

**SISTEMA DE APOYO A LAS DECISIONES EN LA OPTIMIZACIÓN GLOBAL DE  
OPERACIONES DE OLEODUCTOS**

**EDGAR AGUDELO ACUÑA  
GERMAN ENRIQUE ALVAREZ VELANDIA**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA  
ESCUELA DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA DE SISTEMAS  
LINEA DE INVESTIGACIÓN EN INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES  
BUCARAMANGA**

**2003**

**SISTEMA DE APOYO A LAS DECISIONES EN LA OPTIMIZACIÓN GLOBAL DE  
OPERACIONES DE OLEODUCTOS**

**EDGAR AGUDELO ACUÑA  
GERMAN ENRIQUE ALVAREZ VELANDIA**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO DE  
SISTEMAS**

**Director:  
Juan Carlos García. Ph.D**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA  
ESCUELA DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA DE SISTEMAS  
LINEA DE INVESTIGACIÓN EN INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES**

**BUCARAMANGA**  
**2004**

**Nota de Aceptación**

---

---

---

---

---

Presidente del jurado

---

**Jurado**

---

**Jurado**

**Bucaramanga, 15 Agosto de 2004**

### III

#### DEDICATORIA

Por sus enseñanzas y sacrificios en pro de mi crecimiento integral, a mis padres,  
.Jorge Agudelo y Rosalba Acuña.

De manera especial a Rosa I. Rueda (Tota), mi novia, por su comprensión y apoyo.

**Edgar Agudelo A**

Este proyecto de grado esta dedicado a la memoria de mi Padre Luis Enrique Alvarez  
Arango, que me guía desde el cielo, a mi madre Hilda Maria Velandia de Alvarez

**German Alvarez**

## IV

### AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Juan Carlos García Díaz, nuestro director, por su gran colaboración, por su guía y por haber confiado en nosotros, es motivo de orgullo el haber sido seleccionados para este proyecto. De vital importancia fue el contar siempre con mi novia, Rosa I. Rueda (Tota), gracias a ti las cosas tienen más sentido para mí. También no pueden faltar los aportes de aquellos verdaderos amigos: Claudia Barrios, Jairo Bermúdez, Jimmy Hernández, Carolina Rojas, Roger Rojas, y en especial los sabios consejos del Ing. Carlos Delgado.

**- Edgar Agudelo A.-**

A mi Madre que en todo momento recibí su incondicional apoyo, gracias por tu cariño, paciencia, dedicación y sobre todo tu amor y comprensión, sin ti este sueño no lo hubiese logrado. Gracias por esa confianza que respaldaba este objetivo y porque me has enseñado muchas cosas en la vida, una de ellas es afrontar las dificultades con paciencia y con responsabilidad.

Al Profesor Juan Carlos Garcia, Director de esta tesis, mis mas sincera gratitud por su confianza, paciencia y disposición en todo momento. Profesor Juan Carlos mi mayor agradecimiento por aceptar el reto de dirigir mi trabajo de investigación y enseñarme a disfrutar de él.

A todos mis amigos por los momentos compartidos de reflexión y apoyo para encontrar la razón por la que intentamos alcanzar este objetivo. Gracias a todos por dejarme compartir estos años de vida, en los cuales me dieron incondicionalmente su apoyo, comprensión y sugerencias para crecer como persona y formarme como profesional.

A todos mis profesores por creer en mí y en mis capacidades. Gracias a todos por su incondicional colaboración y capacidad profesional.

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	1
1. OBJETIVOS	2
1.1 OBJETIVO GENERAL	2
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	2
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN	3
3. ANTECEDENTES	6
4. MARCO TEÓRICO	7
4.1 PROGRAMACIÓN NO LINEAL ENTERA MIXTA	7
4.2 ALGORITMOS DE SOLUCIÓN DE LA PROGRAMACIÓN ENTERA	8
4.3 TÉCNICA DE RAMIFICACIÓN Y ACOTAMIENTO Y SU USO EN LA PROGRAMACIÓN ENTERA BINARIA	10
4.4 GRADIENTE REDUCIDO GENERALIZADO(GRG)	12
4.4.1 Algoritmo de Gradiente Reducido Generalizado	14
4.5 GAMS	15
4.6 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS	16
4.6.1 Propiedades Fundamentales	16
4.6.1.1 Peso Unitario o Específico	16
4.6.1.2 Densidad	17

4.6.1.3	Gravedad Específica	17
4.6.1.4	Viscosidad	17
4.6.1.5	Cohesión	18
4.6.1.6	Adhesión	18
4.7	DINÁMICA DE LOS FLUIDOS	18
4.7.1	Ecuación de Continuidad	18
4.7.2	Ecuación de Bernoulli	19
4.7.3	Flujo Laminar	20
4.7.4	Flujo Turbulento	20
4.7.5	Número de Reynolds	21
4.7.6	Pérdidas por Fricción en Tuberías	21
4.7.7	Factor de Fricción	22
4.7.8	Pérdidas Menores	23
4.7.9	Gradiente Hidráulico	23
4.8	BOMBAS CENTRÍFUGAS	24
4.8.1	Funcionamiento de una Bomba Centrífuga	24
4.8.2	Características de las Bombas Centrífugas	24
4.8.3	Curvas de Sistema	25
4.9	ESTACIONES DE BOMBEO	27
4.9.1	Tipos de Estación	27
4.9.1.1	Estación Inicial	27
4.9.1.2	Estación Intermedia	27
4.9.1.3	Estación Mixta	27

4.9.1.4 Estación Terminal	27
5. DISEÑO METODOLÓGICO	28
5.1 ANÁLISIS	28
5.1.1 Viabilidad del Proyecto	28
5.1.1.1 Beneficios del Proyecto	28
5.1.1.2 Necesidad del Proyecto	29
5.1.2 Análisis y Estudio del Sistema Actual	30
5.1.2.1 Descripción General del Sistema Actual	30
5.1.2.2 Ventajas y Problemas	34
5.1.3 Análisis y Estudio del Sistema Propuesto	34
5.1.3.1 Objetivo General	34
5.1.3.2 Alcance del Proyecto	34
5.1.4 Diagramas	36
5.1.4.1 Diagrama de Contexto	36
5.1.4.2 Diagrama de Flujo de Datos	36
5.1.4.3 Diagrama de Entidad Relación	36
5.2 DISEÑO	37
5.2.1 Ámbito	37
5.2.1.1 Objetivos del Sistema	37
5.2.1.2 Principales Requisitos del Hardware y Software	37
5.2.1.3 Restricciones de Diseño, Limitaciones	39
5.2.2 Diseño de Datos	41
5.2.3 Diseño Arquitectónico	41

5.2.3.1 Revisión de Datos y del Flujo de Control	41
5.2.3.2 Estructura del Programa	41
5.2.3.3 Normas de Diseño de Interfaz	41
5.2.4 Diseño Procedimental	42
5.3 DESARROLLO	42
5.4 PRUEBAS Y RESULTADOS	42
6. CONCLUSIONES	45
BIBLIOGRAFIA	46
ÍNDICE	48
ANEXOS	50

**IX**  
**LISTA DE FIGURAS**

	Pág
Figura 1. Estrategia de Solución por GRG	13
Figura 2. Estrategia de Ramificación y Acotamiento Utilizado por GRG	14
Figura 3. Ley de Continuidad	19
Figura 4. Ley de Bernoulli	20
Figura 5. Bomba Centrífuga Simple	25
Figura 6. Curva Característica de una Bomba Centrífuga	26
Figura 7. Galones por Minuto	26
Figura 8. Diagrama de Contexto	36
Figura 9. Diagrama de Flujo de Datos	38
Figura 10. Diagrama de Entidad Relación	40
Figura 11. Diagrama de Estructura de Programa Modular	43

**X**  
**LISTA DE ANEXOS**

	Pág
Anexo A. Diagrama Procedimental	50
Anexo B. Diagrama Procedimental	56
Anexo C. Diagrama Procedimental	76

## XI

### GL GARIO

**ACOTAR:** Para cada nuevo subproblema se obtiene su cota aplicando un método de solución para este subproblema.

**ADHESIÓN:** Es la atracción molecular entre moléculas diferentes.

**BOMBAS CENTRIFUGAS:** La bomba centrífuga es el tipo de dispositivo que más se utiliza en la industria química para transferir líquidos de todo tipo.

**CARGA:** Presión transmitida a un fluido y que es producida por una bomba.

**COHESIÓN:** Es la atracción molecular entre las moléculas semejantes y son interacciones que se manifiestan entre las cargas eléctricas fundamentales.

**DENSIDAD:** Se define como la masa del fluido por unidad de volumen.

**FLUJO LAMINAR:** En el flujo laminar las partículas del fluido se mueven a lo largo de trayectorias más o menos rectas; su número de Reynolds es menor a 2000.

**FLUJO TURBULENTO:** El flujo turbulento ocurre cuando la velocidad promedio es grande; no existen líneas hidrodinámicas bien definidas. Su número de Reynolds es mayor a 4000.

**GAMS:** *Sistema de Modelamiento Algebraico General* (General Algebraic Modeling System) es un lenguaje de programación que permite el modelado, análisis y resolución de diversos problemas de optimización.

**GRADIENTE HIDRÁULICO:** Es la tasa de cambio en la cabeza dinámica de un fluido que se desplaza por una tubería.

**GRAVEDAD ESPECÍFICA:** Es la relación entre el peso del fluido y el peso de un volumen igual de agua (para líquidos) o de aire (para gases).

**NÚMERO DE REYNOLDS:** Cifra adimensional que permite determinar el flujo de un fluido en laminar o turbulento.

**PÉRDIDAS MENORES:** Se llaman pérdidas menores a aquellas pérdidas de energía en los fluidos, causada por fuerzas de fricción de codos, juntas, válvulas, etc.

**RAMIFICAR:** Vivir el subproblema actual en dos posibles soluciones óptimas.

**RAMIFICACION Y ACOTAMIENTO:** Algoritmo que resuelve un problema de programación entera binaria dividiéndolo en varios subproblemas cada vez más pequeños hasta que estos se puedan vencer.

**SONDEAR:** Eliminar un subproblema el cual no mejora la respuesta o no tiene solución. También puede tomarse como el subproblema de mejor solución óptima temporal si su solución de PL es entera.

**VISCOSIDAD:** Es la medida de la resistencia de un fluido al desplazamiento.

## **XIII**

### **RESUMEN**

La operación de una estación de bombeo típica involucra el manejo simultáneo de varios aspectos complejos. El proyecto atenderá tres de los más importantes que son: la distribución del producto, la minimización de los costos y la supervisión de los límites de seguridad en la operación de la línea.

El primer aspecto tiene que ver con la administración de los elementos que componen a una estación de bombeo ya que es muy importante para la empresa. Cuando se están transportando tantos productos al día y con unas rutas largas, las operaciones en estas estaciones se vuelven demasiado complejas y se requiere de un esfuerzo al máximo. El proyecto tiene como producto final crear un sistema que el usuario pueda manejar de una manera más sencilla todos estos elementos y que a la vez la aplicación sirva como herramienta de trabajo para el manejo de una estación de bombeo sin riesgo alguno.

El segundo es el costo elevado por la utilización de los recursos. El reducir este problema conlleva a que la empresa ahorre una cantidad alta de dinero la cual puede ser empleada en otras áreas que lo necesitan. Toda empresa de transporte de productos derivados del petróleo, tienen como objetivo preservar los recursos que intervienen en el desarrollo de las operaciones diarias en estaciones de bombeo de tal forma que se utilice la mínima energía de los elementos para transportar el mayor producto posible de un lugar a otro. El proyecto toma como herramienta de solución, la

programación matemática, creando un modelo matemático que minimice el costo por la utilidad de los elementos y se pueda transportar la máxima cantidad de producto.

El último está dado por las dos razones anteriormente dichas. El ahorro del 5% de un recurso significa un ahorro de dinero alto, lo cual el proyecto da como resultado un sistema que ayuda al usuario a tomar la decisión correcta previniendo un error en las actividades y una reducción en los costos.

