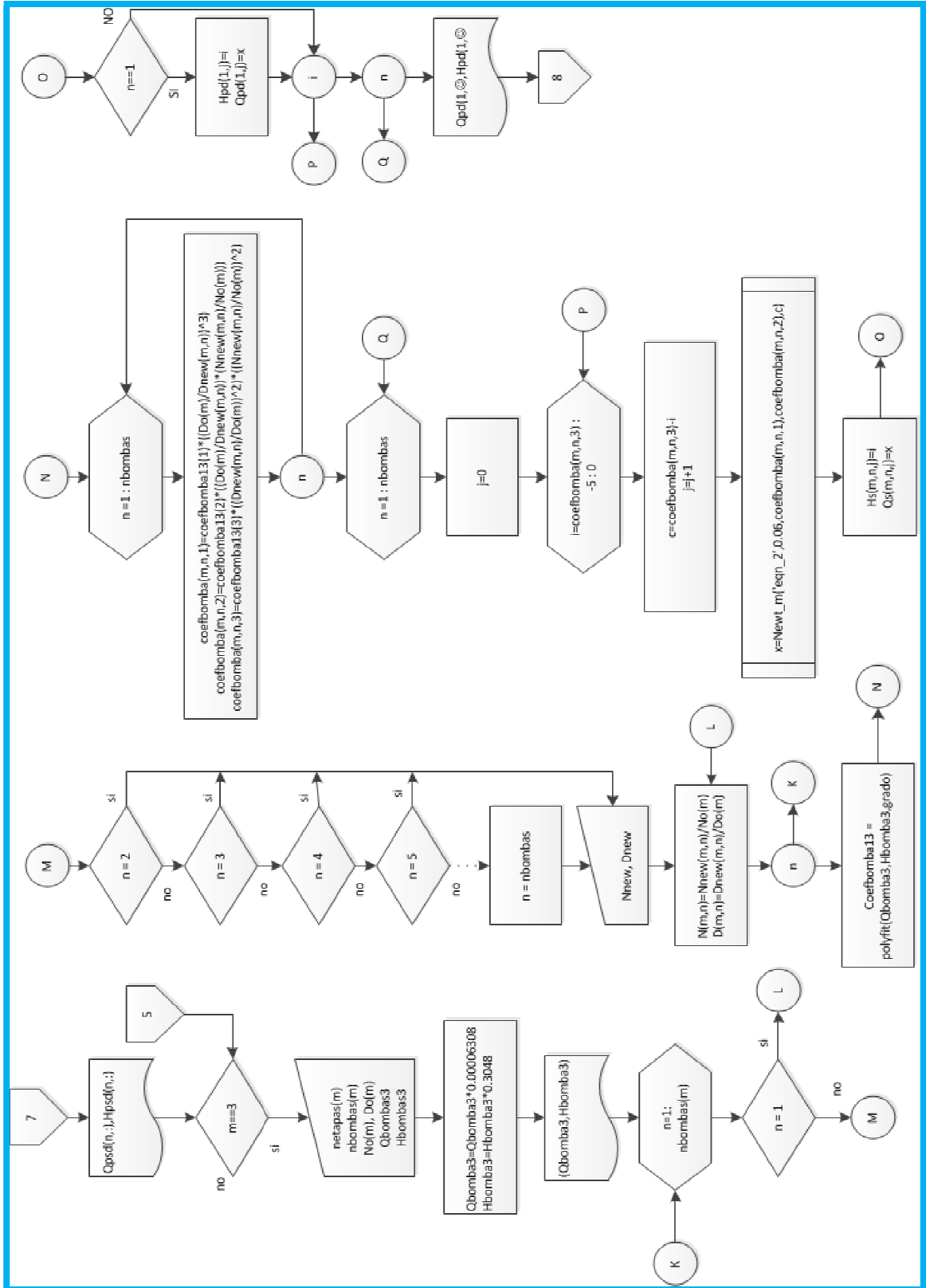
D.2.3. Diagrama de Flujo:

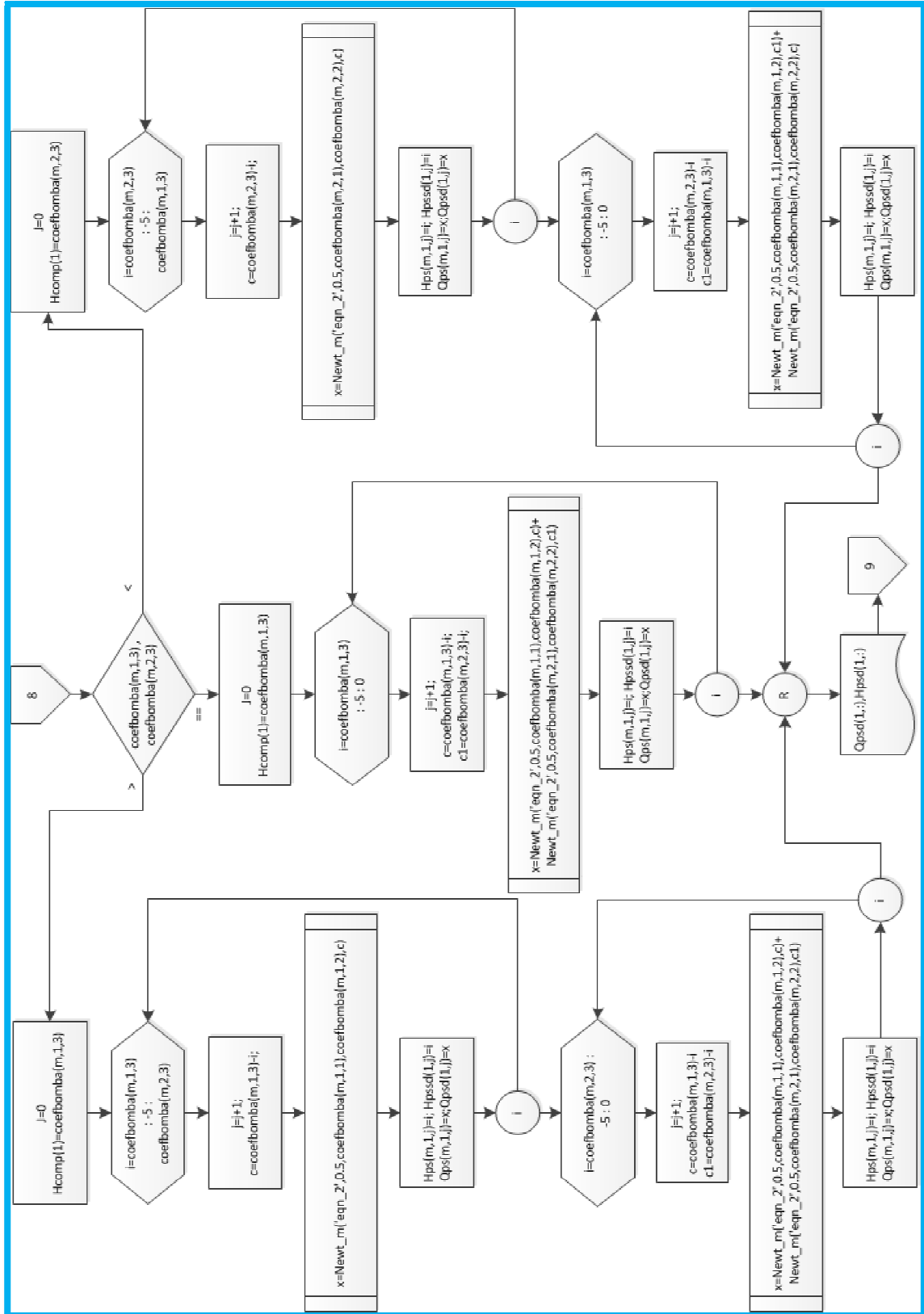


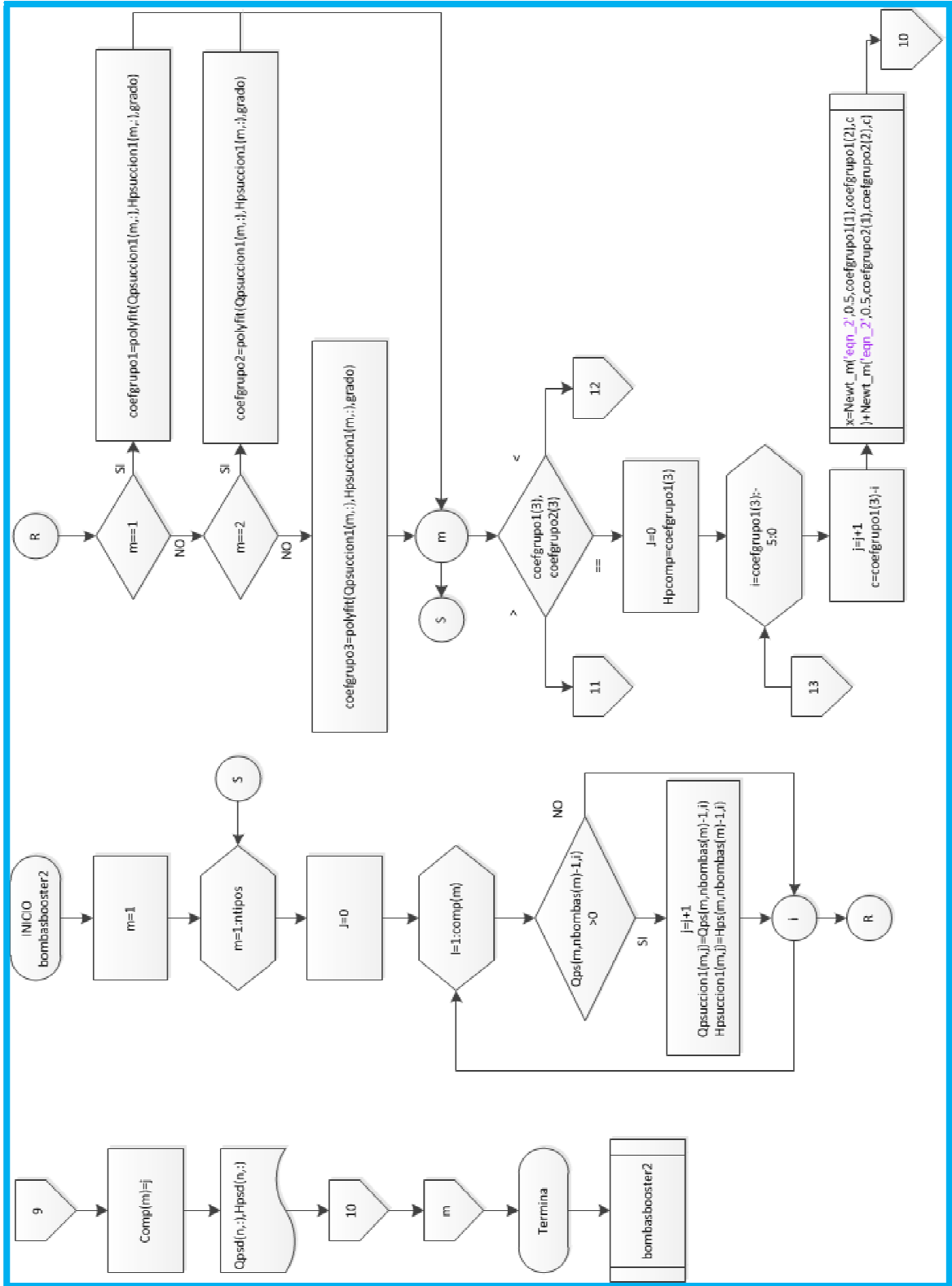


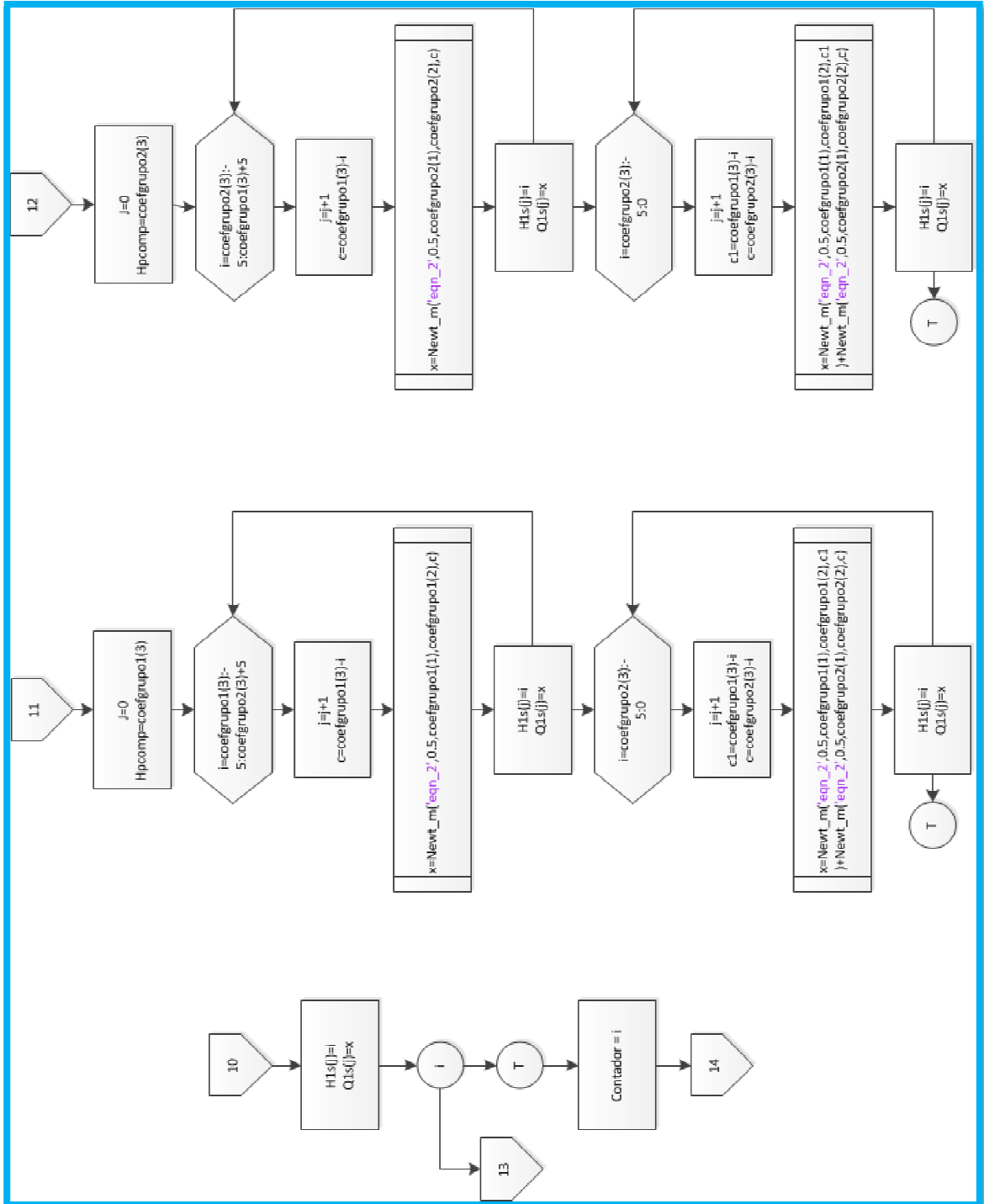


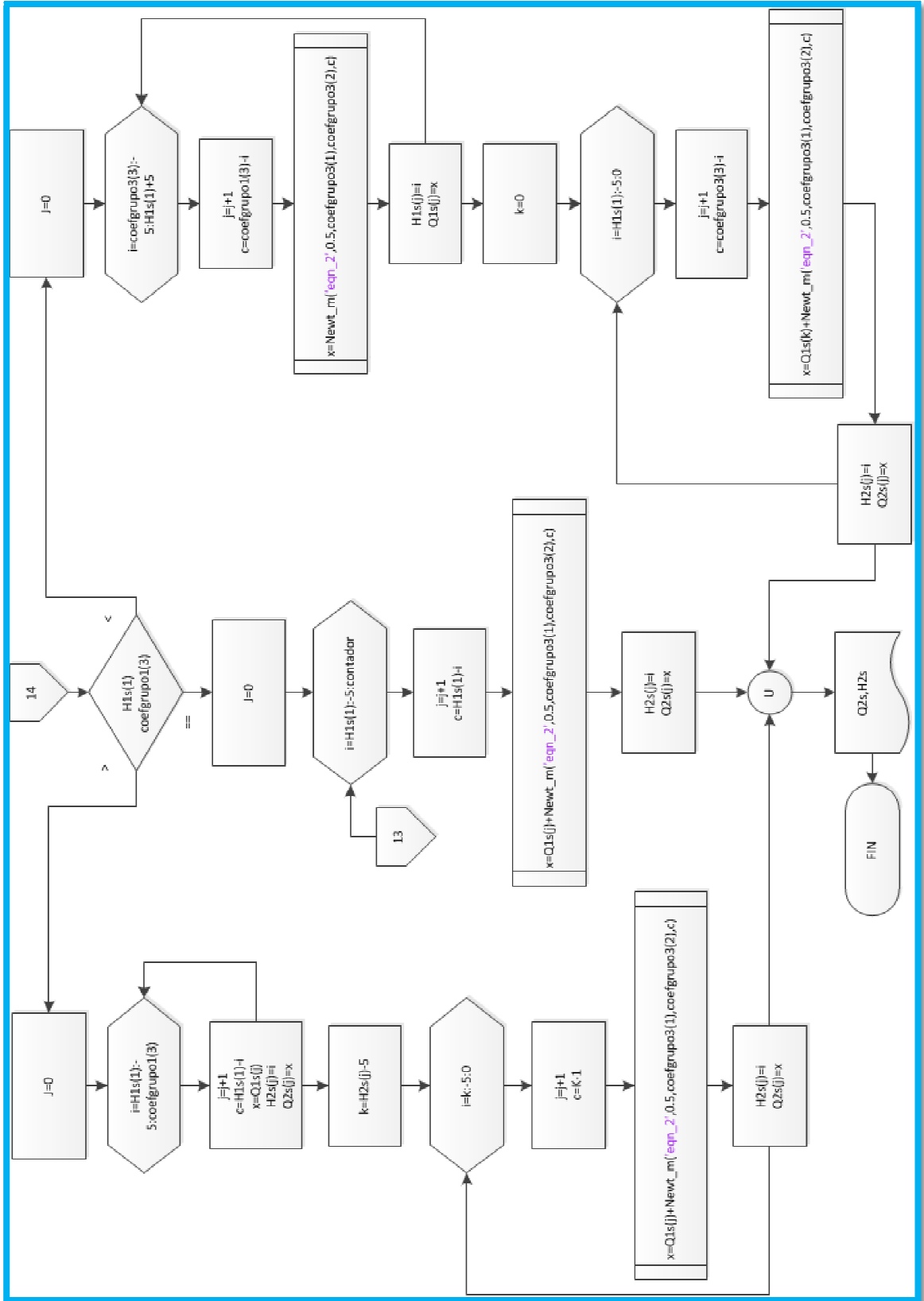












D.3. SISTEMA DE BOMBEO DE ALTA PRESIÓN.

D.3.1. Descripción:

1. ntiposi.- Número de tipos de bombas. Consideramos que en una estación y de acuerdo a las necesidades y posibilidades se pueden instalar diferentes tipos y características de bombas,
2. gradoi.- las Curvas Características seguirán un patrón de comportamiento experimentado y definido por el fabricante, en nuestro caso ajustamos a una curva polinómica de grado 2, con los datos del fabricante y para cada tipo se ingresan sus datos de placa.
3. netapasi1 y netapasi2.- Número de etapas de cada arreglo en serie de cada tipo de bomba,
4. nbombasi1 y nbombasi2.- Número de bombas en paralelo, para cada tipo de bombas se puede generar un arreglo con un número determinado de bombas.
5. Noi1 y Noi2.- velocidad de placa de la bomba en RPM.
6. Nnewi.- RPM para cada arreglo
7. Ni1=(1/Noi1)*Nnewi.- diferencia entre los datos de placa y el trabajo de las bombas.
8. Qbombai1 y Qbombai2.- Caudal de la bomba tomado en par ordenado de la curva característica del fabricante en gpm (galones por minuto).
9. Qbomba1= Qbomba1*0.159/86400.- cambio de unidades de gpm a m³ /s, igual a Qbomba2 y Qbomba3.
10. Hbombai1 y Hbombai2.- presión en pies de H₂O
11. Hbombai1=Hbombai1/3.28 igual para Hbombai2.- cambio de unidades de pies a metros de H₂O, igual a Hbomba2 y Hbomba3.
12. coefbombai=.polyfit(Qbombai1,Hbombai1,gradoi).- Desplegamos los coeficientes del polinomio que ajusta a los datos de la bomba
13. k y j.- son contadores generados para crear nuevos vectores.

- 14.x.- Generamos bucles para calcular determinar la curva con los datos del fabricante o experimentales ajustando a una ecuación de grado 5, con repetidas interacciones que ubica cada punto de la curva por el método de aproximación de Newton Raphson incluido en una subrutina.
- 15.Hi1,Hi2.- alturas encontradas en la interacción
- 16.Qi1,Qi2.- caudales encontrados en aliteración
- 17.Hi1n, Hi2n, Qi1n, Qi2n.- alturas y caudales encontrados en la interacción.
- 18.En la Subrutina Bombas Inyección 2 ponemos en paralelo a todo el grupo de las bombas tipo 1 y las bombas tipo 2.
- 19.Hpi1, Hpi2.- altura de las bombas en paralelo tipo 1 y tipo 2
- 20.Hcompsd.- valor comparativo de mayor altura, para seleccionar el rango de las interacciones.
- 21.H1d, Q1d.- altura y caudal de las bombas en paralelo.

D.3.2. Codificación:

```

%% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% PROGRAMA: BOMBEO HIDRÁULICO SISTEMA DE REINYECCIÓN DE AGUA %
% ----- %
% BOMBAS BOOSTER - DESCARGA %
% BombasInyeccion.m %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%
clc;format short g % limpieza de memoria y pantalla
ntiposi= 2; % Número de tipos de bombas
gradoi=5; % grado de ajuste de las curvas ecuaciones
%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%   DATOS DE BOMBAS   %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Bomba N° 1 % 532 %
% Centrilift HC-27000 %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
netapasil=51; % número de etapas de cada arreglo en serie
nbombasil=nbil; % número de arreglos en paralelo
% Velocidades en RPMs.
Noil=3600; % RPMs de fábrica
Nnewi=[3600 3600 3600 3600 3600 3600 3600 3600 3600 3600]; % RPM para cada
arreglo - se puede variar
Nil=(1/Noil)*Nnewi;% Nil=Nnewil/Noil;

```

```

%GS=1 % gravedad especifica del fluido
Qbombail=[0 5875 11750 17625 23500 24625 25750 26875 28000 29400 30800
32200 33600 36960 38640 40320 42000]; %BLS
Qbombail=Qbombail*0.159/86400; %m3/s
Hbombail=[83 79 78 81 80 79 77 75 73 69 64 58 51 33 23 13 4]; %Pies
BOMBAIL
Hbombail=Hbombail/3.28; %mh2O
Hbombail=Hbombail*netapasil; % Impellers en serie de cada bomba
multiplicamos las etapas por la altura
% coeficientes de la ECUACIÓN DE LA CURVA ORIGINAL tomados de losdatos del
% fabricante
coefbombail=polyfit(Qbombail,Hbombail,gradoi);
% coeficientes para velocidades distintas en cualquier bomba
for j=1:nbombasil
    k=0;
    for i=gradoi+1:-1:1
        k=k+1;
        coefbombail(j,k)=(coefbombail(k))*((Noil/Nnewi(j))^(i-3));
    end
end
figure(3);
subplot(2,2,1),plot(Qbombail,Hbombail),title('Datos del Fabricante bomba
Tipo 1'),xlabel('Q(m3/s)'),ylabel('H(mh2o)')
%% CURVAS DE LAS BOMBAS DE IGUAL TIPO P-532
% Vamo a establecer las curvas de cada bomba pues al ser de quinto grado
% el comportamiento variable puede determinar raices cercanas que haga
% inutil el metodo de Newton
%
% Data para la primera bomba tipo 1
%
k=0;
j=1;
for i=fix(coefbombail(j,gradoi+1)/5)*5:-5:fix(1260*((Noil/Nnewi(j))^-
2)/5)*5;
    f=coefbombail(j,gradoi+1)-i;
    k=k+1;

x=Newt_n('eqn_1',0,coefbombail(j,1),coefbombail(j,2),coefbombail(j,3),coefb
ombail(j,4),coefbombail(j,5),f);
    Hil(j,k)=i;
    Qil(j,k)=x;
    Hill(k)=i;
    Qill(k)=x;
end
for i=fix(1260*((Noil/Nnewi(j))^-2)/5)*5:-5:fix(500*((Noil/Nnewi(j))^-
2)/5)*5;
    f=coefbombail(j,gradoi+1)-i;
    k=k+1;

x=Newt_n('eqn_1',0.05,coefbombail(j,1),coefbombail(j,2),coefbombail(j,3),co
efbombail(j,4),coefbombail(j,5),f);
    Hil(j,k)=i;

```

```

        Qil(j,k)=x;
        Hill(k)=i;
        Qill(k)=x;
    end
    for i=fix(500*((Noil/Nnewi(j))^-2)/5)*5-5:-5:50;
        f=coefbombail(j,gradoi+1)-i;
        k=k+1;

x=Newt_n('eqn_1',0.06,coefbombail(j,1),coefbombail(j,2),coefbombail(j,3),co
efbombail(j,4),coefbombail(j,5),f);
        Hil(j,k)=i;
        Qil(j,k)=x;
        Hill(k)=i;
        Qill(k)=x;
    end
    %
    % Data para la segunda bomba tipo 1
    %
    k=0;
    j=2;
    for i=fix(coefbombail(j,gradoi+1)/5)*5:-5:fix(1260*((Noil/Nnewi(j))^-
2)/5)*5;
        f=coefbombail(j,gradoi+1)-i;
        k=k+1;

x=Newt_n('eqn_1',0,coefbombail(j,1),coefbombail(j,2),coefbombail(j,3),coefb
ombail(j,4),coefbombail(j,5),f);
        Hil(j,k)=i;
        Qil(j,k)=x;
        Hill2(k)=i;
        Qil2(k)=x;
    end
    for i=fix(1260*((Noil/Nnewi(j))^-2)/5)*5-5:-5:fix(500*((Noil/Nnewi(j))^-
2)/5)*5;
        f=coefbombail(j,gradoi+1)-i;
        k=k+1;

x=Newt_n('eqn_1',0.05,coefbombail(j,1),coefbombail(j,2),coefbombail(j,3),co
efbombail(j,4),coefbombail(j,5),f);
        Hil(j,k)=i;
        Qil(j,k)=x;
        Hill2(k)=i;
        Qil2(k)=x;
    end
    for i=fix(500*((Noil/Nnewi(j))^-2)/5)*5-5:-5:50;
        f=coefbombail(j,gradoi+1)-i;
        k=k+1;

x=Newt_n('eqn_1',0.06,coefbombail(j,1),coefbombail(j,2),coefbombail(j,3),co
efbombail(j,4),coefbombail(j,5),f);
        Hil(j,k)=i;
        Qil(j,k)=x;

```

```

        Hi12(k)=i;
        Qi12(k)=x;
    end
    %
    % Data para la tercera bomba tipo 1
    %
    k=0;
    j=3;
    for i=coefbombail(j,gradoi+1):-5:1260.1*((Noil/Nnewi(j))^-2);
        f=coefbombail(j,gradoi+1)-i;
        k=k+1;

    x=Newt_n('eqn_1',0,coefbombail(j,1),coefbombail(j,2),coefbombail(j,3),coefb
ombail(j,4),coefbombail(j,5),f);
        Hi1(j,k)=i;
        Qi1(j,k)=x;
        Hi13(k)=i;
        Qi13(k)=x;
    end
    for i=1260*((Noil/Nnewi(j))^-2):-5:500*((Noil/Nnewi(j))^-2);
        f=coefbombail(j,gradoi+1)-i;
        k=k+1;

    x=Newt_n('eqn_1',0.05,coefbombail(j,1),coefbombail(j,2),coefbombail(j,3),co
efbombail(j,4),coefbombail(j,5),f);
        Hi1(j,k)=i;
        Qi1(j,k)=x;
        Hi13(k)=i;
        Qi13(k)=x;
    end
    for i=495*((Noil/Nnewi(j))^-2):-5:50*((Noil/Nnewi(j))^-2);
        f=coefbombail(j,gradoi+1)-i;
        k=k+1;

    x=Newt_n('eqn_1',0.06,coefbombail(j,1),coefbombail(j,2),coefbombail(j,3),co
efbombail(j,4),coefbombail(j,5),f);
        Hi1(j,k)=i;
        Qi1(j,k)=x;
        Hi13(k)=i;
        Qi13(k)=x;
    end
    %
    %% Desarrollo del paralelo para las bombas
    %Comparamos
    %En paralelo Primera bomba tipo 1 con la segunda
    %Newton
    j=1;
    if coefbombail(j,gradoi+1)==coefbombail(j+1,gradoi+1);
        k=0;
        Hcomp(j)=coefbombail(j,gradoi+1);% valor comparativo de mayor altura
        for i=fix(coefbombail(j,gradoi+1)/5)*5:-5:fix(1260*((Noil/Nnewi(j))^-
2)/5)*5;