## INTRODUCCION

La programación matemática es una potente técnica de modelado usada en el proceso de toma de decisiones. Cuando se trata de resolver un problema de este tipo, la primera etapa consiste en identificar las posibles decisiones que pueden tomarse; esto lleva a identificar las variables del problema concreto. Normalmente, las variables son de carácter cuantitativo y se buscan los valores que optimizan el objetivo. La segunda etapa supone determinar que decisiones resultan admisibles; esto conduce a un conjunto de restricciones que se determinan teniendo presente la naturaleza del problema en cuestión. En la tercera etapa, se calcula el coste/beneficio asociado a cada decisión admisible; esto determina una función objetivo que asigna, a cada conjunto posible de valores para las variables que determinan una decisión, un valor de coste/beneficio. El conjunto de todos estos elementos define el problema de optimización. La herramienta GAMS ayuda a resolver todo tipo de problema matemático sin embargo la solución no garantiza que sea la mas optima. Con el algoritmo de Ramificación y Acotamiento se resuelve este problema y con la ayuda de un lenguaje de programación se quiere desarrollar el algoritmo y la creación del problema matemático que resolverá GAMS y así llegar a la respuesta mas optima.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Implementar una metodología de optimización matemática global sobre el problema de determinación de condiciones de operación en estaciones de bombeo en un oleoducto.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Desarrollar un modelo matemático de optimización basada en programación no lineal y técnicas de ramificación y acotamiento para hallar las condiciones óptimas de operación de un oleoducto, a saber:
  - Disposición de elementos dentro de la estación.
  - Principales parámetros de operación de las unidades de bombeo y de las válvulas de control.  
Teniendo en cuenta restricciones operacionales y de tipo hidráulico en el oleoducto.
- Desarrollar una interfaz gráfica de usuario en Visual Basic para introducir los parámetros necesarios en la corrida del modelo en GAMS y la posterior visualización de los resultados del modelo.
- Usar datos de un oleoducto real con el fin de determinar la eficiencia del algoritmo desarrollado.

## **2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN**

La programación matemática es una potente técnica de modelado usada en el proceso de toma de decisiones. Cuando se trata de resolver un problema de este tipo, la primera etapa consiste en identificar las posibles decisiones que pueden tomarse; esto lleva a identificar las variables del problema concreto. Normalmente, las variables son de carácter cuantitativo y se buscan los valores que optimizan el objetivo. La segunda etapa supone determinar que decisiones resultan admisibles; esto conduce a un conjunto de restricciones que se determinan teniendo presente la naturaleza del problema en cuestión. En la tercera etapa, se calcula el coste/beneficio asociado a cada decisión admisible; esto determina una función objetivo que asigna, a cada conjunto posible de valores para las variables que determinan una decisión, un valor de coste/beneficio. El conjunto de todos estos elementos define el problema de optimización.

Esta programación matemática se puede aplicar en los campos de la industria petrolera, como en las operaciones de oleoductos ya que es un problema de transporte donde se quiere optimizar el costo de envío de los productos de un lugar a otro y los costos de operación. La optimización se hace en las operaciones que se efectúan en las estaciones de bombeo. Una estación de bombeo es el elemento principal de una línea del oleoducto. Es desde allí que se genera la energía que impulsará los productos a través del oleoducto. Los datos que el sistema almacena sobre cada estación se pueden clasificar en dos tipos: Básicos y Operacionales.

Los datos básicos son: La ubicación, la altura y el tipo de estación; los datos operacionales serían: Presión de succión en cada estación, presión de descarga en cada estación, velocidades de las unidades de bombeo en cada estación, caudal de entregas en cada estación etc.

El elemento principal de una estación es la unidad de bombeo. Cada estación tiene un número determinado de unidades de bombeo, las que pueden ser centrifugas o reciprocantes. Esta es alguna de la información que se almacena de cada unidad de bombeo:

En bombas centrifugas los datos básicos son: Nombre de la estación, código de identificación, tipo de unidad, potencia máxima, máxima y mínima velocidad de operación permitida por la unidad, caudal máximo y mínimo permitido para la unidad, en galones por minuto y presión mínima de succión. Los datos Operacionales son: Disponibilidad, estado que indica si la unidad está prendida o apagada en un momento dado, Velocidad del motor de la unidad y energía consumida.

En las bombas reciprocantes los datos básicos son: Nombre de la estación, tipo de acción, recorrido o longitud de la cámara por la cual se mueve el émbolo, en pulgadas, número de pistones, diámetro del pistón, presión máxima y eficiencia volumétrica. En cuanto a datos Operacionales: Disponibilidad, Estado, caudal actual manejado por la bomba y Cabeza de presión en la unidad. Todo esto con el fin de cumplir el programa de bombeo a un costo mínimo o un flujo máximo.

Los procesos que se llevan a cabo en estas estaciones son el de calcular los incrementos de presión causados por las bombas, calcular las caídas de presión debido a los elementos que forman resistencias, calcular las caídas de presión debido a las condiciones de terreno. Ya que el fluido debe llegar con cierta presión (dentro de límites mínimos y máximos) a cada estación, hay puntos críticos en la ruta del oleoducto donde la presión debe estar dentro de un rango específico. Las caídas de

presión, ya sea en elementos o en la ruta, dependen del tipo de producto (densidad) entre otros.

Debido a los múltiples elementos que hay que tener en cuenta, todas estas tareas implican un costo elevado y hacerlo manualmente es muy tedioso, además de que el riesgo de perder mucho dinero es alto, sin embargo, un porcentaje pequeño en el ahorro (5%) de estos costos es significativo por ello la necesidad de crear un sistema que reduzca dichos inconvenientes.

### **3. ANTECEDENTES**

La Facultad de Ingeniería de Sistemas de la UNAB cuenta en la actualidad con varios docentes que poseen fortalezas en el área de optimización matemática, tal es el caso de Alina Fedosova, Henry Lamus, Juan Carlos García Díaz y Javier Hernández. Sin embargo, aún no se cuenta con una línea de investigación en la materia, y tan solo se ha propuesto que a largo plazo se pueda abrir la maestría de optimización matemática, pero sin que hasta el momento se haya concretado o formalizado.

Un grupo de profesores concibió la idea de plantear varios proyectos en el área buscando con esto la formación de un pequeño grupo de estudio que sirva de refuerzo de la línea de investigación en optimización matemática. Este proyecto de grado surge entonces, como aporte a la Facultad de Ingeniería de Sistemas de la UNAB en el proceso de fortalecer esta línea de investigación.

Se ha decidido enfocar este proyecto hacia la optimización en la operación de oleoductos gracias a que uno de los docentes que lidera la creación del grupo de investigación tiene nexos con una empresa de transporte de hidrocarburos, así como el interés del mismo en aplicar novedosas técnicas de optimización al problema del transporte en oleoductos. El proyecto también se ha concebido como un proyecto de investigación interno, con una financiación mínima y cubierta completamente por sus desarrolladores.

Para poder efectuar actividades de prueba del proyecto se requiere de datos reales, por ello se cuenta con un funcionario de la empresa transportadora de hidrocarburos, quien proporcionará la información necesaria. Para comprender la forma de operación de un oleoducto el director del proyecto será el encargado de brindar la asesoría necesaria para entender los principios y formas de operación de una red de transporte de hidrocarburos.

## **4. MARCO TEÓRICO**

Este apartado ha sido dividido en dos secciones, en la primera de ellas se habla de todo lo referente a optimización, como lo son los algoritmos y la herramienta que los implementa. Dentro de las técnicas se estudia en un comienzo la naturaleza de la programación no lineal entera mixta (MINLP), quien integra a los algoritmos de ramificación y acotamiento, pilar fundamental del proyecto; y el algoritmo de gradiente reducido generalizado, usado en la resolución de los subproblemas no lineales. Finalmente se analiza el lenguaje de modelamiento matemático GAMS, usado para resolver los problemas de optimización matemática. En la segunda parte se mencionan las propiedades físicas de los fluidos, que posteriormente son implementadas en las leyes de la dinámica de fluidos, como lo son la ecuación de continuidad y la ley de Bernoulli, usada para describir el transporte de los fluidos que rigen el modelamiento matemático. Por último se hace alusión a las características de los dos elementos más importantes en un sistema de oleoductos: las unidades de bombeo (bombas) y las estaciones de bombeo.

### **4.1 PROGRAMACIÓN NO LINEAL ENTERA MIXTA**

La programación no lineal entera mixta (MINLP) se refiere a los algoritmos de programación matemáticos que pueden optimizar variables continuas y enteras, en un contexto de no linealidad en la función objetivo y/o restricciones. La forma general de un MINLP es:

$$\begin{aligned}
Z = \min & C(y, x) \quad \text{w.r.t.} \quad y, x \\
\text{s.t.} & h(y, x) = 0 \\
& g(y, x) < 0 \\
& y \in \{0, 1\}^m, \quad x \in \mathbb{R}^n
\end{aligned}$$

Los problemas de ingeniería de diseño son a menudo problemas de MINLP, puesto que implican la selección de una configuración o de una topología (que los componentes se deban incluir en el diseño) así como los parámetros de diseño de esos componentes, es decir, tamaño, peso, etc. La inclusión de un componente se puede representar por las variables binarias, mientras que los parámetros de diseño son continuos. Generalmente, las variables 0-1 aparecen en una forma lineal y las variables continuas exhiben la no lineal.

Los problemas de MINLP son NP-completos y hasta hace poco tiempo se han considerado extremadamente difíciles. Sin embargo, con los actuales métodos de estructuración de problemas y la tecnología informática, son ahora posibles de resolver. Los algoritmos importantes para solucionar problemas de MINLP incluyen: Ramificación y Acotamiento (Branch And Bound) [8], descomposición generalizada de los dobladores (GBD - generalized Benders decomposition), y aproximación externa (OA).

## 4.2 ALGORITMOS DE SOLUCIÓN DE LA PROGRAMACIÓN ENTERA

Algoritmos del PLE se basan en explorar el fantástico éxito de la PL en los cálculos con computadora. La estrategia de estos algoritmos implica tres pasos.

- I. Disminuya el espacio de la solución del PLE, reemplazando cualquier variable binaria y con la gama continua  $0 \leq y \leq 1$ , tachando las restricciones enteras de todas las variables enteras. El resultado de la disminución es una PL regular.
- II. Resuelva al PL e identifique su solución óptima continua.
- III. Empezando desde el punto óptimo continuo, añada restricciones especiales que modifiquen iterativamente el espacio de la solución del PL en una forma

que a la larga redirá un punto extremo óptimo que satisfaga los requerimientos enteros.

- IV. Se han desarrollado dos métodos generalizados para generar las restricciones especiales a las que nos referimos en el paso 3.
  - a. Método de ramificación y acotamiento (R y A)
  - b. Método del plano cortante

Aunque ninguno de estos métodos es consistentemente efectivo para resolver los PLE, la experiencia con los cálculos computarizados muestra que el método de ramificación y acotamiento es mucho más exitoso que el método del plano cortante. La desventaja principal del método de ramificación y acotamiento es que puede requerir la solución de una gran cantidad de subproblemas de NLP (que dependen del número de las variables de número entero).

El algoritmo de R y A se puede resumir de la siguiente manera. Suponiendo un problema de maximización, determinaremos una cota inferior inicial  $z = -\infty$  en el valor objetivo del PLE- Determine  $i = 0$ .

I. (sondear/acotar). Seleccione  $PL_i$ , el siguiente subgrupo a ser examinado.

Resultado  $PL_i$  y trate de sondearlo, utilizando una de tres condiciones.

- (a) El valor óptimo  $z$  de  $PL_i$  no puede producir un mejor valor objetivo que la cota inferior actual.
- (b)  $PL_i$  produce una solución entera factible mejor que la cota inferior actual.
- (c)  $PL_i$  no tiene una solución factible.

Se presentarán dos casos

- (a) Si se sondea  $PL_i$ , actualice la cota inferior si se encuentra una mejor solución del PLE. Si se han sondeado todo los subproblemas, deténgase; el PLE óptimo está asociada con la cota inferior actual, si la hay. De otra manera, haga  $i = i + 1$ , y repita el paso 1.

(b) Si no se sondea  $PL_i$ , vaya al paso 2 para efectuar la ramificación.

II. (ramificación). Seleccione una de las variables enteras  $x_j$ , cuyo valor óptimo  $x_j$  en la solución de  $PL_i$  no es un entero. Elimine la región  $[x_j] < x_j < [x_j] + 1$  (donde  $[v]$  define el entero más grande  $\leq v$ ) creando dos subproblemas de PL que corresponden a:

$$x_j \leq [x_j] \text{ y } x_j \geq [x_j] + 1$$

Determine  $i = i + 1$ , y vaya al paso 1.

#### 4.3 TÉCNICA DE RAMIFICACIÓN Y ACOTAMIENTO Y SU USO EN LA PROGRAMACIÓN ENTERA BINARIA

Cualquier problema de programación entera pura tiene un número finito de soluciones factibles, por lo que se puede usar algún tipo de *procedimiento de enumeración* para encontrar la solución óptima dentro del conjunto de soluciones factibles. Casi siempre dicho conjunto de soluciones factibles es muy grande, por lo que se requiere de un procedimiento que examine una pequeña fracción de dichas soluciones. Una de las técnicas para este muestreo es la programación dinámica pero no es muy eficiente su desempeño en la programación entera. La otra técnica que se puede usar es la de ramificación y acotamiento.

Ramificación y acotamiento se apoya en el principio *divide y vencerás*. Ya que resulta complejo resolver directamente el problema original, lo divide en subproblemas cada vez más pequeños hasta que estos se puedan vencer. La ramificación se realiza partiendo el conjunto de soluciones factibles en subconjuntos más pequeños. Posteriormente el sondeo se hace en parte acotando la mejor solución del subconjunto y luego descartando los subconjuntos cuya cota indique que no es posible que contenga una solución óptima para el problema original.

En resumen, la técnica de ramificación y acotamiento para la programación entera binaria cuenta con los siguientes pasos:

**Paso inicial:** se establece  $Z^* = -\infty$ . Se aplican al problema completo, el paso de acotamiento, el paso de sondeo y la prueba de optimalidad que se describen. Si no se sondea, este problema se clasifica como el único subproblema restante para realizar la primera iteración completa.

Pasos para cada iteración:

- I. **Ramificación:** entre los subproblemas restantes (no sondeados) se elige el de creación más reciente. (Los empates se rompen con el que tenga la cota más grande). Se ramifica este nodo en ese subproblema, para crear dos nuevos subproblemas fijando la siguiente variable (la variable de ramificación), ya sea en 0 o en 1.
- II. **Acotamiento:** para cada nuevo subproblema se obtiene su cota aplicando el método simplex a su soltura de PL y redondeando hacia abajo el valor de Z en la solución óptima que resulta.
- III. **Sondeo:** para cada nuevo subproblema se aplican las tres pruebas de sondeo y se descartan aquellos subproblemas que quedan sondeados por cualquiera de las tres pruebas.

Un subproblema se *sondea* (elimina) si

*Prueba 1:* su cota  $\leq Z^*$ ,

o

*Prueba 2:* su soltura de PL no tiene soluciones factibles,

o

*Prueba 3:* la solución óptima para su soltura de PL es *entera*. (Si esta solución es mejor que la de apoyo, se convierte en la nueva solución apoyo, se convierte en la nueva solución de apoyo y se aplica de nuevo la prueba 1 a todos los subproblemas no sondeados, con la nueva  $Z^*$  mejor)

*Prueba de optimalidad:* el proceso termina cuando no existen subproblemas restantes, la solución *incumbente* o de apoyo actual es *óptima*. De otra manera, se realiza otra iteración.

#### **4.4 GRADIENTE REDUCIDO GENERALIZADO (GRG)**

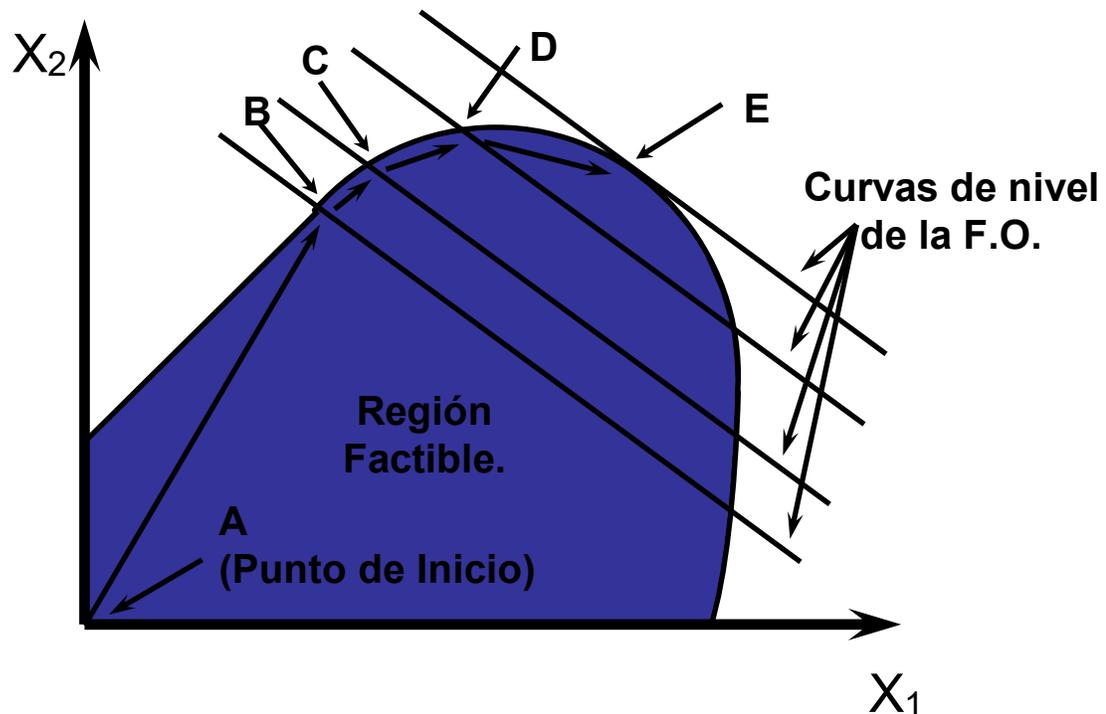
Básicamente, al igual que otros algoritmos de programación no lineal, parte de una solución factible conocida como punto inicial.[3] El algoritmo intenta entonces moverse, a partir de este punto, en una dirección a través de la región factible, de tal forma que el valor de la función objetivo mejore. Tomando un salto o movimiento determinado en dicha dirección factible, se pasa a una nueva solución factible mejorada. De nuevo, el algoritmo identifica una nueva dirección factible, si existe, y un salto determinado avanzando hacia una nueva solución factible mejorada. El proceso continúa hasta que el algoritmo alcanza un punto en el cual no existe una dirección factible para moverse que mejore el valor de la función objetivo. Cuando no hay posibilidad de mejora, o el potencial para tal mejora es arbitrariamente pequeño, el algoritmo finaliza. Ahora bien, en ese momento la solución es un *óptimo local*, y por tanto no necesariamente *global* [4].

El proceso de solución del GRG(Figura 1), al igual que otros muchos algoritmos de programación no lineal, calcula valores de la primera derivada parcial de la función objetivo y de las restricciones en cada iteración. La opción «Derivadas» fija cómo se realiza dicho cálculo. La alternativa «progresivas» considera conjuntamente el punto de la iteración anterior y el actual, con lo cual reduce el tiempo de computación requerido por la diferenciación finita (este tiempo se estima que puede llegar a suponer el 50 por ciento del tiempo total de resolución).

La opción «centrales» tan solo considera el punto actual, lo cual conlleva un mayor tiempo de cálculo que puede sin embargo resultar adecuado si las derivadas cambian rápidamente ya que permite realizar un menor número de iteraciones.

El método del GRG realiza asimismo una reducción del problema original a otro sin restricciones resolviendo un sistema de ecuaciones para ciertas variables - básicas - en términos del resto - no básicas -.

Figura 1. Estrategia de solución usada por GRG



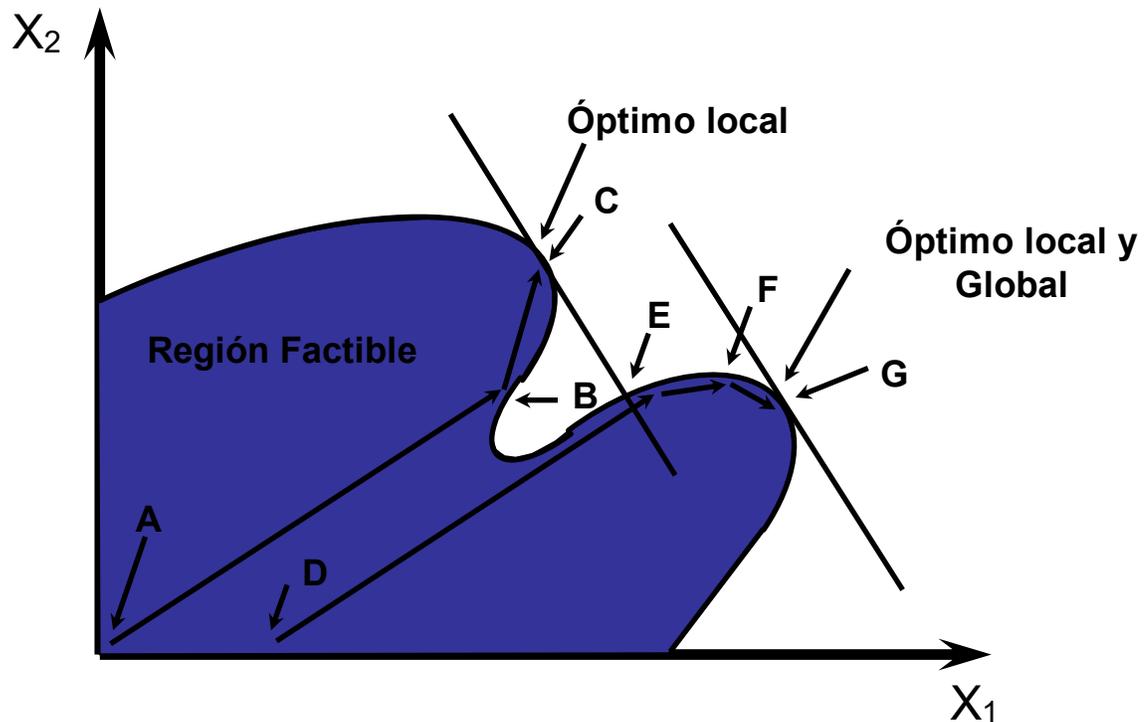
Entonces, se elige una dirección de búsqueda (un vector  $n$ -dimensional donde  $n$  es el número de variables no básicas) a lo largo de la cual se establece una mejora de la función objetivo. La opción «Hallar por» fija el criterio para determinar esta dirección de búsqueda.[3]

Para mejorar la solución de un problema de programación no lineal del proceso del gradiente reducido generalizado, se le agrega a este el algoritmo de Ramificación y Acotamiento para crear dos subproblemas e ir verificando cual tiene una mejor solución (Figura 2).

#### 4.4.1 Algoritmo de Gradiente Reducido Generalizado

- I. Inicializar y buscar una posible solución.
- II. Computar el Jacobiano de las restricciones  $J$ .
- III. Seleccionar un conjunto de  $n$  variables básicas,  $x_b$ , tal que  $B$ , la submatriz de columnas básicas de  $J$ , es no singular. Factorizar  $B$ , las variables restantes son llamadas no básicas.

Figura 2. Estrategia de Ramificación y Acotamiento Utilizando GRG



- IV. Resolver BT  $u = df / dx_b$  para las múltiples  $u$ .
- V. Computar el gradiente reducido,  $r = df / dx - J^T u$ ,  $r$  por definición es cero para las variables básicas.
- VI. Si el  $r$  proyectado es pequeño en los límites, se detiene. El punto actual es cercano al óptimo.
- VII. Seleccionar el conjunto de supervariables  $x_s$ , como un subconjunto de variables no básicas que pueden ser cambiadas, y hallar una nueva dirección de búsqueda  $d_s$  para las variables superbásicas basadas en  $r_s$ .
- VIII. Realizar una búsqueda lineal a lo largo de la dirección  $d$ . Para cada paso,  $x_s$  es cambiado en la dirección  $d_s$  y  $x_b$  es subsecuentemente ajustado para

satisfacer  $g(x_b, x_s) = b$  en un proceso Pseudo Newton usando el factorando  $B$  del paso 3.

IX. Ir al paso 2.

## 4.5 GAMS

*Sistema de Modelamiento Algebraico General* (General Algebraic Modeling System) es un lenguaje de programación que permite el modelado, análisis y resolución de diversos problemas de optimización como el que estamos tratando en este proyecto. Aunque inicialmente el manejo y comprensión de sus estructuras requiere cierto esfuerzo, una vez entendidas se dispone de una herramienta muy versátil capaz de resolver problemas de programación matemática. A pesar de ser una magnífica herramienta, la interfaz no es muy agradable por lo cual se requiere de un lenguaje de programación con lo es Visual Basic 6 donde se diseñen interfaces graficas potentes y de fácil uso para le usuario final. El Usuario, por medio de la aplicación, podrá configurar todos los elementos necesarios para crear el modelo matemático que luego solucionará la herramienta GAMS. Las dos características principales de la herramienta son:

1) Su capacidad para pasar de resolver problemas de pequeña dimensión (docenas de variables y restricciones) a problemas mayores (miles de variables y restricciones) sin variar el código sustancialmente. El manejo eficiente de sus índices permite escribir de manera compacta restricciones similares mediante una sola restricción.

2) Separa el proceso de modelado del proceso de resolución del problema. Así, el usuario de GAMS debe ser capaz de conseguir una formulación consistente del problema, y una vez la expresa en la notación de GAMS, este lenguaje hace uso de alguno de los optimizadores disponibles para obtener su solución. De esta manera, el

usuario sólo ha de centrarse en obtener un modelo del problema y puede ignorar el funcionamiento interno del algoritmo que se necesita para resolverlo. La separación de estas dos tareas permite cambiar el modelo para mejorarlo o completarlo cómodamente [9].

## 4.6 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

Los fluidos son aquellas sustancias capaces de desplazarse y que se deforman continuamente bajo la acción de esfuerzos cortantes; sus partículas se desplazan fácilmente cambiando su posición sin crear separación de masas, no ejerciendo resistencia considerable a los cambios de forma, de ahí su adaptación a la forma del recipiente que los contiene.