```

```

        f=coefbombail(j+1,gradoi+1)-i;
        k=k+1;

x=Qil(j,k)+Newt_n('eqn_1',0,coefbombail(j+1,1),coefbombail(j+1,2),coefbomba
il(j+1,3),coefbombail(j+1,4),coefbombail(j+1,5),f);
        Hpil(j,k)=i;
        Qpil(j,k)=x;
    end
    for i=fix(1260*((Noil/Nnewi(j))^-2)/5)*5-5:-
5:fix(500*((Noil/Nnewi(j))^-2)/5)*5;
        f=coefbombail(j+1,gradoi+1)-i;
        k=k+1;

x=Qil(j,k)+Newt_n('eqn_1',0.05,coefbombail(j+1,1),coefbombail(j+1,2),coefbo
mbail(j+1,3),coefbombail(j+1,4),coefbombail(j+1,5),f);
        Hpil(j,k)=i;
        Qpil(j,k)=x;
    end
    for i=fix(500*((Noil/Nnewi(j))^-2)/5)*5-5:-5:50;
        f=coefbombail(j+1,gradoi+1)-i;
        k=k+1;

x=Qil(j,k)+Newt_n('eqn_1',0.06,coefbombail(j+1,1),coefbombail(j+1,2),coefbo
mbail(j+1,3),coefbombail(j+1,4),coefbombail(j+1,5),f);
        Hpil(j,k)=i;
        Qpil(j,k)=x;
    end
elseif coefbombail(j,gradoi+1)>coefbombail(j+1,gradoi+1);
    k=0;
    Hcomp(j)=coefbombail(j,gradoi+1);% valor comparativo de mayor altura
    for i=fix(coefbombail(j,gradoi+1)/5)*5:-
5:fix(coefbombail(j+1,gradoi+1)/5)*5;
        k=k+1;
        x=Qil(j,k);
        Hpil(j,k)=i;
        Qpil(j,k)=x;
    end
    l=0;
    for i=fix(coefbombail(j+1,gradoi+1)/5)*5-5:-
5:fix(1260*((Noil/Nnewi(j+1))^-2)/5)*5;
        f=coefbombail(j+1,gradoi+1)-i;
        k=k+1;

x=Qil(j,k)+Newt_n('eqn_1',0,coefbombail(j+1,1),coefbombail(j+1,2),coefbomba
il(j+1,3),coefbombail(j+1,4),coefbombail(j+1,5),f);
        Hpil(j,k)=i;
        Qpil(j,k)=x;
    end
    for i=fix(1260*((Noil/Nnewi(j+1))^-2)/5)*5-5:-
5:fix(500*((Noil/Nnewi(j+1))^-2)/5)*5;
        f=coefbombail(j+1,gradoi+1)-i;
        k=k+1;

```

```

x=Qil(j,k)+Newt_n('eqn_1',0.05,coefbombail(j+1,1),coefbombail(j+1,2),coefbo
mbail(j+1,3),coefbombail(j+1,4),coefbombail(j+1,5),f);
    Hpil(j,k)=i;
    Qpil(j,k)=x;
end
for i=fix(500*((Noil/Nnewi(j+1))^2)/5)*5-5:-5:50;
    f=coefbombail(j+1,gradoi+1)-i;
    k=k+1;

x=Qil(j,k)+Newt_n('eqn_1',0.06,coefbombail(j+1,1),coefbombail(j+1,2),coefbo
mbail(j+1,3),coefbombail(j+1,4),coefbombail(j+1,5),f);
    Hpil(j,k)=i;
    Qpil(j,k)=x;
end
else coefbombail(j+1,gradoi+1)>coefbombail(j,gradoi+1);
    k=0;
    Hcomp(j)=coefbombail(j+1,gradoi+1);% valor comparativo de mayor altura
    for i=fix(coefbombail(j+1,gradoi+1)/5)*5:-
5:fix(coefbombail(j,gradoi+1)/5)*5;
        k=k+1;
        x=Qil(j+1,k);
        Hpil(j,k)=i;
        Qpil(j,k)=x;
    end
    l=0;
    for i=fix(coefbombail(j,gradoi+1)/5)*5-5:-5:fix(1260*((Noil/Nnewi(j))^2)/5)*5;
        f=coefbombail(j,gradoi+1)-i;
        k=k+1;

x=Qil(j+1,k)+Newt_n('eqn_1',0,coefbombail(j,1),coefbombail(j,2),coefbombail
(j,3),coefbombail(j,4),coefbombail(j,5),f);
    Hpil(j,k)=i;
    Qpil(j,k)=x;
end
for i=fix(1260*((Noil/Nnewi(j))^2)/5)*5-5:-
5:fix(500*((Noil/Nnewi(j))^2)/5)*5;
    f=coefbombail(j,gradoi+1)-i;
    k=k+1;

x=Qil(j+1,k)+Newt_n('eqn_1',0.05,coefbombail(j,1),coefbombail(j,2),coefbomb
ail(j,3),coefbombail(j,4),coefbombail(j,5),f);
    Hpil(j,k)=i;
    Qpil(j,k)=x;
end
for i=fix(500*((Noil/Nnewi(j))^2)/5)*5-5:-5:50;
    f=coefbombail(j,gradoi+1)-i;
    k=k+1;

x=Qil(j+1,k)+Newt_n('eqn_1',0.06,coefbombail(j,1),coefbombail(j,2),coefbomb
ail(j,3),coefbombail(j,4),coefbombail(j,5),f);

```

```

        Hpil(j,k)=i;
        Qpil(j,k)=x;
    end
end
%
%% Subrutina para la suma de las demás bombas en paralelo
%
for j=2:nbombasil-1
    if Hcomp(j-1)==coefbombail(j+1,gradoi+1);
        k=0;
        Hcomp(j)=coefbombail(j+1,gradoi+1);% valor comparativo de mayor
altura
        for i=fix(Hcomp(j-1)/5)*5:-5:fix(1260*((Noil/Nnewi(j+1))^-2)/5)*5;
            f=coefbombail(j+1,gradoi+1)-i;
            k=k+1;
            x=Qpil(j-
1,k)+Newt_n('eqn_1',0,coefbombail(j+1,1),coefbombail(j+1,2),coefbombail(j+1
,3),coefbombail(j+1,4),coefbombail(j+1,5),f);
            Hpil(j,k)=i;
            Qpil(j,k)=x;
        end
        for i=fix(1260*((Noil/Nnewi(j+1))^-2)/5)*5-5:-
5:fix(500*((Noil/Nnewi(j+1))^-2)/5)*5;
            f=coefbombail(j+1,gradoi+1)-i;
            k=k+1;
            x=Qpil(j-
1,k)+Newt_n('eqn_1',0.05,coefbombail(j+1,1),coefbombail(j+1,2),coefbombail(
j+1,3),coefbombail(j+1,4),coefbombail(j+1,5),f);
            Hpil(j,k)=i;
            Qpil(j,k)=x;
        end
        for i=fix(500*((Noil/Nnewi(j+1))^-2)/5)*5-5:-5:50;
            f=coefbombail(j+1,gradoi+1)-i;
            k=k+1;
            x=Qpil(j-
1,k)+Newt_n('eqn_1',0.06,coefbombail(j+1,1),coefbombail(j+1,2),coefbombail(
j+1,3),coefbombail(j+1,4),coefbombail(j+1,5),f);
            Hpil(j,k)=i;
            Qpil(j,k)=x;
        end
    elseif Hcomp(j-1)>coefbombail(j+1,gradoi+1);
        k=0;
        Hcomp(j)=Hcomp(j-1);% valor comparativo de mayor altura
        for i=fix(Hcomp(j-1)/5)*5:-5:fix(coefbombail(j+1,gradoi+1)/5)*5;
            k=k+1;
            x=Qpil(j-1,k);
            Hpil(j,k)=i;
            Qpil(j,k)=x;
        end
    end
    l=0;
    for i=fix(coefbombail(j+1,gradoi+1)/5)*5-5:-
5:fix(1260*((Noil/Nnewi(j+1))^-2)/5)*5;

```

```

        f=coefbombail(j+1,gradoi+1)-i;
        k=k+1;
        x=Qpil(j-
1,k)+Newt_n('eqn_1',0,coefbombail(j+1,1),coefbombail(j+1,2),coefbombail(j+1
,3),coefbombail(j+1,4),coefbombail(j+1,5),f);
        Hpil(j,k)=i;
        Qpil(j,k)=x;
    end
    for i=fix(1260*((Noil/Nnewi(j+1))^2)/5)*5-5:-
5:fix(500*((Noil/Nnewi(j+1))^2)/5)*5;
        f=coefbombail(j+1,gradoi+1)-i;
        k=k+1;
        x=Qpil(j-
1,k)+Newt_n('eqn_1',0.05,coefbombail(j+1,1),coefbombail(j+1,2),coefbombail(
j+1,3),coefbombail(j+1,4),coefbombail(j+1,5),f);
        Hpil(j,k)=i;
        Qpil(j,k)=x;
    end
    for i=fix(500*((Noil/Nnewi(j+1))^2)/5)*5-5:-5:50;
        f=coefbombail(j+1,gradoi+1)-i;
        k=k+1;
        x=Qpil(j-
1,k)+Newt_n('eqn_1',0.06,coefbombail(j+1,1),coefbombail(j+1,2),coefbombail(
j+1,3),coefbombail(j+1,4),coefbombail(j+1,5),f);
        Hpil(j,k)=i;
        Qpil(j,k)=x;
    end
    else coefbombail(j+1,gradoi+1)>Hcomp(j-1);
        k=0;
        Hcomp(j)=coefbombail(j+1,gradoi+1);% valor comparativo de mayor
altura
        for i=fix(coefbombail(j+1,gradoi+1)/5)*5:-5:fix(Hcomp(j-1)/5)*5+5;
            f=coefbombail(j+1,gradoi+1)-i;
            k=k+1;

x=Newt_n('eqn_1',0,coefbombail(j+1,1),coefbombail(j+1,2),coefbombail(j+1,3)
,coefbombail(j+1,4),coefbombail(j+1,5),f);
            Hpil(j,k)=i;
            Qpil(j,k)=x;
        end
        l=0;
        for i=fix(Hcomp(j-1)/5)*5:-5:fix(1260*((Noil/Nnewi(j-1))^2
)/5)*5+5;
            f=coefbombail(j+1,gradoi+1)-i;
            k=k+1;
            x=Qpil(j-
1,k)+Newt_n('eqn_1',0,coefbombail(j+1,1),coefbombail(j+1,2),coefbombail(j+1
,3),coefbombail(j+1,4),coefbombail(j+1,5),f);
            Hpil(j,k)=i;
            Qpil(j,k)=x;
        end
    end
end

```



```

        for i=fix(1260*((Noil/Nnewi(j-1))^-2)/5)*5:-
5:fix(500*((Noil/Nnewi(j-1))^-2)/5)*5+5;
            f=coefbombail(j+1,gradoi+1)-i;
            k=k+1;
            x=Qpil(j-
1,k)+Newt_n('eqn_1',0.05,coefbombail(j+1,1),coefbombail(j+1,2),coefbombail(
j+1,3),coefbombail(j+1,4),coefbombail(j+1,5),f);
            Hpil(j,k)=i;
            Qpil(j,k)=x;
        end
        for i=fix(500*((Noil/Nnewi(j-1))^-2)/5)*5:-5:50;
            f=coefbombail(j+1,gradoi+1)-i;
            k=k+1;
            x=Qpil(j-
1,k)+Newt_n('eqn_1',0.06,coefbombail(j+1,1),coefbombail(j+1,2),coefbombail(
j+1,3),coefbombail(j+1,4),coefbombail(j+1,5),f);
            Hpil(j,k)=i;
            Qpil(j,k)=x;
        end
    end
end
%
% Subrutina para el gráfico
%
figure(3);
subplot(2,2,2),plot(Qi11,Hil1),title('Datos del Fabricante bomba Tipo
1'),xlabel('Q(m3/s)'),ylabel('H(mh2o)');
hold on
for i=1:nbombasil-1
    subplot(2,2,2), plot(Qpil(i,:),Hpil(i,:))
    hold on
end
%
%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Bomba N° 2 % 531 %
% Centrilift HC-19000 %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
netapasi2= 57; % número de etapas de cada arreglo en serie
nbombasi2=4; % número de arreglos en paralelo
% Velocidades en RPMs.
Noi2=3600; % RPMs de fábrica
Nnewi2=[3600 3600 3600 3600]; % RPM para cada arreglo - se puede variar
Ni2=(1/Noi2)*Nnewi2;% Nil=Nnewi1/Noi1;
%GS=1 % gravedad especifica del fluido
Qbombai2=[0 3000 6000 9000 12000 13850 15700 17550 19400 20675 21950 23225
24500 26950 28175]; %BLS
Qbombai2=Qbombai2*0.159/86400; %m3/s
Hbombai2=[109 102 93 86 80 77 74 70 66 62 57 50 42 21 7]; %Pies
Hbombai2=Hbombai2/3.28; %mh2O

```

```

Hbombai2=Hbombai2*netapasi2; % Impelers en serie de cada bomba
multiplicamos las etapas por la altura
% coeficientes de la ECUACIÓN DE LA CURVA ORIGINAL tomados de losdatos del
% fabricante
coefbombaii=polyfit(Qbombai2,Hbombai2,gradoi);
% coeficientes para velocidades distintas en cualquier bomba
for j=1:nbombasi2
    k=0;
    for i=gradoi+1:-1:1
        k=k+1;
        coefbombai2(j,k)=(coefbombaii(k))*((Noi2/Nnewi2(j))^(i-3));
    end
end
figure(3);
subplot(2,2,3),plot(Qbombai2,Hbombai2),title('Datos del Fabricante bomba
Tipo 2'),xlabel('Q(m3/s)'),ylabel('H(mh2o)');
%% CRVAS DE LAS BOMBAS DE IGUAL TIPO P-531
% Vamo a establecer las curvas de cada bomba pues al ser de quinto grado
% el comportamiento variable puede dterminar raices cercanas que haga
% inutil el metodo de Newton
%
% Data para la primera bomba tipo 2
%
k=0;
j=1;
for i=fix(coefbombai2(j,gradoi+1)/5)*5:-5:fix(1260*((Noi2/Nnewi2(j))^(-
2)/5)*5;
    f=coefbombai2(j,gradoi+1)-i;
    k=k+1;

x=Newt_n('eqn_1',0,coefbombai2(j,1),coefbombai2(j,2),coefbombai2(j,3),coefb
ombai2(j,4),coefbombai2(j,5),f);
    Hi2(j,k)=i;
    Qi2(j,k)=x;
    Hi21(k)=i;
    Qi21(k)=x;
end
for i=fix(1260*((Noi2/Nnewi2(j))^(-2)/5)*5-5:-5:fix(500*((Noi2/Nnewi2(j))^(-
2)/5)*5;
    f=coefbombai2(j,gradoi+1)-i;
    k=k+1;

x=Newt_n('eqn_1',0.05,coefbombai2(j,1),coefbombai2(j,2),coefbombai2(j,3),co
efbombai2(j,4),coefbombai2(j,5),f);
    Hi2(j,k)=i;
    Qi2(j,k)=x;
    Hi21(k)=i;
    Qi21(k)=x;
end
for i=fix(500*((Noi2/Nnewi2(j))^(-2)/5)*5-5:-5:50;
    f=coefbombai2(j,gradoi+1)-i;
    k=k+1;

```

```

x=Newt_n('eqn_1',0.06,coefbombai2(j,1),coefbombai2(j,2),coefbombai2(j,3),co
efbombai2(j,4),coefbombai2(j,5),f);
    Hi2(j,k)=i;
    Qi2(j,k)=x;
    Hi21(k)=i;
    Qi21(k)=x;
end
%
% Data para la segunda bomba tipo 2
%
k=0;
j=2;
for i=fix(coefbombai2(j,gradoi+1)/5)*5:-5:fix(1260*((Noi2/Nnewi2(j))^
2)/5)*5;
    f=coefbombai2(j,gradoi+1)-i;
    k=k+1;

x=Newt_n('eqn_1',0,coefbombai2(j,1),coefbombai2(j,2),coefbombai2(j,3),coefb
ombai2(j,4),coefbombai2(j,5),f);
    Hi2(j,k)=i;
    Qi2(j,k)=x;
    Hi22(k)=i;
    Qi22(k)=x;
end
for i=fix(1260*((Noi2/Nnewi2(j))^-2)/5)*5-5:-5:fix(500*((Noi2/Nnewi2(j))^
2)/5)*5;
    f=coefbombai2(j,gradoi+1)-i;
    k=k+1;

x=Newt_n('eqn_1',0.05,coefbombai2(j,1),coefbombai2(j,2),coefbombai2(j,3),co
efbombai2(j,4),coefbombai2(j,5),f);
    Hi2(j,k)=i;
    Qi2(j,k)=x;
    Hi22(k)=i;
    Qi22(k)=x;
end
for i=fix(500*((Noi2/Nnewi2(j))^-2)/5)*5-5:-5:50;
    f=coefbombai2(j,gradoi+1)-i;
    k=k+1;

x=Newt_n('eqn_1',0.06,coefbombai2(j,1),coefbombai2(j,2),coefbombai2(j,3),co
efbombai2(j,4),coefbombai2(j,5),f);
    Hi2(j,k)=i;
    Qi2(j,k)=x;
    Hi22(k)=i;
    Qi22(k)=x;
end
%
% Data para la tercera bomba tipo 2
%
k=0;

```

```

j=3;
for i=coefbombai2(j,gradoi+1):-5:1260.1*((Noi2/Nnewi2(j))^(-2));
    f=coefbombai2(j,gradoi+1)-i;
    k=k+1;

x=Newt_n('eqn_1',0,coefbombai2(j,1),coefbombai2(j,2),coefbombai2(j,3),coefb
ombai2(j,4),coefbombai2(j,5),f);
    Hi2(j,k)=i;
    Qi2(j,k)=x;
    Hi23(k)=i;
    Qi23(k)=x;
end
for i=1260*((Noi2/Nnewi2(j))^(-2):-5:500*((Noi2/Nnewi2(j))^(-2));
    f=coefbombai2(j,gradoi+1)-i;
    k=k+1;

x=Newt_n('eqn_1',0.05,coefbombai2(j,1),coefbombai2(j,2),coefbombai2(j,3),co
efbombai2(j,4),coefbombai2(j,5),f);
    Hi2(j,k)=i;
    Qi2(j,k)=x;
    Hi23(k)=i;
    Qi23(k)=x;
end
for i=495*((Noi2/Nnewi2(j))^(-2):-5:50*((Noi2/Nnewi2(j))^(-2));
    f=coefbombai2(j,gradoi+1)-i;
    k=k+1;

x=Newt_n('eqn_1',0.06,coefbombai2(j,1),coefbombai2(j,2),coefbombai2(j,3),co
efbombai2(j,4),coefbombai2(j,5),f);
    Hi2(j,k)=i;
    Qi2(j,k)=x;
    Hi23(k)=i;
    Qi23(k)=x;
end
%
%% Desarrollo del paralelo para las bombas
%Comparamos
%En paralelo Primera bomba tipo 2 con la segunda
%Newton
j=1;
if coefbombai2(j,gradoi+1)==coefbombai2(j+1,gradoi+1);
    k=0;
    Hcomp2(j)=coefbombai2(j,gradoi+1);% valor comparativo de mayor altura
    for i=fix(coefbombai2(j,gradoi+1)/5)*5:-5:50;
        f=coefbombai2(j+1,gradoi+1)-i;
        k=k+1;

x=Qi2(j,k)+Newt_n('eqn_1',0,coefbombai2(j+1,1),coefbombai2(j+1,2),coefbomba
i2(j+1,3),coefbombai2(j+1,4),coefbombai2(j+1,5),f);
        Hpi2(j,k)=i;
        Qpi2(j,k)=x;
    end
end

```

```

elseif coefbombai2(j,gradoi+1)>coefbombai2(j+1,gradoi+1);
    k=0;
    Hcomp2(j)=coefbombai2(j,gradoi+1);% valor comparativo de mayor altura
    for i=fix(coefbombai2(j,gradoi+1)/5)*5:-
5:fix(coefbombai2(j+1,gradoi+1)/5)*5+5;
        k=k+1;
        x=Qi2(j,k);
        Hpi2(j,k)=i;
        Qpi2(j,k)=x;
    end
    l=0;
    for i=fix(coefbombai2(j+1,gradoi+1)/5)*5:-5:50;
        f=coefbombai2(j+1,gradoi+1)-i;
        k=k+1;

x=Qi2(j,k)+Newt_n('eqn_1',0,coefbombai2(j+1,1),coefbombai2(j+1,2),coefbomba
i2(j+1,3),coefbombai2(j+1,4),coefbombai2(j+1,5),f);
        Hpi2(j,k)=i;
        Qpi2(j,k)=x;
    end
else coefbombai2(j+1,gradoi+1)>coefbombai2(j,gradoi+1);
    k=0;
    Hcomp2(j)=coefbombai2(j+1,gradoi+1);% valor comparativo de mayor altura
    for i=fix(coefbombai2(j+1,gradoi+1)/5)*5:-
5:fix(coefbombai2(j,gradoi+1)/5)*5+5;
        k=k+1;
        x=Qi2(j+1,k);
        Hpi2(j,k)=i;
        Qpi2(j,k)=x;
    end
    l=0;
    for i=fix(coefbombai2(j,gradoi+1)/5)*5:-5:50;
        f=coefbombai2(j,gradoi+1)-i;
        k=k+1;

x=Qi2(j+1,k)+Newt_n('eqn_1',0,coefbombai2(j,1),coefbombai2(j,2),coefbombai2
(j,3),coefbombai2(j,4),coefbombai2(j,5),f);
        Hpi2(j,k)=i;
        Qpi2(j,k)=x;
    end
end
%
%% Subrutina para la suma de las demás bombas en paralelo
%
for j=2:nbombasi2-1
    if Hcomp2(j-1)==coefbombai2(j+1,gradoi+1);
        k=0;
        Hcomp2(j)=coefbombai2(j+1,gradoi+1);% valor comparativo de mayor
altura
        for i=fix(Hcomp2(j-1)/5)*5:-5:50;
            f=coefbombai2(j+1,gradoi+1)-i;
            k=k+1;

```

```

        x=Qpi2(j-
1,k)+Newt_n('eqn_1',0,coefbombai2(j+1,1),coefbombai2(j+1,2),coefbombai2(j+1
,3),coefbombai2(j+1,4),coefbombai2(j+1,5),f);
        Hpi2(j,k)=i;
        Qpi2(j,k)=x;
    end
elseif Hcomp2(j-1)>coefbombai2(j+1,gradoi+1);
    k=0;
    Hcomp2(j)=Hcomp2(j-1);% valor comparativo de mayor altura
    for i=fix(Hcomp2(j-1)/5)*5:-5:fix(coefbombai2(j+1,gradoi+1)/5)*5;
        k=k+1;
        x=Qpi2(j-1,k);
        Hpi2(j,k)=i;
        Qpi2(j,k)=x;
    end
    l=0;
    for i=fix(coefbombai2(j+1,gradoi+1)/5)*5:-5:-5:50;
        f=coefbombai2(j+1,gradoi+1)-i;
        k=k+1;
        x=Qpi2(j-
1,k)+Newt_n('eqn_1',0,coefbombai2(j+1,1),coefbombai2(j+1,2),coefbombai2(j+1
,3),coefbombai2(j+1,4),coefbombai2(j+1,5),f);
        Hpi2(j,k)=i;
        Qpi2(j,k)=x;
    end
else coefbombai2(j+1,gradoi+1)>Hcomp(j-1);
    k=0;
    Hcomp2(j)=coefbombai2(j+1,gradoi+1);% valor comparativo de mayor
altura
    for i=fix(coefbombai2(j+1,gradoi+1)/5)*5:-5:fix(Hcomp2(j-1)/5)*5+5;
        f=coefbombai2(j+1,gradoi+1)-i;
        k=k+1;

x=Newt_n('eqn_1',0,coefbombai2(j+1,1),coefbombai2(j+1,2),coefbombai2(j+1,3)
,coefbombai2(j+1,4),coefbombai2(j+1,5),f);
        Hpi2(j,k)=i;
        Qpi2(j,k)=x;
    end
    l=0;
    for i=fix(Hcomp2(j-1)/5)*5:-5:50;
        f=coefbombai2(j+1,gradoi+1)-i;
        k=k+1;
        l=l+1;
        x=Qpi2(j-
1,l)+Newt_n('eqn_1',0,coefbombai2(j+1,1),coefbombai2(j+1,2),coefbombai2(j+1
,3),coefbombai2(j+1,4),coefbombai2(j+1,5),f);
        Hpi2(j,k)=i;
        Qpi2(j,k)=x;
    end
end
end
end
%
```

```

%% Subrutina para el gráfico
%
figure(3);
subplot(2,2,4),plot(Qi21,Hi21),title('Datos del Fabricante bomba Tipo
1'),xlabel('Q(m3/s)'),ylabel('H(mh2o)');
hold on
for i=1:nbombasi2-1
    subplot(2,2,4), plot(Qpi2(i,:),Hpi2(i,:))
    hold on
end
%
%% a subrutina de suma de los tipos de bomba utilizados
BombasInyeccion2
%
% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% PROGRAMA: BOMBEO HIDRÁULICO SISTEMA DE REINYECCIÓN DE AGUA %
% ----- %
% BOMBAS - DESCARGA %
% BombasInyeccion2.m %
% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Bombas distintas,  $Q=Q1+Q2/Q1=Q1(H)/Q2=Q2(H)/Q1(H)+Q2(H)=Q$  %
% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% Determinamos el punto mas alto en la curva en cada uno de los grupos
% que en este caso es la constante asi tendremos un inicio al sumar Q
% Comparamos
% Primera Grupo de Bombas tipo 1 con el segundo tipo2
% Newton primera y segunda bomba
% Compramos valores iniciales de altura
if Hpi1(nbombasi1-1,1)==Hpi2(nbombasi2-1,1);
    j=0;
    Hcompsd=Hpi1(nbombasi1-1,1);% valor comparativa de mayor altura
    for i=Hpi1(nbombasi1-1,1):-5:50;
        j=j+1;
        x=Qpi1(nbombasi1-1,j)+Qpi2(nbombasi2-1,j);
        H1d(j)=i;
        Q1d(j)=x;
    end
elseif Hpi1(nbombasi1-1,1)>Hpi2(nbombasi2-1,1);
    j=0;
    Hcompsd=Hpi1(nbombasi1-1,1);% valor comparativa de mayor altura
    for i=Hpi1(nbombasi1-1,1):-5:Hpi2(nbombasi2-1,1)+5;
        j=j+1;
        x=Qpi1(nbombasi1-1,j);
        H1d(j)=i;
        Q1d(j)=x;
    end
end
k=0;
for i=Hpi2(nbombasi2-1,1):-5:50;
    j=j+1;
    k=k+1;
    x=Qpi1(nbombasi1-1,j)+Qpi2(nbombasi2-1,k);

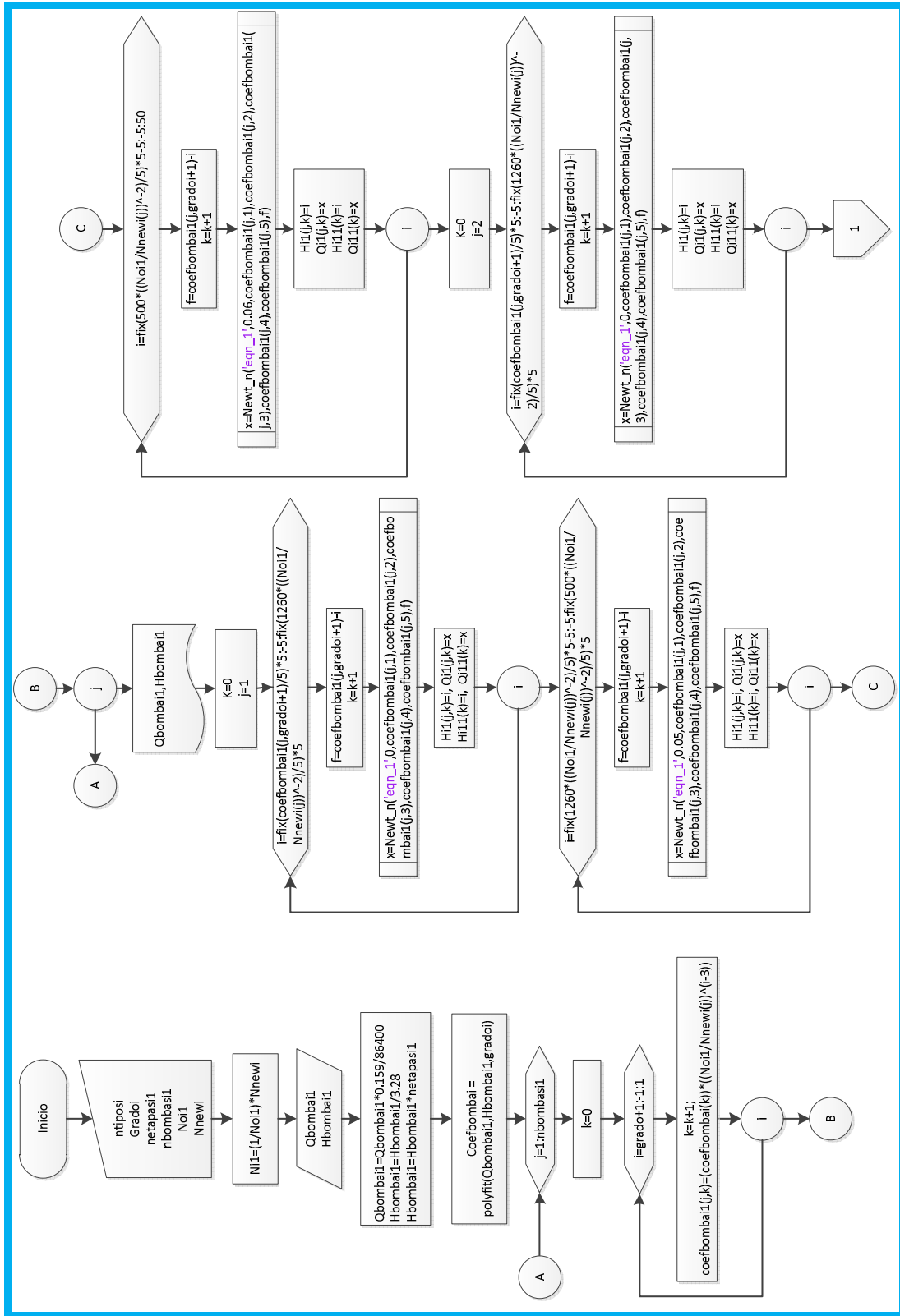
```