Los líquidos son en la práctica incompresibles y una masa definida ocupa sólo una porción del volumen del recipiente contenedor, contrario a estas características son el otro tipo de fluidos, los gases, quienes son compresibles, no poseen superficies libres y una masa definida ocupa todo el volumen del recipiente contenedor.

### 4.6.1 Propiedades Fundamentales

**4.6.1.1 Peso Unitario o Específico.** Se define como el peso de la unidad de volumen del fluido[11]. En los líquidos se puede considerar como constante para las variaciones ordinarias de presión, pero en los gases varía con la presión, temperatura, elevación y situación geográfica.

$$\gamma = \frac{P}{V}$$

Donde  $\gamma$  es el peso específico,  $P$  es el peso ( $m \cdot g$ ) y  $V$  es el volumen. También se puede expresar en términos de la densidad:

$$\gamma = \rho \cdot g$$

Donde  $\rho$  es la densidad y  $g$  la gravedad.

**4.6.1.2 Densidad.** Se define como la masa del fluido por unidad de volumen[12].

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Donde  $\rho$  es la densidad,  $m$  la masa y  $V$  el volumen. A partir de esto se tiene que el volumen específico es el inverso de la densidad.

$$\bar{V} = \frac{1}{\rho} ; \quad \rho = 1/\bar{V}$$

**4.6.1.3 Gravedad Específica.** Esta propiedad tiene particularidades distintas dependiendo de si es un fluido líquido o gaseoso[13]. En general, es la relación entre el peso del fluido y el peso de un volumen igual de agua (para los fluidos líquidos) o entre el peso del gas y el peso específico del aire: tanto para líquidos como para gases se deben cumplir ciertas condiciones estandar.

**4.6.1.4 Viscosidad.** Es aquella propiedad de un fluido por virtud de la cual ofrece resistencia al corte[14]. La viscosidad es una medida de la resistencia del fluido al desplazamiento. La viscosidad de una gas aumenta con la temperatura, pero la viscosidad de un líquido con la temperatura. Existen dos tipos de viscosidad, la dinámica o absoluta y la cinemática.

Para la viscosidad absoluta se tiene:

$$\mu = \frac{\tau}{dV/dy}$$

Todos los fluidos que cumplen esta ecuación, se denominan fluidos Newtonianos.

La viscosidad cinemática es la razón de viscosidad o densidad de masa. Este tipo de viscosidad varía fuertemente con la presión en los gases.

$$v = \frac{\mu}{\rho}$$

**4.6.1.5 Cohesión.** Es la atracción molecular entre las moléculas semejantes y son interacciones que se manifiestan entre las cargas eléctricas fundamentales. (electrones y núcleos)[13]. En los líquidos esta propiedad influye en los fenómenos de volatilidad, punto de ebullición y solubilidad.

**4.6.1.6 Adhesión.** Es la atracción molecular entre moléculas diferentes. Cuando la adhesión entre dos superficies se manifiesta por fuerzas de valencias del mismo tipo, se denomina específica y cuando es por acción de interconexión, mecánica.

## 4.7 DINÁMICA DE LOS FLUIDOS

Contrariamente a lo que sucede con los sólidos, las partículas de un fluido en movimiento pueden tener diferentes velocidades y estar sujetas a distintas aceleraciones.

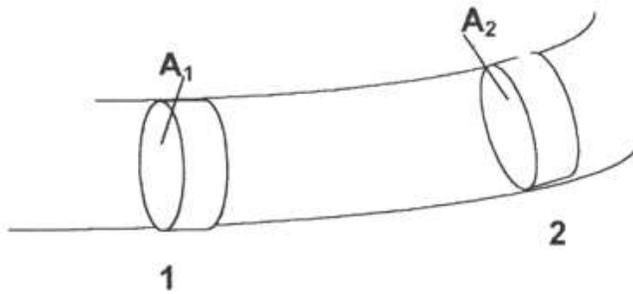
**4.7.1 Ecuación de Continuidad.** La ecuación de continuidad se basa en el principio de conservación de la masa[14]. Para un flujo permanente, la masa de fluido que atraviesa cualquier sección de una corriente de fluido, por unidad de tiempo, es constante. Al tener un tubo lleno de un fluido incomprensible fluyendo se toman dos puntos de control 1 y 2 se tendrán dos secciones transversales de área  $A_1$  y  $A_2$ , y el fluido poseerá igual masa en ambos puntos debido a que no hay escapes ni fuentes para el mismo. Por lo tanto se cumple:

$$\frac{M_1}{t_1} = \frac{M_2}{t_2}$$

Se puede entonces demostrar que:

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2 \quad (\text{Ecuación de continuidad})$$

Figura 3. Ley de Continuidad



De donde  $\rho$  es la densidad del fluido y  $v$  la velocidad del fluido en el punto. Para fluidos incomprensibles se tiene que  $\rho$  es la misma en los dos puntos de referencia por lo cual se cumple que:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 = \text{Constante}$$

El producto  $Av$  se conoce como flujo, que permanece constante a lo largo de un tubo si no varían las condiciones en los extremos. Por lo tanto cuando disminuye el área del tubo la velocidad aumenta y viceversa.

**4.7.2 Ecuación de Bernoulli.** la Ecuación de Bernoulli es la ecuación fundamental de la dinámica de los fluidos[14].

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Y_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Y_2$$

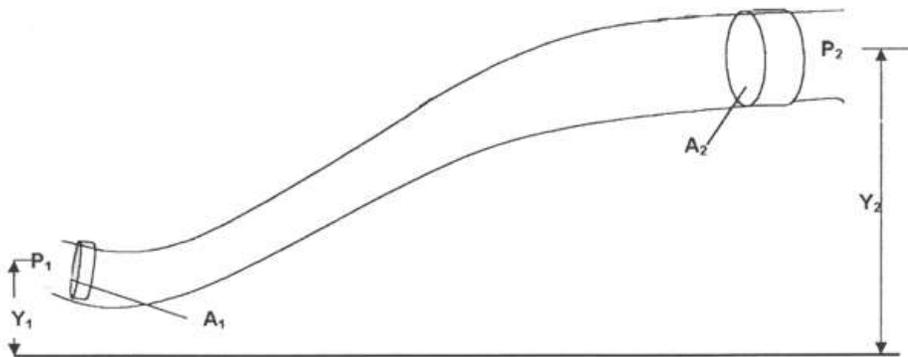
Que nos indica que la energía se transforma pero se conserva (conservación de la energía, primera ley de la termodinámica).

La ecuación indica que una partícula del fluido obtiene energía de tres formas:

- Por su posición (Potencial)
- Por su movimiento (Cinética)
- Y por su compresión (Presión)

Es decir, la partícula conserva su energía al pasar del punto 1 al punto 2; considerando previamente que se trata de un flujo en el que no hay pérdidas por fricción.

Figura 4. Ley de Bernoulli



**4.7.3 Flujo Laminar.** En el flujo laminar, las partículas de fluido se mueven a lo largo de trayectorias más o menos rectas, estas trayectorias se llaman líneas hidrodinámicas y se deslizan suavemente unas sobre otras paralelas al tubo. El flujo laminar está regido por la ley de Newton de la viscosidad[13].

$$\tau = \mu \frac{\delta u}{\delta y}$$

**4.7.4 Flujo Turbulento.** El flujo turbulento ocurre cuando la velocidad promedio es muy grande. En este tipo de flujo no existen líneas hidrodinámicas bien definidas. El fluido se está mezclando continuamente y la velocidad a lo largo del tubo tiene una distribución más plana. Para este flujo es necesario agregar un nuevo elemento a la ecuación de Newton de la viscosidad[13].

$$\tau = (\mu + \eta) \frac{\delta u}{\delta y}$$

Donde  $(\mu + \eta)$  es función del movimiento y de la densidad del fluido.

**4.7.5 Número de Reynolds.** El Número de Reynolds permite caracterizar la naturaleza del escurrimiento de un fluido, es decir, determina si se trata de un flujo laminar o un flujo turbulento; así como su tendencia relativa de pasar de un flujo turbulento a uno laminar[14].

Se dice que dos escurrimientos son dinámicamente semejantes cuando:

1. Ambos sistemas son geoméricamente semejantes, es decir, cuando se tiene una relación constante entre dimensiones de longitud correspondientes.
2. Las correspondientes familias de Línea de Corriente son geoméricamente semejantes o las presiones en puntos correspondientes forman una relación constante.

$$Re = \frac{v l \rho}{\mu}$$

Al cambiar la longitud característica por el diámetro D de la tubería se obtiene:

$$Re = \frac{v D}{\nu}$$

$$Re = \frac{\text{pie/seg} \times \text{pie}}{\text{Pie}^2/\text{seg}} = \frac{\text{metro/seg} \times \text{metro}}{\text{metro}^2/\text{seg}}$$

**4.7.6 Pérdidas por Fricción en Tuberías.** El desplazamiento de fluidos en tuberías está siempre acompañado de rozamiento de las partículas del fluido entre sí y, consecuentemente, por la pérdida de energía disponible; es decir, existe una pérdida de presión en el sentido del flujo[13].

Por experimentos se ha demostrado que las pérdidas para flujos turbulentos presentan las siguientes características:

- Varían directamente con la longitud del tubo
- Varían con el cuadrado de la velocidad
- Varían con el inverso del diámetro
- Dependen de la rugosidad de la pared del tubo
- Dependen de las propiedades de densidad y viscosidad del fluido
- Son independientes de la presión

La ecuación general de la pérdida de presión, conocida como la fórmula de Darcy Weisbach y que expresa la altura del fluido, es:

$$h = f \frac{L V^2}{D 2 g}$$

De donde f es el factor de fricción.

Con esta ecuación se obtiene la pérdida de presión por rozamiento y se aplica a tubería cuyo diámetro y densidad del fluido que la atraviesa son constantes, y que es recta. Para tuberías verticales, inclinadas o de diámetro variable, el cambio de presión debido a cambios de elevación ó velocidad del fluido debe hacerse de acuerdo con el teorema de Benoulli[14].

$$Y_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = Y_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + h$$

**4.7.7 Factor de Fricción.** La fórmula de Darcy Weisbach puede deducirse por análisis dimensional con la excepción del factor de fricción f, que debe ser determinado experimentalmente[14]. El factor de fricción para condiciones de flujo laminar ( Re < 2000 ) es función sólo del número de Reynolds; mientras que para el flujo turbulento ( Re > 4000 ) es también función del tipo de pared de la tubería. Si el flujo es laminar (Re<2000), el factor de fricción puede determinarse a partir de la ecuación:

$$F = \frac{64}{Re}$$

Re

Cuando el flujo es turbulento (  $Re > 4000$ ) el factor de fricción depende no sólo del número de Reynolds, sino también de la rugosidad relativa de las paredes de la tubería,  $\epsilon/d$ , es decir, la rugosidad de las paredes de la tubería ( $\epsilon$ ) comparada con el diámetro de la tubería ( $d$ ).

**4.7.8 Pérdidas Menores.** Aquellas pérdidas que ocurren en tuberías debido a la presencia de codos, juntas, válvulas, etc., se llaman pérdidas menores. Este es un nombre equivocado porque podrían llegar a ser más importantes que las debidas a fricción en el tubo. En casi todos los casos, las pérdidas menores se determinan experimentalmente[13].

La ecuación que expresa las pérdidas en una expansión se define así:

$$h_e = K \frac{V_1^2}{2 \cdot g} = (1 - (D_1/D_2)^2)^2 \times \frac{V_1^2}{2 \cdot g}$$

Donde:

$$K = (1 - (D_1/D_2)^2)^2$$

Se puede deducir que la pérdida de carga varía con el cuadrado de la velocidad. Este resultado se cumple para todas las pérdidas menores en un flujo turbulento.

**4.7.9 Gradiente Hidráulico.** Como se ha visto hasta el momento, a medida que un fluido se desplaza dentro de un tubo, su energía va disminuyendo en razón a que la utiliza para oponerse a las fuerzas de fricción[14].

La tasa de cambio en la cabeza dinámica se denomina Gradiente hidráulico, y será uniforme si se dan las siguientes condiciones:

- Diámetro interno constante
- Rugosidad absoluta constante

- Viscosidad constante
- SGU constante

La unidad de medición del gradiente hidráulico es a menudo PSI/Km.

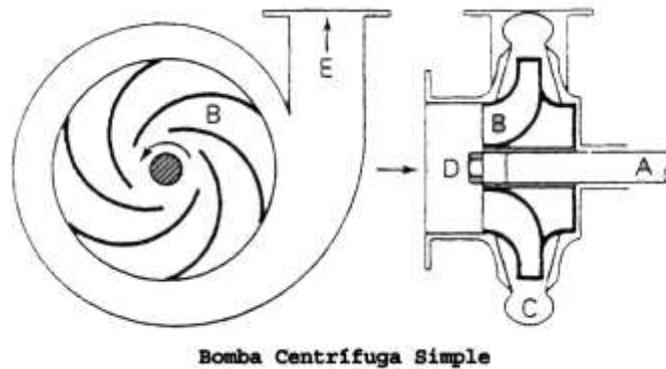
## 4.8 BOMBAS CENTRÍFUGAS

La bomba centrífuga es el tipo de dispositivo que más se utiliza en la industria química para transferir líquidos de todo tipo —materias primas, materiales de fabricación y productos acabados— así como también en servicios generales de abastecimiento de agua, alimentación a evaporadores, circulación en condensadores, retomo de condensados[11]. Etc

Las ventajas primordiales de una bomba centrífuga son su sencillez, el bajo costo inicial, el flujo uniforme (sin pulsos), los bajos costos de mantenimiento, y su capacidad de adaptación para su empleo con una unidad motriz de motor eléctrico o de turbina.

**4.8.1 Funcionamiento de una Bomba Centrífuga.** El funcionamiento de una bomba centrífuga puede observarse, de manera esquemática, en la Figura 5. A partir de una fuente externa. se le comunica potencia al eje A. que hace girar el impulsor B, situado en el interior de la carcasa estacionaria C. Los álabes del impulsor, al girar, producen una disminución de la presión en la entrada u ojo del impulsor. Esto hace que el líquido circule hacia el impulsor desde la tubería de succión D. Este líquido se ve obligado a salir, en la dirección de los álabes, a velocidades tangenciales crecientes. La carga de velocidad que adquiere el líquido. al abandonar los extremos de los álabes, se convierte en carga de presión al viajar a través de la cámara espiral y. por último, el líquido llega a la zona de descarga E[13].

Figura 5. Bomba Centrífuga Simple



**4.8.2 Características de las Bombas Centrífugas.** En la Figura 6 se muestra la típica curva característica de una bomba centrífuga. Es importante observar que, para cualquier valor de velocidad constante, la bomba funcionará a lo largo de esta curva y no en otros puntos. En las bombas con impulsores de velocidad variable, como las de turbina de vapor, es posible modificar la curva característica, como se muestra en la Figura 6[11].

La carga depende de la velocidad del fluido, o lo que es lo mismo, depende de la capacidad del impulsor para comunicar energía al fluido; es decir, que dependerá de la viscosidad del fluido y del diseño del impulsor. Resulta importante recordar que la carga o presión producida será siempre la misma para cualquier líquido puro con una misma viscosidad. No obstante, el aumento de presión variará proporcionalmente con la densidad relativa.

**4.8.3 Curvas de sistema.** Además del diseño de la bomba, el comportamiento de una bomba en funcionamiento depende de otros factores, tales como las características de carga aguas abajo, de la fricción de la tubería y del comportamiento de las válvulas. La relación típica existente entre la carga y el flujo es la siguiente[11]:

$$\frac{(Q_2)^2}{(Q_1)^2} = \frac{h_2}{h_1}$$

donde el subíndice 1 hace referencia a las condiciones de diseño y el subíndice 2 hace referencia a las condiciones reales de funcionamiento; y la referida ecuación, indica la variación de la carga con el cuadrado del caudal de agua.

#### 4.9 ESTACIONES DE BOMBEO

El elemento principal de una estación de bombeo son las unidades de bombeo o bombas; sin embargo, para garantizar que la estación opere de forma segura y bajo condiciones que permitan que el producto transportado no sufra cambios inesperados se requiere otros tipos de elementos, como lo son[14]:

Figura 6. Curva Característica de una Bomba Centrífuga

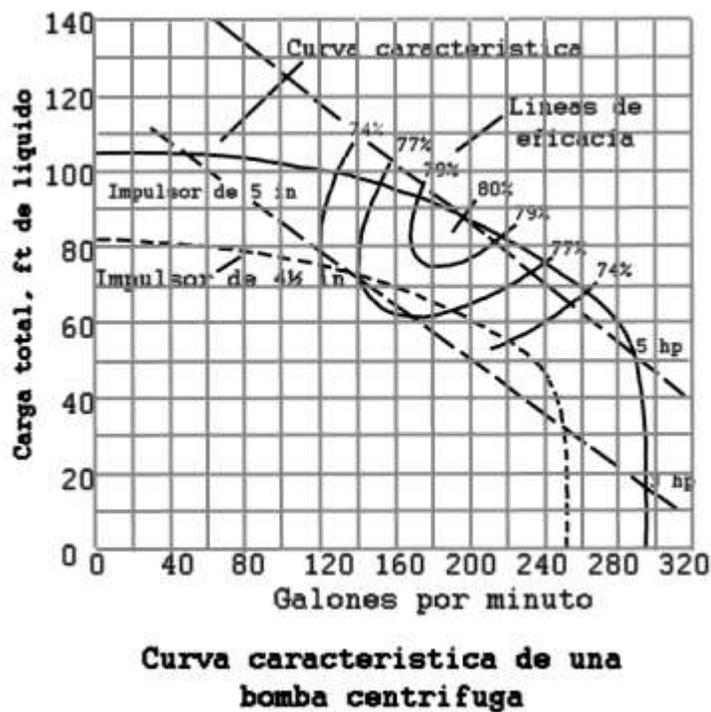
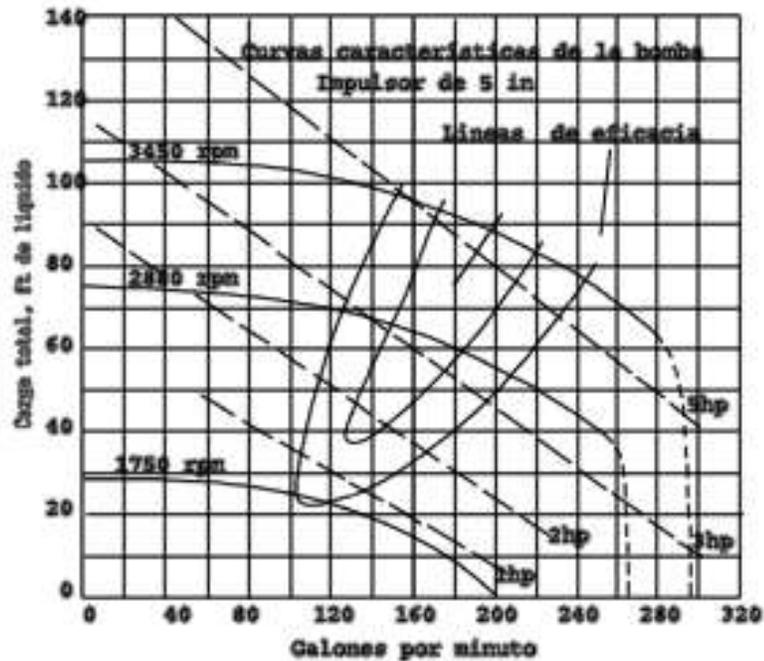


Figura 7. Galones por Minuto



tanques de almacenamiento, filtros, filtrosturbina, bombas de refuerzo, intercambiadores de calor, válvulas, bypasses, sistemas de medición y calibración, entre otros.

#### 4.9.1 Tipos de Estación

**4.9.1.1 Estación Inicial.** Es la que origina el sistema de transporte de productos. Dispone de tanques de almacenamiento[14].

**4.9.1.2 Estación Intermedia.** Caracterizan porque reciben el producto a baja presión de la estación anterior. Están ubicadas como estaciones de refuerzo y su función es darle la suficiente energía al producto para que llegue a la siguiente estación. No poseen tanques de almacenamiento[14].

**4.9.1.3 Estación mixta.** Es la combinación de una estación intermedia y una Terminal, por lo tanto cumple con la función de reimpulsar el producto como con la función de almacenarlo para su posterior distribución a distribuidores mayoristas[14].

**4.9.1.4 Estación Terminal.** Es la que esta localizada al final de un sistema de transporte de productos. Cuenta con tanques de almacenamiento para su posterior distribución a mayoristas[14].

## 5. DISEÑO METODOLÓGICO

### 5.1 ANÁLISIS

#### 5.1.1 Viabilidad del Proyecto

**5.1.1.1 Beneficios del Proyecto.** La operación de una estación de bombeo típica involucra el manejo simultáneo de varios aspectos complejos. Algunos de los más importantes son la distribución del producto, la minimización de los costos y la supervisión de los límites de seguridad en la operación de la línea.

El primer aspecto interviene tanto como personas como recursos. La administración de los elementos que componen a una estación de bombeo es muy importante para la empresa. Cuando se están transportando tantos productos al día y con unas rutas largas, las operaciones en estas estaciones se vuelven demasiado complejas y se requiere de un esfuerzo al máximo. El proyecto tiene como producto final sacar un sistema que deje manejar al usuario de una manera más sencilla todos estos elementos y que a la vez la aplicación sirva como herramienta de trabajo.

El segundo aspecto se refiere a reducir costos mediante la reducción de energía transportando la mayor cantidad de producto. El beneficio que busca el proyecto es garantizarle a la empresa transportadora de crudo la mejora en la utilidad de sus recursos y poder transportar una cantidad máxima de su producto.

El último beneficio que se busca es proteger las actividades en la operación de la línea para reducir los factores de riesgos que puede alterar el transporte del producto. Los beneficios que se obtienen son los siguientes:

- Ahorro de los recursos dando como resultado bajos costos cuando se está transportando el producto.
- Dar la mejor utilidad a los recursos de la empresa y a su vez preservarlos.
- Mejorar el rendimiento en cuanto al transporte del producto y así mejorar las actividades que se realizan diariamente en las estaciones de bombeo.
- Garantizar que la operación a realizar se harán de la mejor manera minimizando todo costo y maximizando el transporte del producto.
- Mayor facilidad para el desarrollo de las operaciones en las estaciones de bombeo por medio de una interfaz grafica donde el usuario se familiarice rápido.
- Permitir al usuario una gestión sencilla de los elementos necesarios para las actividades que se desarrollan en una estación de bombeo.

**5.1.1.2 Necesidad del Proyecto.** Debido a los múltiples elementos que hay que tener en cuenta en la operación de una estación de bombeo hay tres tipos de necesidades que se deben resolver para que las actividades diarias mejoren y a su vez se preserven los activos de la empresa.

El primero es el costo elevado por la utilización de los recursos. El reducir este problema conlleva a que la empresa pueda ahorrar una cantidad alta de dinero la cual puede ser empleada en otras áreas que lo necesitan. Toda empresa de transporte de productos derivados del petróleo, tienen como objetivo preservar los recursos que intervienen en el desarrollo de las operaciones diarias en estaciones de bombeo. Este objetivo es de utilizar la mínima energía de los elementos para transportar el mayor producto posible de un lugar a otro. Este ahorro de dinero es muy significativo para la empresa y por ello nace la necesidad de crear un sistema que comience a reducir la utilidad de algunos elementos de estas estaciones de bombeo.

La segunda necesidad es la administración de estas operaciones. Mejorar el sistema actual significa darle la posibilidad al trabajador de controlar todas estas actividades de una forma más sencilla, rápida y segura ya que el tiene que hacerlo manualmente es muy tedioso. El manejo de estas operaciones es muy importante porque la decisión que se tome debe ser la solución mas optima y un error daría perdidas alarmantes o las decisiones que se tomen pueden ser las menos factibles y se estén empleando más recursos de los necesarios. Con el sistema propuesto se garantiza que está administración será muy fácil de llevar, se gastará menos tiempo en las actividades y las operaciones reflejarán la calidad de la optimización.

La última está dada por las dos razones anteriormente dichas. El ahorro del 5% de un recurso significa un ahorro de dinero alto, si se presentará un error por un mal control de estos elementos la empresa sufriría una perdida gigante o si se toma una decisión incorrecta las actividades no sería las adecuadas trayendo un problema grave en una determinada operación. El riesgo de perder mucho dinero es elevado ya sea por no optimizar al máximo los recursos reduciendo la vida útil de este no se están haciendo las actividades correctamente por lo tediosas que son.

## **5.1.2 Análisis y Estudio del Sistema Actual**

**5.1.2.1 Descripción General del Sistema Actual.** La operación de una estación de bombeo típica involucra el manejo simultáneo de varios aspectos complejos. Algunos de los más importantes son la distribución del producto, la minimización de los costos y la supervisión de los límites de seguridad en la operación de la línea.

El control de una estación de bombeo es un problema de control multivariable interactivo, su principal propósito es dar la presión de descarga necesaria a un flujo dado que no cause problemas en la línea tanto antes como después de la estación. Al mismo tiempo, el sistema de control deberá proteger la línea por cambios de presión causados por otros factores. Se deben considerar la presión de succión y descarga,

el flujo, carga de los motores y el número de unidades de bombeo que están en operación.