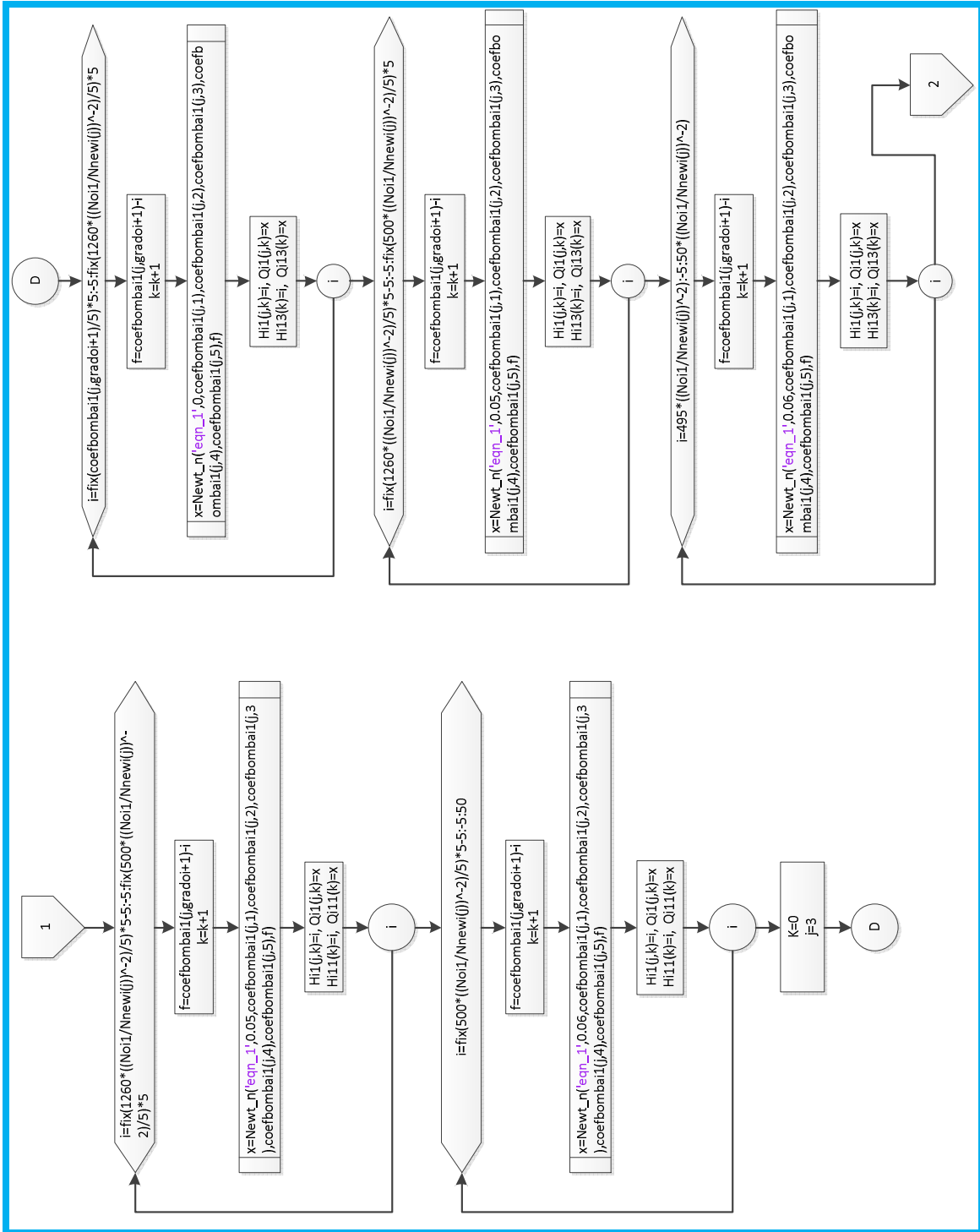
```

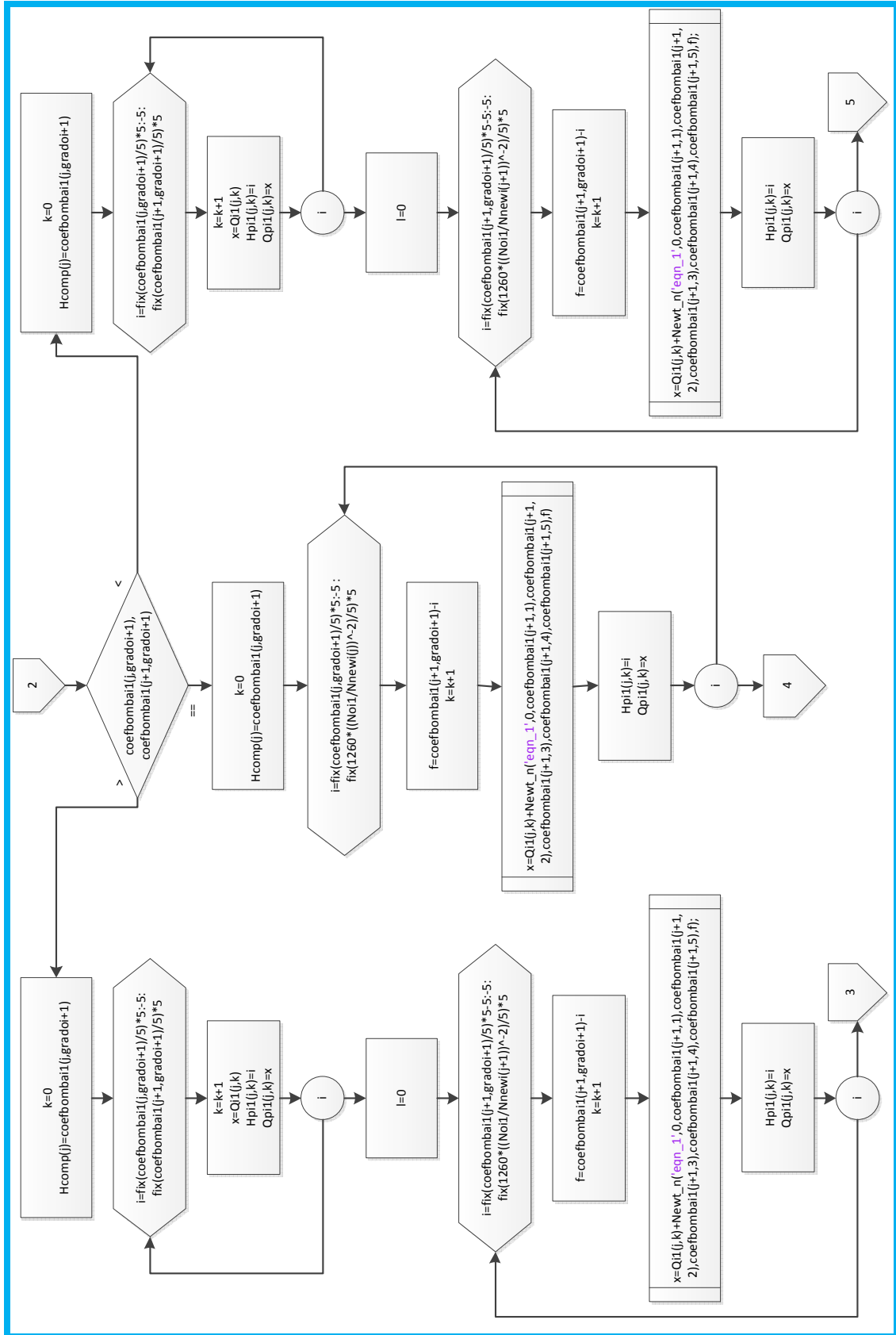
        H1d(j)=i;
        Q1d(j)=x;
    end
else Hpi2(nbombasi2-1,1)>Hpi1(nbombasi1-1,1);
    j=0;
    Hcompsd=Hpi2(nbombasi2-1,1);% valor comparativa de mayor altura
    for i=Hpi2(nbombasi2-1,1):-5:Hpi1(nbombasi1-1,1)+5;
        j=j+1;
        x=Qpi2(nbombasi2-1,j);
        H1d(j)=i;
        Q1d(j)=x;
    end
    k=0;
    for i=Hpi1(nbombasi1-1,1):-5:50;
        j=j+1;
        k=k+1;
        x=Qpi1(nbombasi1-1,k)+Qpi2(nbombasi2-1,j);
        H1d(j)=i;
        Q1d(j)=x;
    end
end
end
figure(4);
subplot(1,2,1),plot(Qpi1(nbombasi1-1,:),Hpi1(nbombasi1-1,:),Qpi2(nbombasi2-1,:),Hpi2(nbombasi2-1,:),Q1d,H1d),title('Datos del Fabricante bomba Tipo 1'),xlabel('Q(m3/s)'),ylabel('H(mh2o)');
subplot(1,2,2),plot(Q1d,H1d),title('Datos del Fabricante bomba Tipo 1'),xlabel('Q(m3/s)'),ylabel('H(mh2o)');

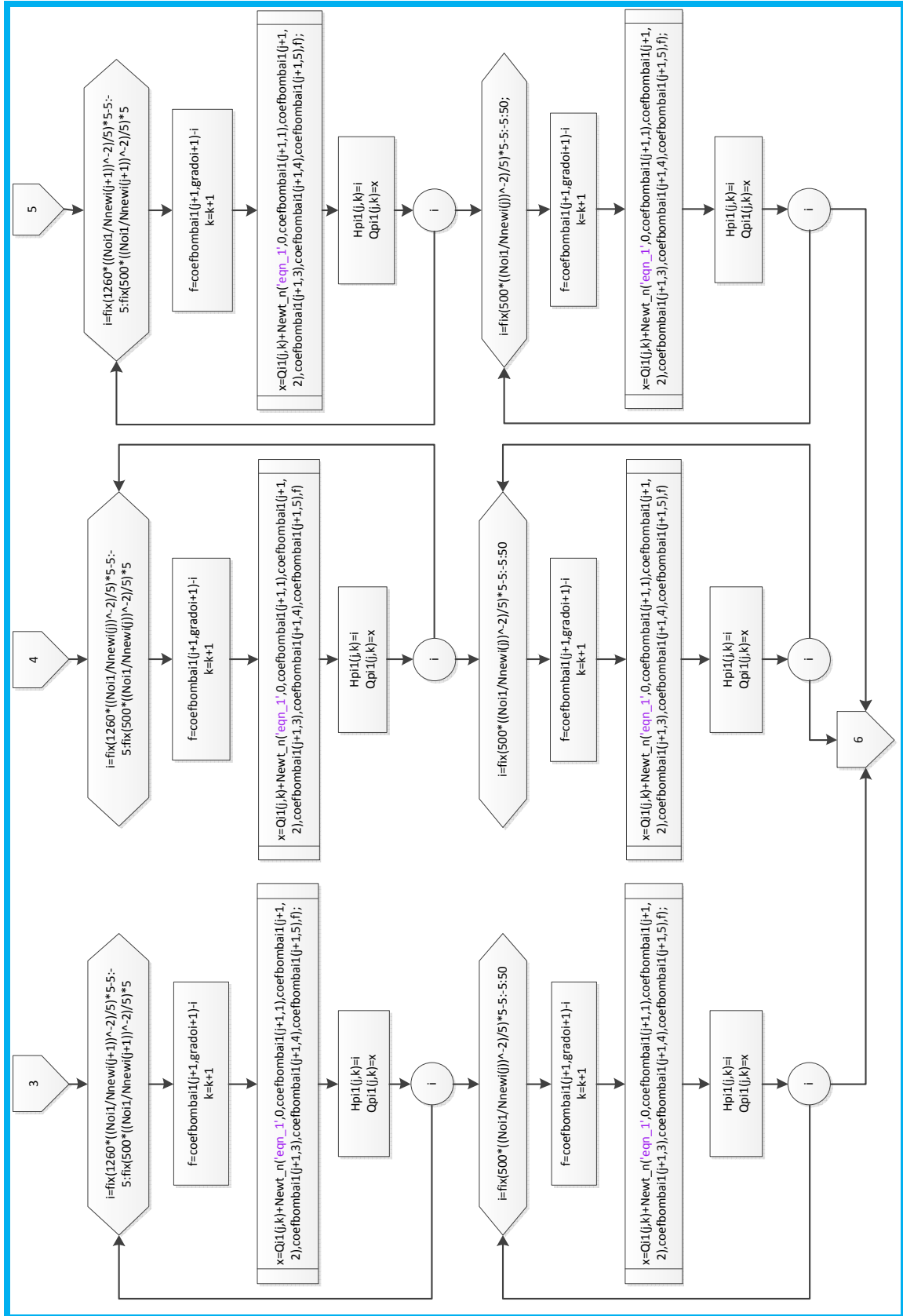
```

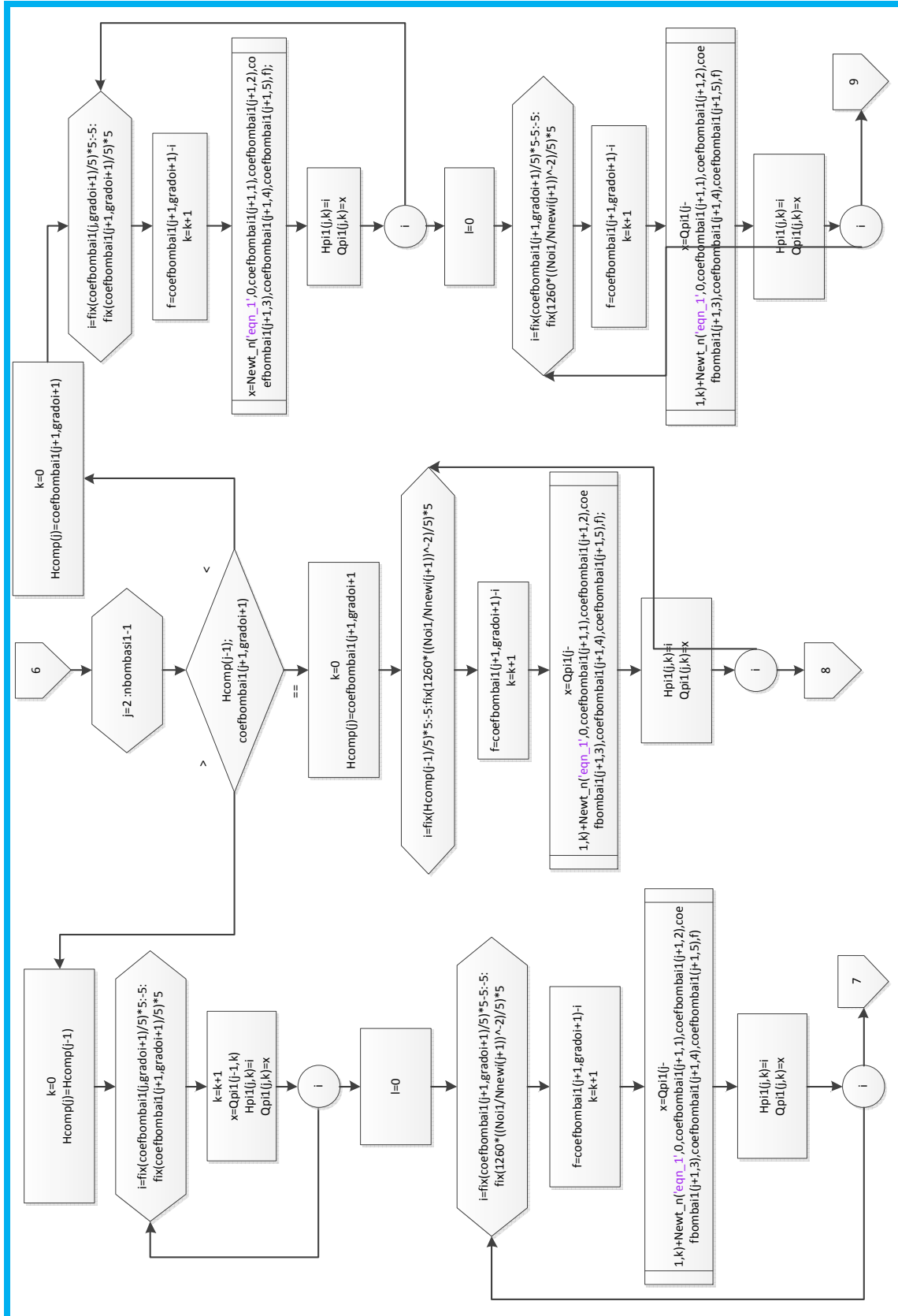

D.3.3. Diagrama de Flujo:

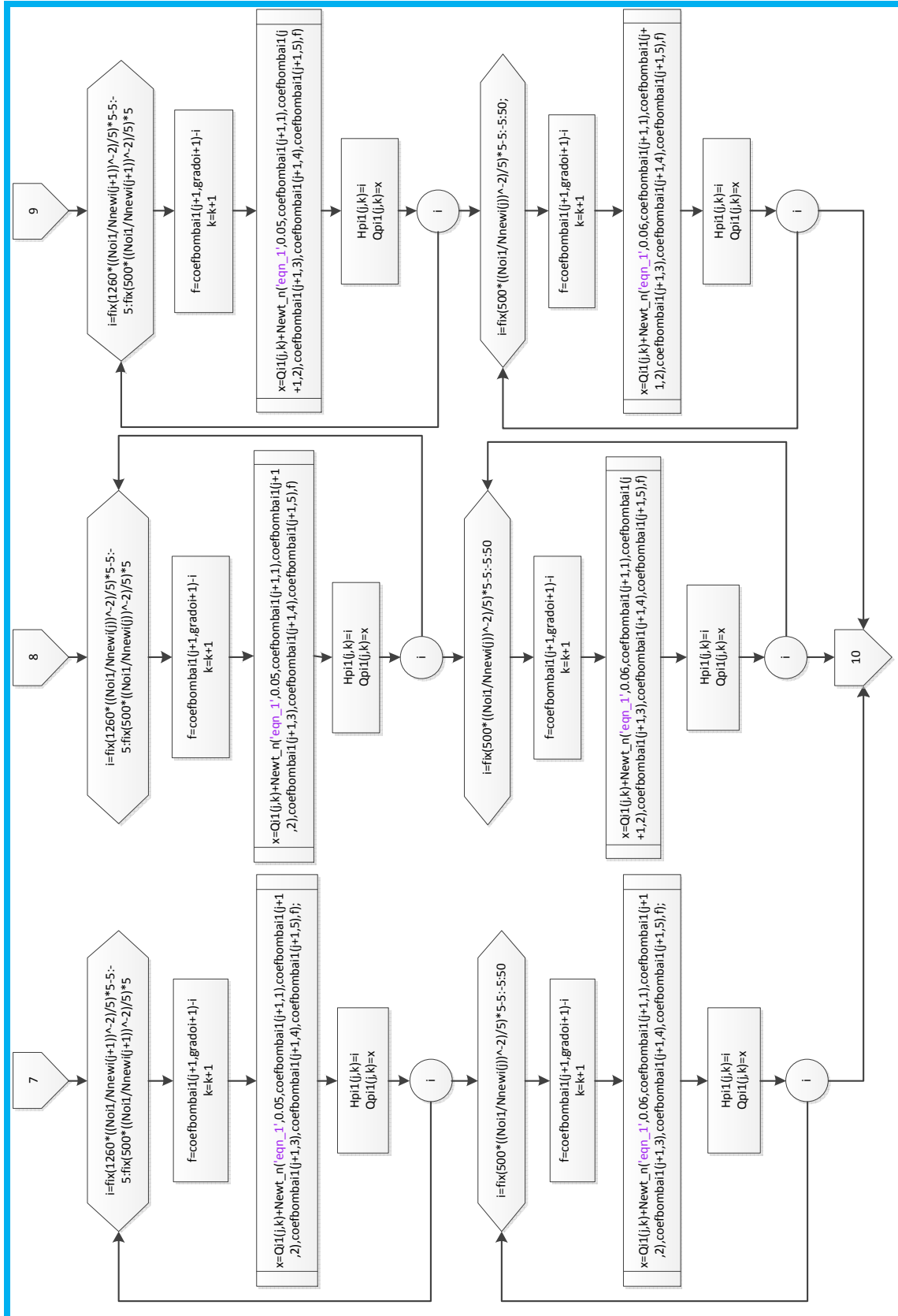


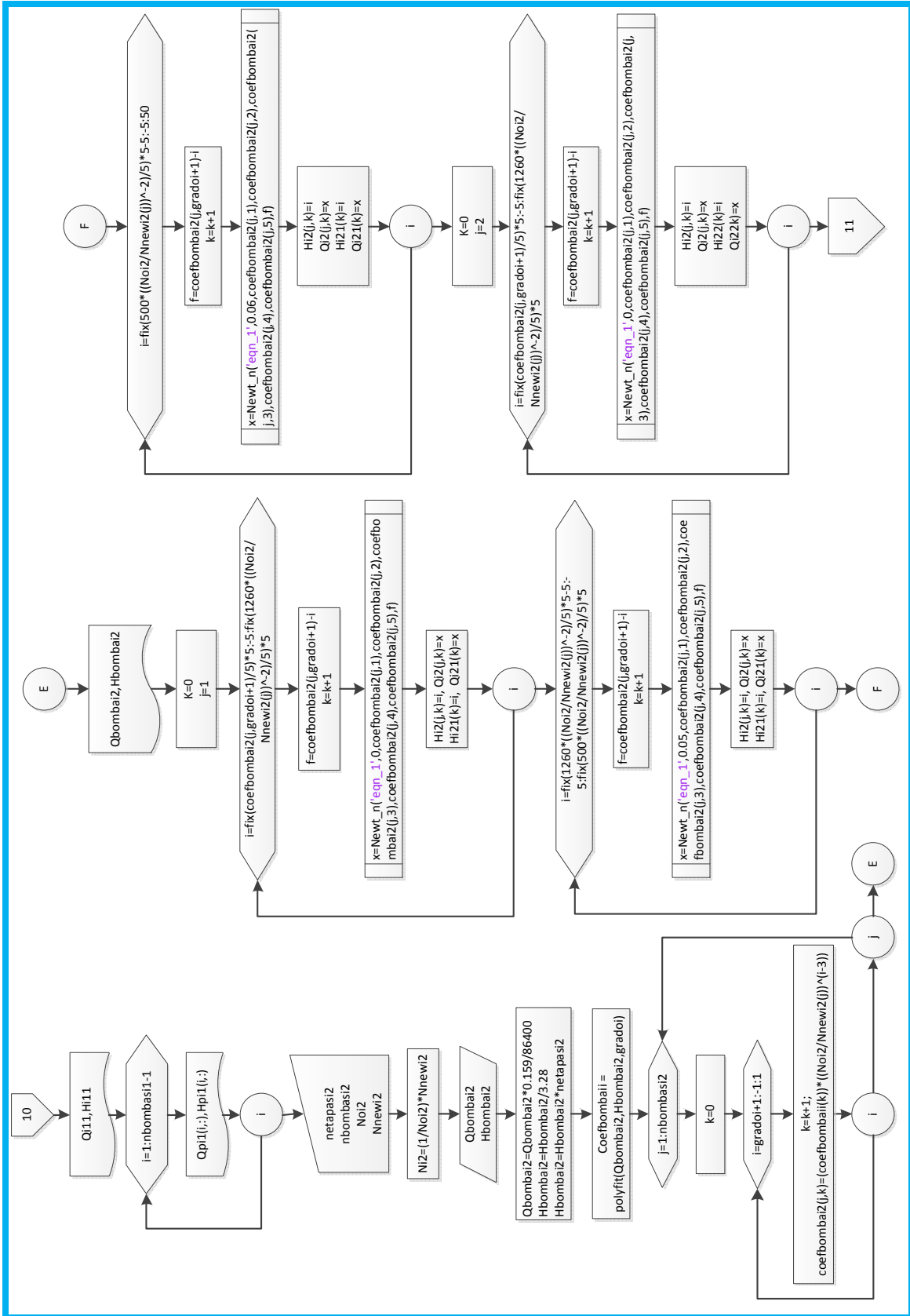


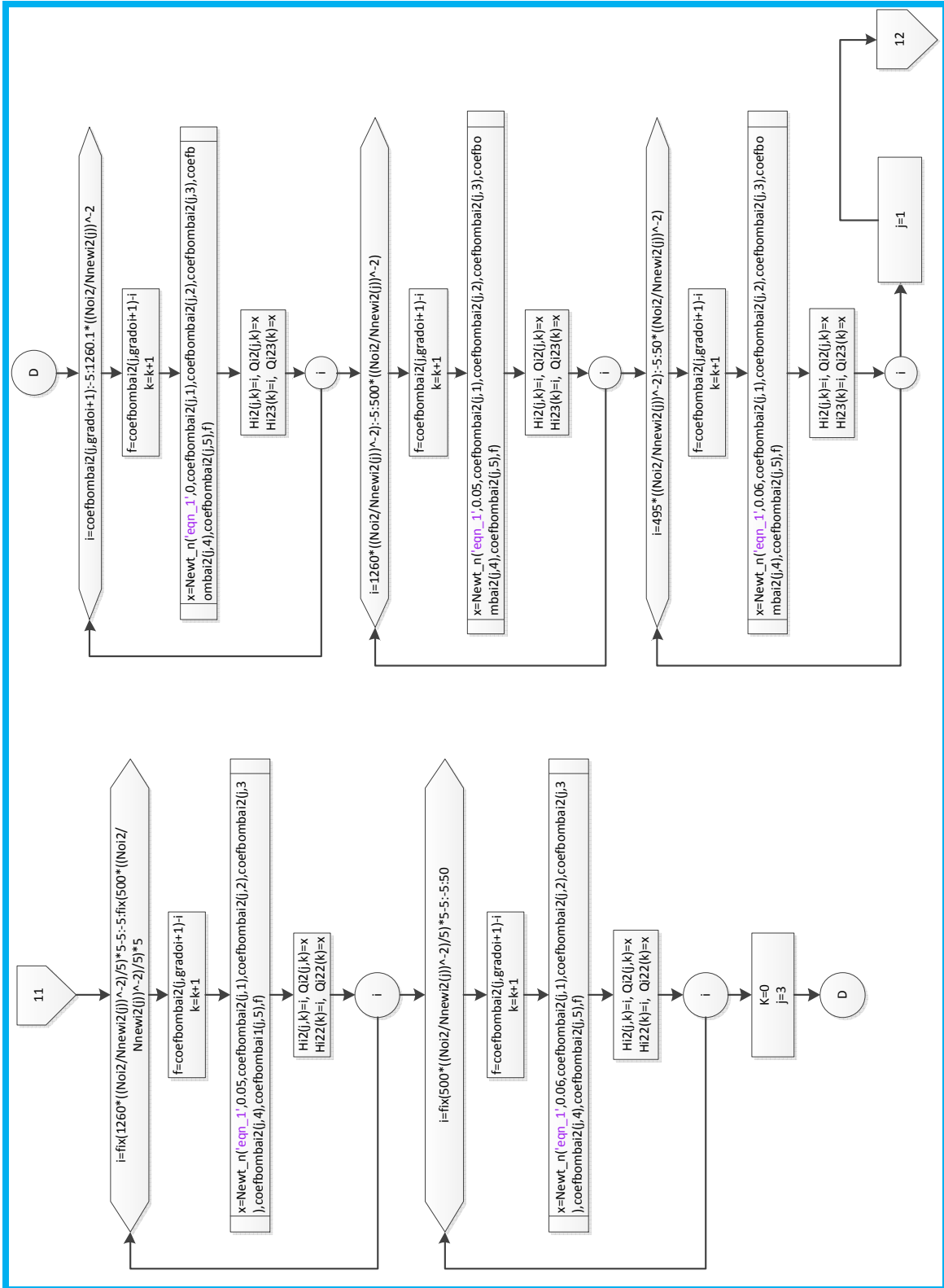


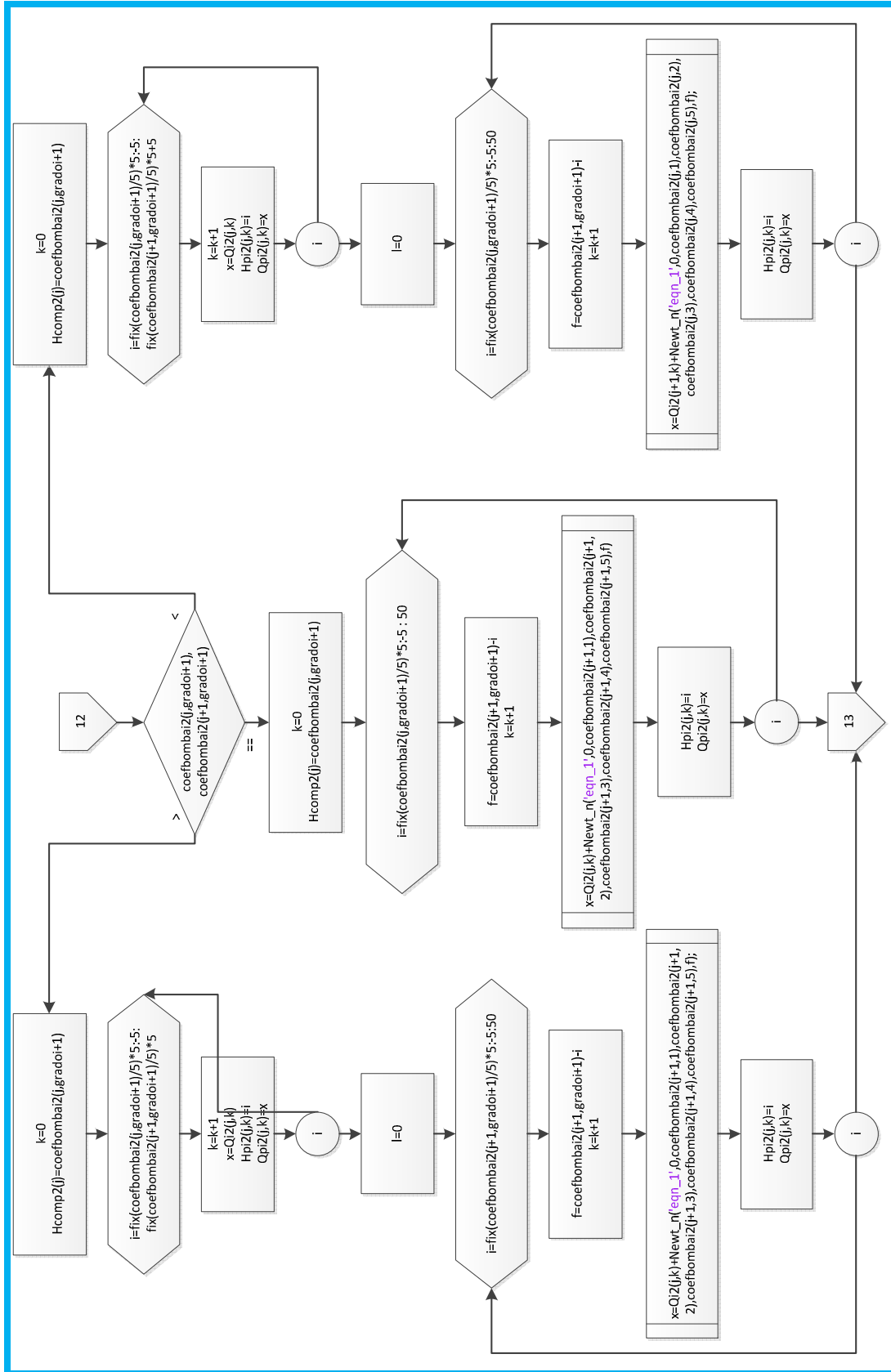


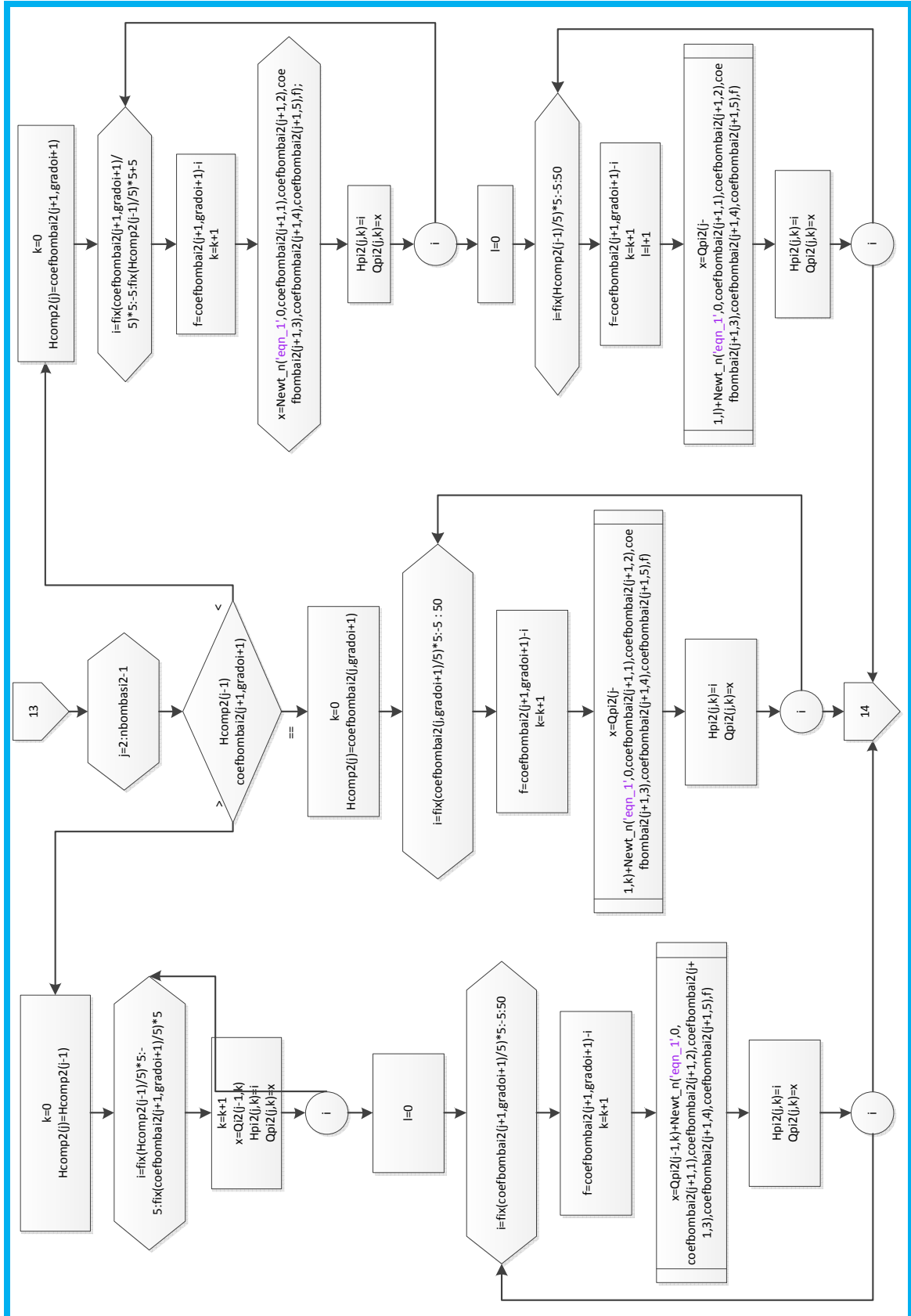


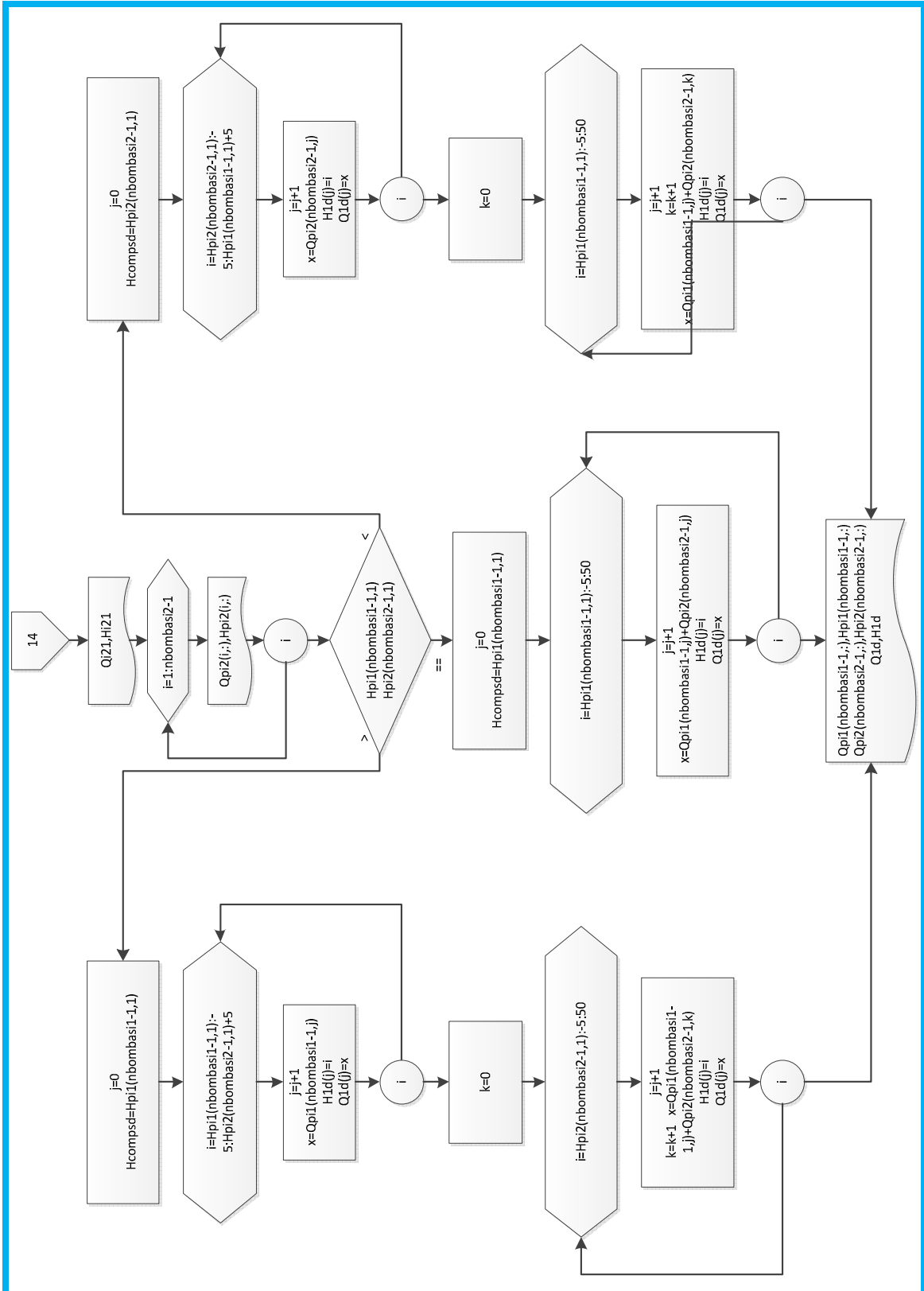












D.4. INTERACCIÓN DE CURVAS DE SUCCIÓN Y DESCARGA.

D.4.1. Descripción:

Ya completas las curvas de los sistemas de bombeo tanto en la succión como en la descarga, las integramos como un sistema en serie.

1. e succión.- ajustamos la curva de succión al grado determinado como un polinomio polyfit(Q2s,H2s,grado)
2. j es un contador y lo asignamos 0 como valor inicial
3. generamos un bucle para graficar las curvas.
4. Qid, H1d, Q2s, H2s.- caudal y altura graficado de los sistemas de succión y descarga.

D.5. CURVA DEL SISTEMA.

D.5.1. Descripción:

Para resolver nuestro sistema utilizaremos el programa MATLAB con las siguientes consideraciones:

1. Introducimos los datos de la red, estos datos están en el programa pero pueden ser cambiados en el programa con el objeto de variar las condiciones y obtener tendencias y resultados.
2. Para facilidad de despliegue de resultados definimos un formato corto (format short).
3. Consideramos los siguientes datos de la red:
 - 3.1. $E=0.046\text{mm}$ - coeficiente de rugosidad.- En tubería de acero soldada²
 - 3.2. $API=10$ – grado API ponderado para el campo en este ejercicio
 $SG=141.5/(API+131.5)$ - Gravedad específica a 60°F
 - 3.3. $d_{H2O}=1000$ – densidad del agua en Kg/m^3 .
 $d_{aguaf} = SG * d_{H2O}$ – densidad del agua de formación Kg/m^3 .
 - 3.4. $\mu=1$ – viscosidad dinámica considerada en cp.
 $\mu = \mu / 1000$ - viscosidad dinámica en kg/ms .
4. Cada tramo de tubería, tiene los siguientes datos, estos pueden cambiar de acuerdo al experimento:

² Coeficientes de rugosidad absoluta ϵ . (Ahmed N., 1987).

- 4.1. $D=[0.2032 \ 0.2032 \ 0.2032 \ 0.3048 \ 0.3048 \ 0.2032 \ 0.3048 \ 0.2032]$ - Diámetro en metros
- 4.2. $L=[60 \ 682 \ 2338 \ 2140 \ 3232 \ 1974 \ 1974 \ 100]$ - longitud en metros
- 4.3. $Q= [0.2347 \ 0.1710 \ 0.0900 \ 0.0970 \ 0.1220 \ 0.0637 \ 0.1883 \ 0.1250]$ – Caudal inicial en m^3/s . Datos iniciales de caudal, puede ser cualquier valor pero en este caso hemos tomado unos valores iniciales experimentales, es necesario evitar poner valores de cero (o).