- Tipo de operación: Una estación puede operar bajo uno de los siguientes tipos de operación:
  - Despacho
  - Recibo
  - Al paso (rebombeo o reducción de presión - No hay entrega en tanques)
  - Al paso con entrega (entrega en flujo compartido)
  - Fuera de línea

Dependiendo de la infraestructura que tengan, algunas estaciones sólo podrán operar bajo un subconjunto de tipos de operación. Si una estación cuenta con la infraestructura para manejar todos los tipos de operación, se dirá que es una estación de tipo combinada.

- Esquema de operación: Un esquema de operación es un arreglo específico de los elementos de una estación para un tipo específico de operación. Para cada tipo de operación se define siempre un esquema default (aunque pueden definirse cuantos esquemas se deseen, con los arreglos que se deseen) donde se habilitan todos los elementos correspondientes a dicho tipo de operación. Por ejemplo, en una estación intermedia (no es la inicial ni la final) de tipo combinada con almacenamiento, los siguientes esquemas default pueden ser definidos para cada tipo posible de operación:
  - Defaultd: Esquema donde aparecen habilitados todos los elementos involucrados en el despacho de productos desde la estación.
  - Defaultr: Esquema donde aparecen habilitados todos los elementos involucrados en el recibo de productos en la estación.
  - Defaultp: Esquema donde aparecen habilitados todos los elementos involucrados en la operación “Al paso”.

- Defaultpe: Esquema donde aparecen habilitados todos los elementos involucrados en el recibo de productos así como en el rebombeo de los mismos en la estación.
- Estaciones de bombeo: Una estación de bombeo es el elemento principal de una línea del oleoducto. Es desde allí que se genera la energía que impulsará los productos a través del oleoducto.

Los dos elementos principales en un sistema son las estaciones de bombeo y los trayectos que las conectan. Dentro de cada estación de bombeo se pueden distinguir los siguientes elementos:

- Unidades de bombeo centrifugas y reciprocantes: El elemento principal de una estación es la unidad de bombeo. Cada estación tiene un número determinado de unidades de bombeo, las que pueden ser centrifugas o reciprocantes.
- Válvulas de control: Un elemento importante en una estación de bombeo es la válvula de control. La válvula ayuda a reducir la velocidad del flujo mediante la apertura de la misma.
- Tanques de despacho y de recibo: Los tanques son los elementos encargados del almacenamiento temporal de líquido en la línea. Dentro de este sistema se distingue si el tanque es de recibo o de despacho de líquido.
- Filtros: Otro tipo importante de elementos corresponde a los filtros. Los filtros son usados para limpiar el líquido de impureza, pero introduce una caída de presión en el líquido.
- Filtros turbina: Un filtro turbina es un elemento en el cual se encuentran presentes un filtro y una turbina, combinando tanto los parámetros de configuración y operacionales de éstos.
- Intercambiadores: Los intercambiadores de calor presentes en la línea también introducen una caída de presión en el líquido. Para cada intercambiador se almacena la siguiente información.

- Resistencias: Las resistencias son elementos utilizados para simular y representar un conjunto de tuberías, a través de unos parámetros equivalentes que representan y producen la caída de presión que en la realidad genera dicho conjunto frente a diferentes caudales y productos. Las resistencias también son utilizadas para simular o representar turbinas, adicionando a sus parámetros los rangos de presión y medición característicos de estos elementos.
- Punto de succión y descarga: Un punto de succión corresponde al punto de entrada en una estación.
- Entrega externa: Este elemento representa un punto de entrada a la estación donde el despacho de productos se realiza desde un sistema externo a la línea que se está manejando. Cuando este elemento se encuentra activo, los elementos de la zona de despacho que se encuentran antes de él, se desactivan. Cuando este elemento se desactiva, ocurre lo contrario (los elementos anteriores se activan), lo cual quiere decir que nunca habrán dos puntos simultáneos de despacho.
- Recibo externo: Este elemento representa un punto de salida de la estación donde el producto se entrega a elementos de recibo que no están definidos en la estructura de almacenamiento de la estación.
- Bypasses: Los bypasses son secciones de tubería utilizados para desviar el paso del caudal para que no pase por uno o varios elementos. Estos elementos pueden ser: unidades de bombeo, filtros, filtros turbina, intercambiadores y resistencias. Aunque mucho menor que el elemento correspondiente, un bypass produce una caída de presión.
- Línea (Conjunto de trayectos): Un trayecto es el conjunto de tramos de tubería que unen el punto de descarga de una estación con el punto de succión de la siguiente estación. La línea es el conjunto de trayectos presentes en un sistema.

Los procesos que se llevan a cabo en estas estaciones son el de calcular los incrementos de presión causados por las bombas, calcular las caídas de presión

debido a los elementos que forman resistencias, calcular las caídas de presión debido a las condiciones de terreno, el fluido debe llegar con cierta presión (dentro de límites mínimos y máximos) a cada estación. Hay puntos críticos en la ruta del oleoducto donde la presión debe estar dentro de un rango específico. Las caídas de presión, ya sea en elementos o en la ruta, dependen del tipo de producto (densidad) entre otros.

Debido a los múltiples elementos que hay que tener en cuenta, todas estas tareas implican un costo elevado y hacerlo manualmente es muy tedioso, además de que el riesgo de perder mucho dinero es elevado, por ello la necesidad de crear un sistema que reduzca dichos inconvenientes y proteja los recursos de las estaciones de bombeo.

**5.1.2.2 Ventajas y Problemas.** La ventaja de los sistemas actuales se basa en la experiencia de los operarios ya que estas actividades las vienen trabajando desde hace mucho tiempo, dando seguridad en los procesos involucrados en la operación del sistema pero no garantizando que sean las condiciones mas optimas. La ventaja se da por los buenos resultados y es por ello que se utilizan.

El problema del sistema actual esta dado a los múltiples elementos que hay que tener en cuenta, todas estas tareas implican un costo elevado y hacerlo manualmente es muy tedioso, además de que el riesgo de perder mucho dinero es elevado, por ello la necesidad de crear un sistema que reduzca dichos inconvenientes.

### **5.1.3 Análisis y Estudio del Sistema Propuesto**

**5.1.3.1 Objetivo General.** Apoyar la toma de decisiones de los usuarios por medio del sistema de optimización matemática global para que garantice las mejores condiciones de operación en estaciones de bombeo.

**5.1.3.2 Alcance del Proyecto.** Crear un sistema de optimización matemática global que permita representar el comportamiento de las variables operativas de las estaciones de bombeo que forman parte del sistema a optimizar. El sistema debe

tener un ambiente amigable para la comunicación con el usuario por medio de un interfaz grafica diseñada en Visual Basic 6.0 que le ayudara a introducir y configurar los parámetros con los que se trabajará y así resolver el problema matemático para mostrarle los reportes finales. Estos resultados serán de ayuda para el usuario ya que él es el que directamente decide la operación a realizar.

El proyecto solo se encargará de analizar y optimizar dos elementos principales de una estación de bombeo para la optimización matemática estos elementos son las bombas y válvulas y será aplicable únicamente a las corridas dinámicas. Sin embargo deberá obtener los demás parámetros necesarios para una corrida dinámica y así poder crear el problema no lineal.

Se creara un método para la solución de problemas no lineales y se probará la eficacia de este frente a los actuales métodos. Este método será desarrollado con el algoritmo de Ramificación y Acotamiento y la herramienta GAMS.

Se estudiará la herramienta GAMS, aprendiendo primero a modelar problemas no lineales en ella, luego con el lenguaje de programación escogido crear un problema no lineal y que GAMS pueda resolverlo, entender como lo soluciona, como utiliza el gradiente reducido generalizado para dar solución y analizar la respuesta que arroja para luego visualizar de una forma clara y sencilla los valores óptimos para el problema analizado.

El método debe hallar el valor óptimo global de las variables a maximizar o minimizar de tal forma que cumplan con las restricciones operacionales y el programa de bombeo para el tiempo establecido (usualmente diario). Concretamente maximizar el caudal a través de la línea minimizando el costo de la energía requerida por las unidades de bombeo para transportar este caudal.

4Estudiar de una forma detalla las operaciones que a diario se realizan en un estación de bombeo, esto con el fin de sistematizarlas.

**5.1.4 Diagramas.** Para finalizar la fase de análisis se modeló el problema por medio de los Diagramas de Contexto (Figura 4) y de Flujo de Datos (Figura 5). Como resultado de los diagramas se crearon cinco módulos que se describieron detalladamente y que servirán para fase del diseño cuando se este desarrollando la estructura del sistema (Figura 4). Estos módulos contienen los procesos que fueron analizados y representados en el diagrama de flujo de datos [10].

#### **5.1.4.1 Diagrama de Contexto**

Ver Figura 8.

#### **5.1.4.2 Diagrama de Flujo de Datos.**

En el Anexo B se describen detalladamente cada modulo el cual contiene los proceso que fueron modelados en el Diagrama de Flujo de Datos.

Ver Figura 9.

#### **5.1.4.3 Diagrama de Entidad Relación**

Ver Figura 10.

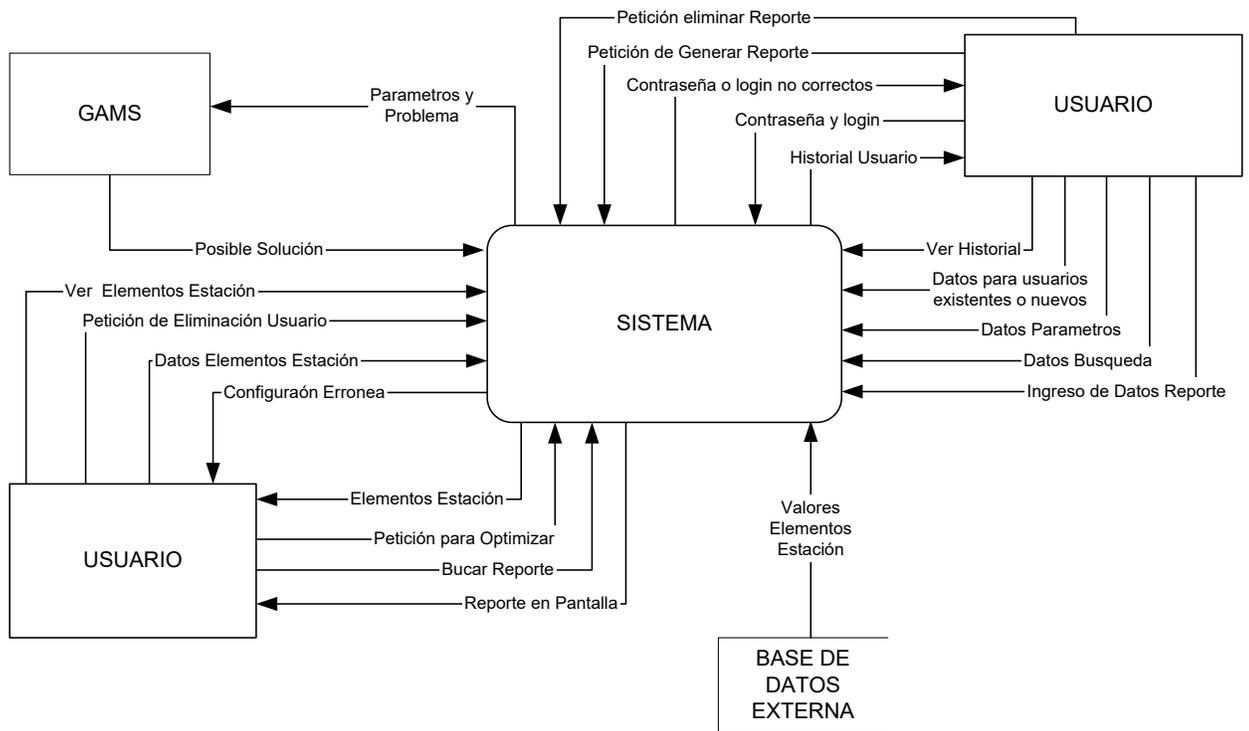
## **5.2 DISEÑO**

### **5.2.1 Ámbito**

#### **5.2.1.1 Objetivos del Sistema.**

- El sistema debe ser flexible para que el usuario pueda gestionar más fácil las operaciones de una estación de bombeo. Así el usuario podrá tener el control tanto del sistema como de dichas operaciones y que el sistema no presente fallas.

Figura 8. Diagrama de Contexto



- Generar reportes de los valores óptimos globales que fueron definidos por el usuario en la configuración de los elementos de una estación de bombeo.
- Tomar la información operacional diaria de un sistema de adquisición de datos y control supervisorios e incorporarla para la creación del modelo matemático. Luego este modelo se resolverá por el método diseñado y mostrará los resultados al usuario.
- Montar un ambiente grafico con el cual el usuario interprete rápidamente todos los componentes de esta interfaz y así pueda adaptarse fácilmente. Estos componentes gráficos son parte de los elementos que a diario trabajan los usuarios en las operaciones de las estaciones de bombeo.

Figura 9. Diagrama de Flujo de Datos

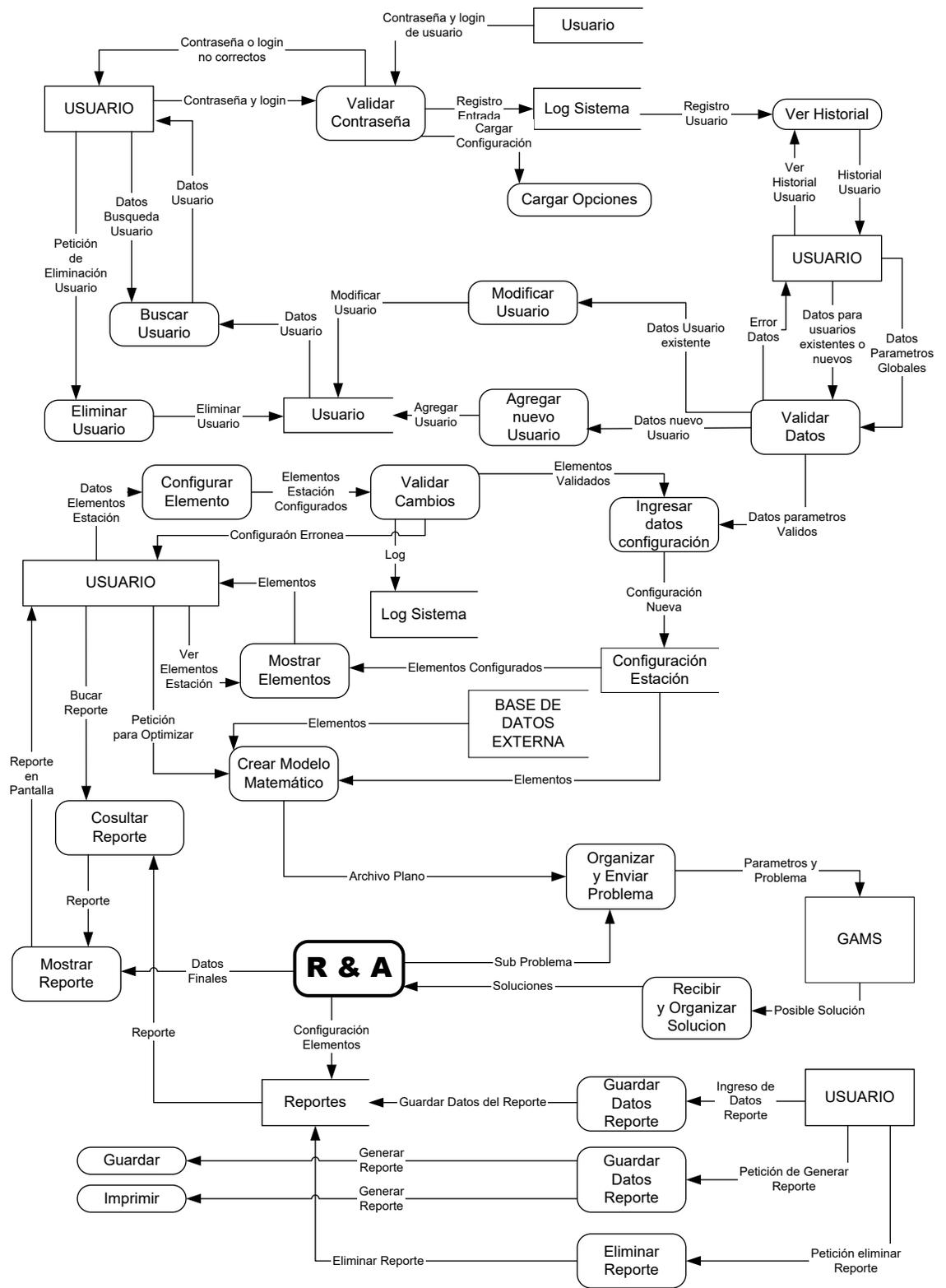
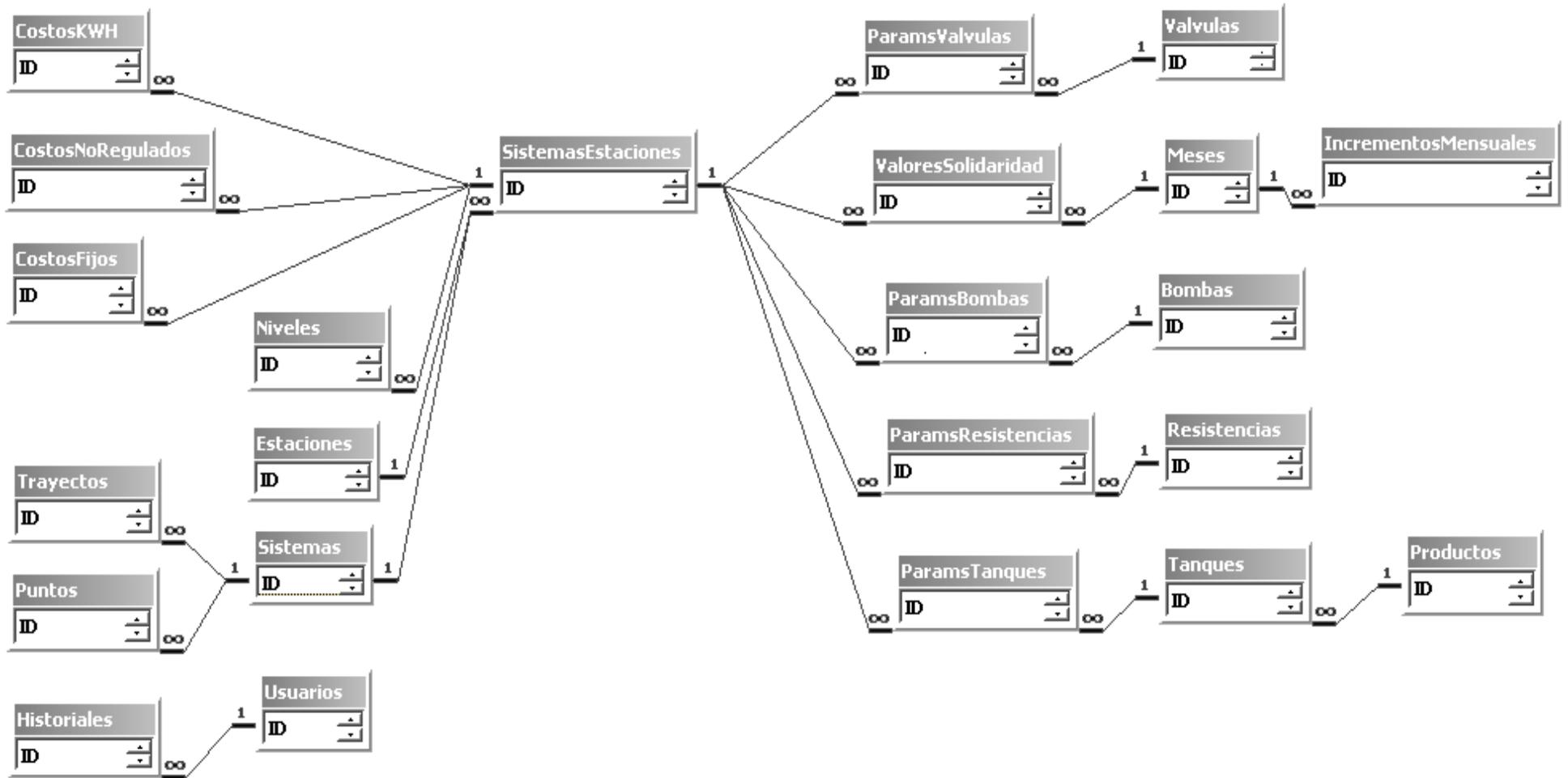


Figura 10. Diagrama Entidad Relación



### 5.2.1.2 Principales Requisitos del Hardware y Software

- Hardware: Los requerimientos de hardware recomendables pueden resumirse en los siguientes puntos:
  - Procesador Pentium IV de 1600 MHz
  - Memoria RAM de 256 MB
  - Disco Duro de 40 GB
  - Tarjeta de video de 2 MB
  - Tarjeta de red Ethernet
- Software: Para un desarrollo satisfactorio del sistema, serán requeridos los siguientes componentes de software:
  - Sistema Operativo Windows 98, recomendable Windows 2000 Professional con Service Pack 2
  - GAMS 2.0.7 con licencia para solvers CONOPT 3
  - Visual Basic 6.0
  - Microsoft Access 2000
  - MDAC 2.7

**5.2.1.3 Restricciones de Diseño, Limitaciones.** El sistema a desarrollar es afectado por las limitaciones presentadas a continuación. Dichas limitantes son independientes de los alcances del proyecto.

Las limitaciones en el diseño vienen impuestas por los elementos principales de una estación de oleoductos que fueron escogidos anteriormente para su modelación matemática y su respectiva visualización en pantalla o la impresión de estos como reporte final. La Interfaz con la cual el usuario estará interactuando solo dará acceso a estos elementos para su posible configuración y luego calculará los mejores valores para una determinada operación.

El diseño se ve condicionado por estos elementos elegidos y solo podrá trabajar con los parámetros que los componen de tal forma que en el desarrollo de la aplicación se enfoque solo en ellos como los únicos valores que se pueden tomar como variables y serán los que realmente se optimizan. Las otras restricciones también vienen impuestas por los elementos restantes de estas estaciones de bombeo ya que estos valores son necesarios para crear el modelo matemático pero se tomarán como variables constantes.

## **5.2.2 Diseño de Datos**

Ver Anexo C.

## **5.2.3 Diseño Arquitectónico**

**5.2.3.1 Revisión de Datos y del Flujo de Control.** El objetivo principal de esta fase fue crear una estructura del sistema y representar la relación de control entre los módulos. El diagrama de flujo de datos nos dio como resultado en una primera parte un sistema de transacción y luego un sistema de transformación.

### **5.2.3.2 Estructura del Programa**

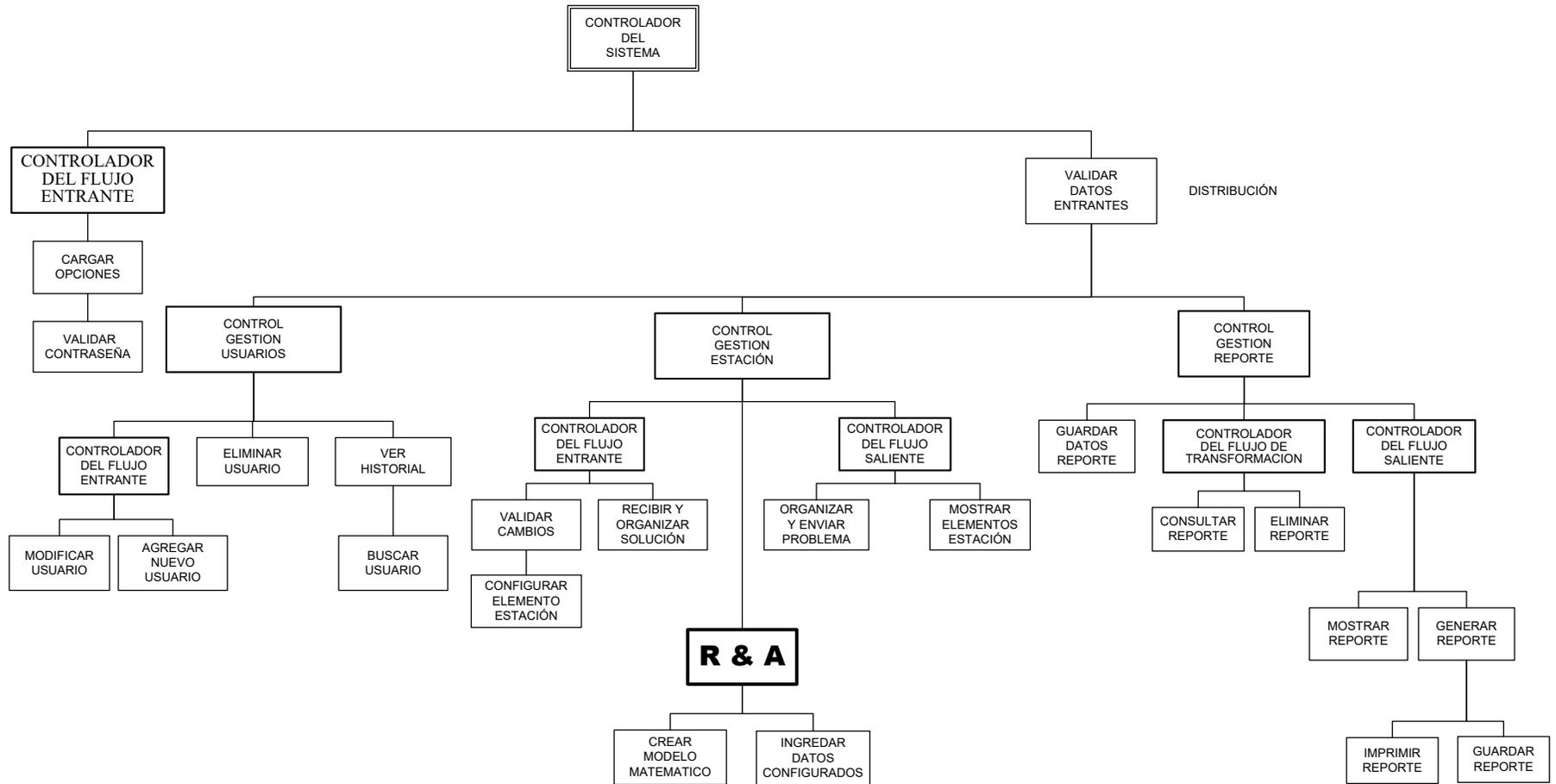
Ver Figura 11.

### **5.2.3.3 Normas de Diseño de Interfaz**

- Todas las variables globales están agrupadas dentro del módulo Variables.bas
- Las variables deben siempre iniciarse en mayúscula.
- Las tres primeras letras representan el tipo de dato de la variable, así:
  - Int para Integer
  - Str para String
  - Dbl para Double
  - Var para Variant
- Los nombres de variables deben ser lo más descriptivos posible, se pueden incluir números y en caso de ser una variable de nombre compuesto cada

palabra se debe iniciar en mayúscula, por ejemplo, una variable que describa el número de pasadas quedaría `IntNumPasadas`

Figura 11. Diagrama de Estructura de Programa Modular



- La longitud total de las variables no debe sobrepasar los 15 caracteres
- Toda variable se debe declarar antes de usar
- En todos los formularios y módulos se debe usar la opción Option Explicit.
- Cuando se usen objetos, se debe siempre liberar el objeto cuando se ha terminado las operaciones con el mismo.
- Los formularios y objetos se consideran como variables, por lo que tienen el mismo tipo de tratamiento que las variables de tipos de datos para su nomenclatura
- Las sentencias SQL deben ir en mayúscula sostenida, mientras que los parámetros deben ir de acuerdo al formato para variables.

#### **5.3.4 Diseño Procedimental**

Ver anexo A.

### **5.3 DESARROLLO**

Llegado este punto se empezó a codificar algoritmos y estructuras de datos, definidos en las fases anteriores, en el correspondiente lenguaje de programación y para el sistema gestor de bases de datos correspondiente.

Esta fase como resultado se obtuvo 5 etapas de desarrollos:

- Primera Etapa: Codificación del Modulo de Configuración de Valores de una Corrida Estacionaria y creaciones del Modulo de la base de datos para su gestión.
- Segunda Etapa : Codificación del Modulo de Controlar Seguridad
- Tercera Etapa : Codificación Modulo de Gestión de Reportes
- Cuarta Etapa : Codificación Modulo de Gestión de Usuarios
- Quinta Etapa : Codificación Modulo de Petición de Optimización, arreglos de interfaces y validaciones.

## 5.4 PRUEBAS Y RESULTADO

Las pruebas se realizaron utilizando el sistema Sebastopol-Jumbo el cual consta de un recorrido de 559.56 Kilómetros con alturas que oscilaban entre 111 metros y 2380 metros sobre el nivel del mar. El sistema cuenta con 8 estaciones de bombeo de las cuales 4 contaban con bombas que en total sumaban 18. Se hicieron dos pruebas una de ellas con peor de los casos y otra con la solución que arrojaba el algoritmo del Gradiente Reducido Generalizado(GRG).

En la primera prueba, no se tomaron en cuenta las bombas de la estación de recibo ya que el modelo matemático toma el estado de estas como no disponible. En total estuvieron disponibles 16 bombas donde la configuración inicial fue de todas apagadas. El algoritmo tomo esta configuración y empezó a iterar durando 12 horas aproximadamente hallando un optimo global.

En la segunda prueba, se tomo como configuración inicial del sistema los resultados arrojados en la primera iteración del algoritmo ramificación y acotamiento que tenia como particularidad no restringir el estado de la bombas. El tiempo de iteración fue de 20 minutos aproximadamente.

En el material acompañante se presenta un archivo llamado PruebaUno.txt donde se generó las iteraciones para la primera prueba donde era el peor de los casos. En este archivo se presenta de forma detalla por cada iteración el costo, el caudal, el estado del nodo, el nivel y que nodo fue el optimo.

## **6. CONCLUSIONES**

El modelamiento matemático exige gran precisión de las ecuaciones que lo componen para poder llegar a simular el mundo real. Para nuestro caso es muy importante que el modelo sea lo más exacto posible, ya que de lo contrario, al implementarse las consecuencias serían devastadoras en todos los sentidos. Este proyecto ha buscado representar un problema no sólo para analizar el comportamiento del mismo, sino también para llevar a la práctica sus resultados.

El uso de las matemáticas con base en el desarrollo de aplicaciones garantiza la exactitud de los resultados, siempre y cuando el proceso de modelado se adapte al método científico que por si sólo ya garantiza resultados correctos.

Modelar mediante el uso de las matemáticas no es una tarea fácil, en especial para usuarios que no tienen este tipo de adiestramiento, debido a esto se hace necesario la implementación de una herramienta que realiza el desarrollo del modelo matemático usando de la interacción del usuario a través de una interfaz de gráfica diseñada para la toma de datos necesarios, volviendo transparente para el usuario el desarrollo y solución del modelo.

## BIBLIOGRAFIA

**[1] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN.**

Tesis y otros trabajos de grado. Bogotá: ICONTEC, 2000.

**[2] SIMULUTIONS - a division of TCEnet Inc. Products and Services – PipeWorks.** Calgary: Canada.

<http://www.simulutions.com/html/p&s-pipeworks.htm>

**[3] ABADIE, J.** The GRG Method for Nonlinear Programming, Design and Implementation of Optimization Software, Sijthoff and Noordhoof, pp. Greenberg, H.J.(Ed). pp 325-363.

**[4] LASDON, L.S, WAREN A.D.** Generalized Reduced Gradient Software for Linearly and Nonlinearly Constrained Problems. Design and Implementation of Optimization Software, Sijthoff and Noordhoof. Greenberg H.J. (Ed). pp 363-397.

**[5] LASDON, L.S., A.D. WAREN, A. JAIN y M. RATNER(1978):** Design and Testing of a Generalized Reduced Gradient Code for Nonlinear Constrained Programming, *ACM Transactions on Mathematical Software*, vol. 4, pp. 34-50.

**[6] RÍOS, S.** Investigación operativa. Centro de Estudios Ramón Areces. Madrid. (1988).

**[7] HILLIER, Frederick S.** Introduccion a la Investigación de Operaciones. Capítulo 12. McGraw Hill. 510-533.

[8] **SAHINIDIS**, Nikolaos V., **TAWARMALANI**, Mohit. GAMS/BARON 5.0 Global Optimization of Mixed-Integer Nonlinear Programs. 2002.

<http://www.gams.com/solvers/baron.pdf>

[9] **GAMS On-line Documentation**. GAMS Development Corporation, Washington, DC 20007. <http://www.gams.com/docs/document.htm>

[10] **ANÁLISIS Y DISEÑO DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN**. **WHITTEN**, Jeffrey, **BENTLEY**, Lonnie, **BARLOW**, Victor. Análisis y Diseño de Sistemas de Información. Tercera Edición. McGraw Hill.

[11] **PERRY**, Robert. Manual del ingeniero Químico. Sexta edición. México McGraw Hill. 1992. Tomo 2.

[12] **VALENCIA**, Hugo. Dinámica de los fluidos aplicada a la ingeniería Química. Colombia. Universidad Industrial de Santander.

[13] **STREETER**, Victor L., **Wylie**, E. Benjamín. Mecánica de los fluidos. Octava edición. México. McGraw Hill. 1988.

[14] **P.Y.A. AUTOMATION LTDA.**, Seminario Transporte de hidrocarburos líquidos por ductos y su equipo de bombeo. Bogotá D.C. 2002.

[15] **WHITTEN**, Jeffrey L., **BENTLEY**, Lonnie D., **BARLOW**, Victor M. Análisis y diseño de sistemas de información. Tercera Edición. McGraw Hill. 1996.

## ÍNDICE TEMÁTICO

Acotar, 9,11.

Cohesión, 18.

Bomba Centrífuga, 24.

Diagramas

de Contexto, 36

de Flujo de Datos, 36

de Entidad Relación, 36

de Estructura de Programa Modular, 44

Estación de Bombeo, 3 ,27 ,28 ,30 ,32 ,37.

Fluidos, 16,17 ,18 ,19 ,21.

Flujo Laminar, 20,21.

Flujo Turbulento, 20 ,21.

GAMS, 15.

Gradiente Reducido Generalizado (GRG), 7 ,12.

MINLP, 7 ,8.

Plano Cortante, 9.

PLE, 8 ,9.

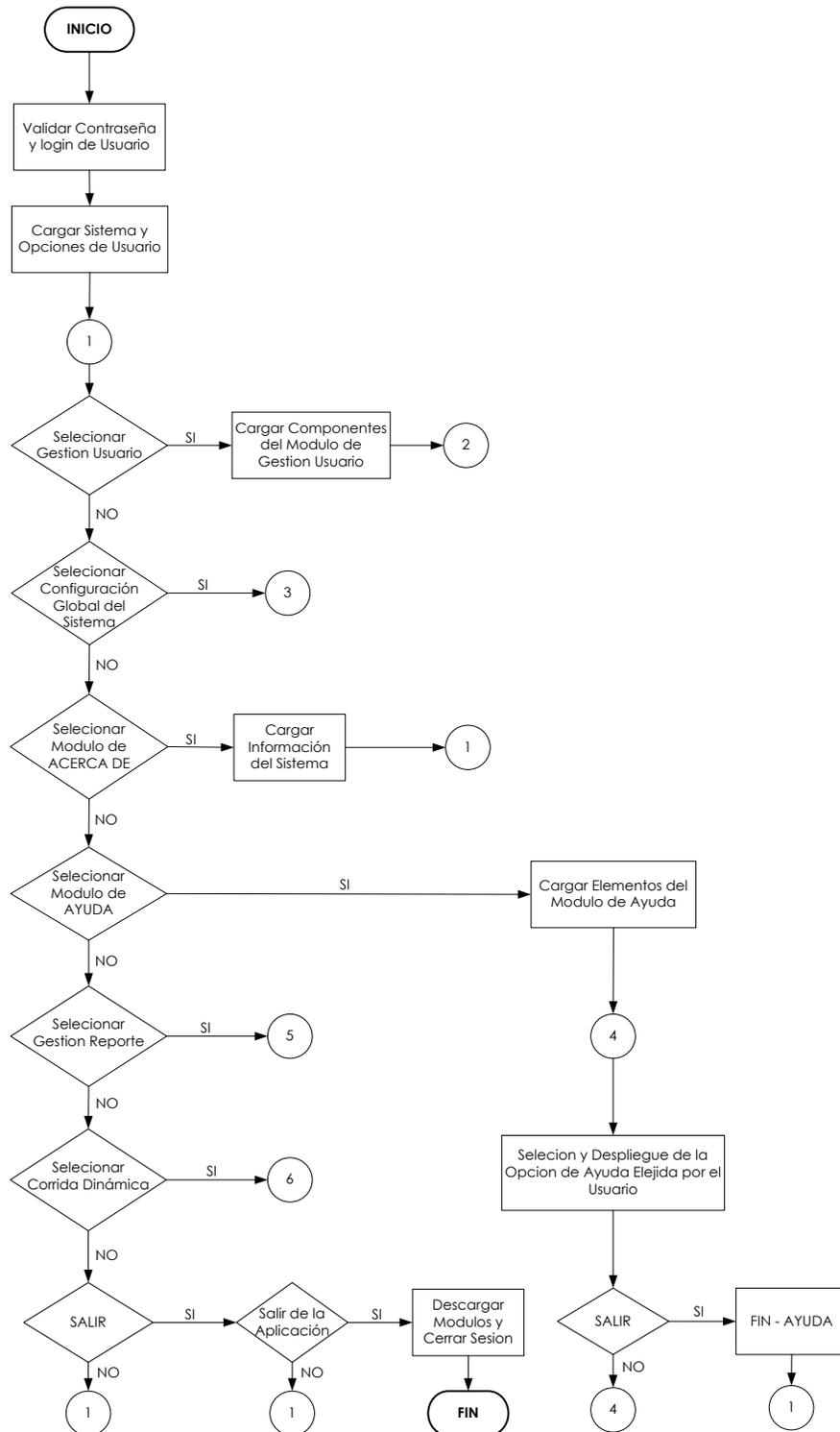
Programación Entera Binaria, 10.