5. Consideramos datos a los valores de presión en cada nudo fuente o nudo base y nudo de consumo o nudo libre, de lo cual:
- 5.1. $H=[1387;0;1284;1280;1141;1169;1254;1380]$ – presión del manifold en metros de agua, este vector como los anteriores pueden ser corridos en diferentes datos para diferentes circunstancias de producción.
- 5.2. $K=[8 \ 100 \ 0 \ 375.7135 \ 636.6257 \ 349.3 \ 750.4 \ 7.0710]$ – Constante de pérdidas menores, aquí podemos incluir cada una de las singularidades codos uniones, válvulas unos con mayor o menor influencia, para lo cual vamos a considerar absolutos, y valores experimentales.
6. Desde aquí iniciamos un bucle que permitirá ajustar las respuestas luego de cada cálculo de caudal en las ramas, con los nuevos datos se ajustan.
- 6.1. Pérdidas de carga en redes de agua:
- 6.1.1. Generamos un bucle con el propósito de calcular las perdidas en la tubería con la ecuación de Darcy-Weisbach, para cada tramo.
- 6.1.2. $numelem=size(L)$ – dimensionamos el número de tuberías de la red con el tamaño del vector longitud, con este generaremos las ecuaciones para cada tramo.
- 6.1.3. El bucle se generará con una sentencia FOR desde $i=1$ hasta $numelem(2)$, que es el número de columnas de $numelem$ es decir el vector longitudes.
- 6.1.4. $EL(i)=E/(D(i)*1000)$ – cálculo de la rugosidad relativa para cada tramo.
- 6.1.5. $A(i)=\pi*D(i)^2/4$ – cálculo del área de la tubería m^2 .
- 6.1.6. $V(i)=Q(i)/A(i)$ – velocidad lineal en m/s .
- 6.1.7. $Re(i)=(D(i)*V(i)*\rho/\mu)$ – Cálculo del Número de Reynolds
- 6.1.8. El coeficiente de fricción f finalmente lo calculamos con la Ecuación modificada de Colebrook-White, propuesta por Guerrero³ G y T parámetros de ajuste de la siguiente manera:
- 6.1.8.1. Si $Re(i) \geq 4000$ & $Re(i) \leq 10^5$, entonces:
 $G=4.555; T=0.8764$.
 $f(i)=0.25/((\log_{10}(EL(i)/3.71+G/((Re(i))^T)))^2)$.
- 6.1.8.2. si $Re(i) \geq 10^5$ & $Re(i) \leq 3*10^6$.
 $G=6.732; T=0.9104$.

³ Guerrero O. (1995). *Ecuación Modificada de Colebrook-White*. Revista Ingeniería Hidráulica de México, Vol. X, pp. 43-48, Enero-Abril.

6.8. Matriz de constantes

6.9. $KK=[H(1)/(Q(1)*c(1))+H(3)/(Q(2)*c(2))+H(7)/(Q(6)*c(6))];$

6.9.1. $H(3)^*(4/3)^*(1/(Q(2)*c(2))+1/(Q(3)*c(3)))-H(4)^*4/(3*Q(3)*c(3));$

6.9.2. $-H(3)^*4/(3*Q(3)*c(3))+H(4)^*4/(3*Q(3)*c(3));$

6.9.3. $H(5)^*4/(3*Q(4)*c(4))-H(6)^*4/(3*Q(4)*c(4));$

6.9.4. $-H(5)^*4/(3*Q(4)*c(4))+H(6)^*4/3*(1/(Q(4)*c(4))+1/(Q(5)*c(5)))-H(7)^*4/(3*Q(5)*c(5));$

6.9.5. $-H(1)^*4/(3*Q(7)*c(7))-$

$H(6)^*4/(3*Q(5)*c(5))+H(7)^*4/3*(1/(Q(7)*c(7))+1/(Q(6)*c(6))+1/(Q(5)*c(5)));$

6.9.6. $-H(1)^*4/(3*Q(8)*c(8))+H(8)^*4/(3*Q(8)*c(8));$

6.9.7. Resultados de la Matriz que resuelve la Topología en base a información conocida. $HM=AA*KK;$

$C(1)=H(1)^*(4/3)^*(1/(Q(1)*c(1))+1/(Q(7)*c(7))+1/(Q(8)*c(8)))-$

$H(2)^*(4/3)^*(1/(Q(1)*c(1)))-H(7)^*(4/3)^*(1/(Q(7)*c(7)))-$

$H(8)^*(4/3)^*(1/(Q(8)*c(8)));$

$H(2)=HM(1);$

$C(3)=HM(2);$

$C(4)=HM(3);$

$C(5)=HM(4);$

$C(6)=HM(5);$

$C(7)=HM(6);$

$C(8)=HM(7);$

6.9.8. Los nuevos caudales serían

$Q(1)=(H(1)-H(2))/((c(1)*abs(H(2)-H(1)))^(1/2));$

$Q(2)=(H(2)-H(3))/((c(2)*abs(H(3)-H(2)))^(1/2));$

$Q(3)=(H(3)-H(4))/((c(3)*abs(H(4)-H(3)))^(1/2));$

$Q(4)=(H(6)-H(5))/((c(4)*abs(H(5)-H(6)))^(1/2));$

$Q(5)=(H(7)-H(6))/((c(5)*abs(H(6)-H(7)))^(1/2));$

$Q(6)=(H(2)-H(7))/((c(6)*abs(H(7)-H(2)))^(1/2));$

$Q(7)=(H(1)-H(7))/((c(7)*abs(H(7)-H(1)))^(1/2));$

$Q(8)=(H(1)-H(8))/((c(8)*abs(H(8)-H(1)))^(1/2));$

7. Fin de la interacción y del cálculo

8. Definiciones:

$DatosHpozos=H;$

$DatosHpozos(1)=0;$

$Hinicial=max(DatosHpozos)+2;$

9. Bucle desde $i=1$ hasta 10 – Construcción de la curva

$Hmf(i)=Hinicial+(i-1)*10;$

$Qt(1)=sqrt(abs(Hmf(i)-H(2))/c(1))$ – caudal total en la rama 1

$Qt(7)=sqrt(abs(Hmf(i)-H(7))/c(7))$ – caudal total en la rama 7

$Qt(8)=sqrt(abs(Hmf(i)-H(8))/c(8))$ – Caudal total en la rama 8

$Qsist(i)=Qt(1)+Qt(7)+Qt(8)$ – Caudal total del sistema

10. Fin de la interacción

11. coefHs=polyfit(Qsist,Hmf,2) – Curva de grado 2 Caudal del sistema total vs la altura
12. m=0 – creamos el contador m
13. iniciamos un bucle desde s=0, con incrementos de 0.02 hasta 1.4
 m=m+1 – contador con incrementos de 1
 qsistema(m)=s – caudal del sistema
 hsistema(m)=polyval(coefHs,s) – altura
14. fin del bucle
15. Grafica del Sistema Bombas.
16. Rama = [1 1 2 2 2 3 3 3 4 4 6 5 5 7 6 6 2 7 7 1 7 8 1 8] – Ingresamos el Orden de las ramas según topología de la red.
17. Nramas=8 – número de ramas
18. Despliegue de Data y Resultados por Ramas
19. Nnudos=8 – Número de nudos
20. Despliegue de Data y Resultados por nudo
21. Intersección de la curva del Sistema con Las Unidades de Bombeo
 - 21.1. coefHs=polyfit(Qsist,Hmf,2) – coeficientes de la curva que vamos a ajustar en base a los datos obtenidos
 - 21.2. m=0 – contador
 - 21.3. Limpieza de valores de variable clear qs, clear hs
 - 21.4. Bucle s inicia en 0 con incrementos de 0.02 y hasta 1.4
 m=m+1 – contador
 qs(m)=s
 hs(m)=polyval(coefHs,s) – valores de la curva
 - 21.5. Fin del bucle
 - 21.6. j=0; - contador
 - 21.7. Iniciamos un bucle con i=H1d(1):-5:50;
 j=j+1 - contador
 x=Q1d(j)
 H1ds(j)=i+polyval(ecsuccion,x)
 Q1ds(j)=x
 hs(j)=polyval(coefHs,x)
 difhsH1ds(j)=abs(H1ds(j)-hs(j))
 - 21.8. Condicional j>1 & difhsH1ds(j)<difhsH1ds(j-1)
 Hinterseccion=H1ds(j) – altura intersección
 Qinterseccion=Q1ds(j) –Caudal intersección
 - 21.9. fin del condicional
22. Despliegue de la intersección.

D.5.2. Codificación:

```

%*****
%*          RED: TopologiaRed.m          **
%*****
% DATOS DE LA RED
% Tubería
format short
%
E=0.046; % mm coeficiente de rugosidad
API=10; % grado API ponderado para el campo del ejercicio
SG=141.5/(API+131.5); % Gravedad específica a 60°F
dH2O=1000; % densidad del agua Kg/m^3
daguaf=SG*dH2O; % densidad del crudo Kg/m^3
u=1; % viscosidad dinámica en cp
u=u/1000; % viscosidad dinámica en kg/ms
%
% tramos de tubería
%
D=[0.2032 0.2032 0.2032 0.3048 0.3048 0.2032 0.3048 0.2032];%Diámetro en
metros
L=[60 682 2338 2140 3232 1974 1974 100];%longitud en metros
% Tomamos inicialmente como datos los valores del experimentoen en cuanto
al caudal
% Q=[0.2347 0.1710 0.0900 0.0970 0.1220 0.0637 0.1883 0.1250]; % Dato
inicial de caudal
Q=[1 1 1 1 1 1 1 1]
%
% Nudos
%
% H=[1387;0;1287;1279.88;1141;1169;1254;1380];% en m de agua, presión del
manifold
H=[1418;0;1310;1305;1162;1197;1303;1423]
%
% K constante de las singularidades en cada tramo de la tubería como un
% total
K=[8 100 0 375.7135 636.6257 349.3 750.4 7.0710]
%
% pérddas de carga en tuberías
%
numelem=size(L);
%
for i=1:100
for i=1:numelem(2);
EL(i)=E/(D(i)*1000);% rugosidad relativa
A(i)=pi*D(i)^2/4;% área de la tubería m2
V(i)=Q(i)/A(i);% velocidad lineal m/s
Re(i)=(D(i)*V(i)*daguaf)/u;% Número de Reynolds
% El coeficiente de fricción f finalmente lo calculamos con la Ecuación
modificada
% de Colebrook-White, conisdrsmos:Guerrero G y T parámetros de ajuste
if Re(i)>=4000&&Re(i)<=10^5;
G=4.555;T=0.8764;
f(i)=0.25/((log10(EL(i)/3.71+G/((Re(i))^T)))^2);

```

```

elseif Re(i)>=10^5&&Re(i)<=3*10^6;
    G=6.732;T=0.9104;
    f(i)=0.25/((log10(EL(i)/3.71+G/Re(i)^T))^2);
elseif Re(i)>=3*10^6&&Re(i)<=10^8;
    G=8.982;T=0.93;
    f(i)=0.25/((log10(EL(i)/3.71+G/Re(i)^T))^2);
else
    f(i)=64/Re(i); % región laminar Poiseuille / 1846
end
ctuberia(i)=(0.0827*f(i)*L(i))/(D(i)^5); % ecuación de Darcy-Weisbach.
%
cmenores(i)=0.0827*K(i)/(D(i))^4; % resistencias menores por accesorio
%
% Pérdidas totales
%
c(i)=ctuberia(i)+cmenores(i);% Cij=0.0826/D^4 *(?K+(f*L)/D) Resistencia
total por tramo
end
%
% Solución de la red
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Data: %
% Consideramos el consumo en cabeza de pozo %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Definición del vector Caudal inicial
Q21=Q(1);
Q32=Q(2);
Q43=Q(3);
Q56=Q(4);
Q67=Q(5);
Q72=Q(6);
Q71=Q(7);
Q81=Q(8);
% Definición de Resistencias
c21=c(1);
c32=c(2);
c43=c(3);
c56=c(4);
c67=c(5);
c72=c(6);
c71=c(7);
c81=c(8);
AA=[1/(Q(1)*c(1))+1/(Q(2)*c(2))+1/(Q(6)*c(6)) 0 0 0 0 0 0;% H(2)
4/(3*Q(2)*c(2)) 1 0 0 0 0 0;% C3
0 0 1 0 0 0 0;% C4
0 0 0 1 0 0 0;% C5
0 0 0 0 1 0 0;% C6
4/(3*Q(6)*c(6)) 0 0 0 0 1 0;% C6-H(1)*4/(3*Q71*c71)
0 0 0 0 0 1];% C7-4/(3*Q81*c81)
KK=[H(1)/(Q(1)*c(1))+H(3)/(Q(2)*c(2))+H(7)/(Q(6)*c(6));
H(3)*(4/3)*(1/(Q(2)*c(2))+1/(Q(3)*c(3)))-H(4)*4/(3*Q(3)*c(3));

```

```

-H(3)*4/(3*Q(3)*c(3))+H(4)*4/(3*Q(3)*c(3));
H(5)*4/(3*Q(4)*c(4))-H(6)*4/(3*Q(4)*c(4));
-H(5)*4/(3*Q(4)*c(4))+H(6)*4/3*(1/(Q(4)*c(4))+1/(Q(5)*c(5)))-
H(7)*4/(3*Q(5)*c(5));
-H(1)*4/(3*Q(7)*c(7))-
H(6)*4/(3*Q(5)*c(5))+H(7)*4/3*(1/(Q(7)*c(7))+1/(Q(6)*c(6))+1/(Q(5)*c(5)))-
-H(1)*4/(3*Q(8)*c(8))+H(8)*4/(3*Q(8)*c(8))];
HM=AA\KK;
% de la matriz
C(1)=H(1)*(4/3)*(1/(Q(1)*c(1))+1/(Q(7)*c(7))+1/(Q(8)*c(8)))-
H(2)*(4/3)*(1/(Q(1)*c(1)))-H(7)*(4/3)*(1/(Q(7)*c(7)))-
H(8)*(4/3)*(1/(Q(8)*c(8)));
H(2)=HM(1);
C(3)=HM(2);
C(4)=HM(3);
C(5)=HM(4);
C(6)=HM(5);
C(7)=HM(6);
C(8)=HM(7);
% Los nuevos caudales serían
Q(1)=(H(1)-H(2))/((c(1)*abs(H(2)-H(1)))^(1/2));
Q(2)=(H(2)-H(3))/((c(2)*abs(H(3)-H(2)))^(1/2));
Q(3)=(H(3)-H(4))/((c(3)*abs(H(4)-H(3)))^(1/2));
Q(4)=(H(6)-H(5))/((c(4)*abs(H(5)-H(6)))^(1/2));
Q(5)=(H(7)-H(6))/((c(5)*abs(H(6)-H(7)))^(1/2));
Q(6)=(H(2)-H(7))/((c(6)*abs(H(7)-H(2)))^(1/2));
Q(7)=(H(1)-H(7))/((c(7)*abs(H(7)-H(1)))^(1/2));
Q(8)=(H(1)-H(8))/((c(8)*abs(H(8)-H(1)))^(1/2));
end
%%
DatosHpozos=H;
DatosHpozos(1)=0;
Hinicial=max(DatosHpozos)+2;
for i=1:10
    Hmf(i)=Hinicial+(i-1)*10;
    Qt(1)=sqrt(abs(Hmf(i)-H(2))/c(1));
    Qt(7)=sqrt(abs(Hmf(i)-H(7))/c(7));
    Qt(8)=sqrt(abs(Hmf(i)-H(8))/c(8));
    Qsist(i)=Qt(1)+Qt(7)+Qt(8);
end
%%
coefHs=polyfit(Qsist,Hmf,2);
m=0;
for s=0:0.02:1.4
    m=m+1;
    qsistema(m)=s;
    hsistema(m)=polyval(coefHs,s);
end
%% Grafica Sistema - Bombas
figure(6)
subplot(1,2,1),plot(qsistema,hsistema),title('Curva del
Sistema'),xlabel('Q(m3/s)'),ylabel('H(mh2o)');

```

```

subplot(1,2,2),plot
(Qlds,Hlds,qsistema,hsistema,C(1),H(1),'LineWidth',2),title('Curva de la
Estación de Bombeo vs Curva del
Sistema'),xlabel('Q(m3/s)'),ylabel('H(mh2o)');
%% Tabla de resusltados por rama
% Rama - nudo izquierdo - nudo derecho
Rama = [1 1 2 2 2 3 3 3 4 4 6 5 5 7 6 6 2 7 7 1 7 8 1 8];
Nramas=8;
clc
disp('Rama  NodoIzq.  NodoDer.  D(m)    L(m)    Q(m3/s)    H(m)    c
V(m/s)    Q(bpd)    H(psi)    V(ft/s)    D(in)')
disp('-----')
for i=1:Nramas;
    j1=Rama((i-1)*3+2);
    j2=Rama((i-1)*3+3);
    fprintf(' %5.0f %5.0f %5.0f %5.3f %5.0f %5.3f %5.0f
%5.0f %5.1f %5.0f %5.0f %5.1f
%5.0f\n',i,j1,j2,D(i),L(i),Q(i),H(i),c(i),Q(i)/A(i),Q(i)*543440,H(i)*1.42,Q
(i)/A(i)*3.28,D(i)*39.37)
end
%%
% Nudos
%
Nnudos=8;
format short
disp(' Nudo  Altura(m)  Consumo(m3/s)  Altura(psi)  Consumo(bpd)')
disp('-----')
for i=1:Nnudos;
    fprintf(' %5.0f %5.0f %5.4f %5.0f
%5.0f\n',i,H(i),C(i),H(i)*1.42,C(i)*543440)
end
%% Intersección entre la curva del sistema y bombas
% Comparación entre pares ordenados.
% la curva del sistema con los datos geneados definimos una curva de
% segundo grado
coefHs=polyfit(Qsist,Hmf,2);
m=0;
clear qs
clear hs
for s=0:0.02:1.4
    m=m+1;
    qs(m)=s;
    hs(m)=polyval(coefHs,s);
end
%%
j=0;
for i=H1d(1):-5:50;
    j=j+1;
    x=Q1d(j);
    Hlds(j)=i+polyval(ecsuccion,x);
    Qlds(j)=x;

```

```

hs(j)=polyval(coefHs,x);
difhsHlds(j)=abs(Hlds(j)-hs(j));
if j>1 & difhsHlds(j)<difhsHlds(j-1)
    Hinterseccion=Hlds(j);
    Qinterseccion=Qlds(j);
end
end
format short
disp('Intersección')
disp('Altura(m)    Caudal(m3/s)    Altura(psi)    Caudal(bpd)')
disp('-----')
fprintf('%5.2f    %5.4f    %5.0f\n',Hinterseccion,Qinterseccion,Hinterseccion*1.42,Qinterseccion*54344
0);

```

D.5.3. Diagrama de Flujo:

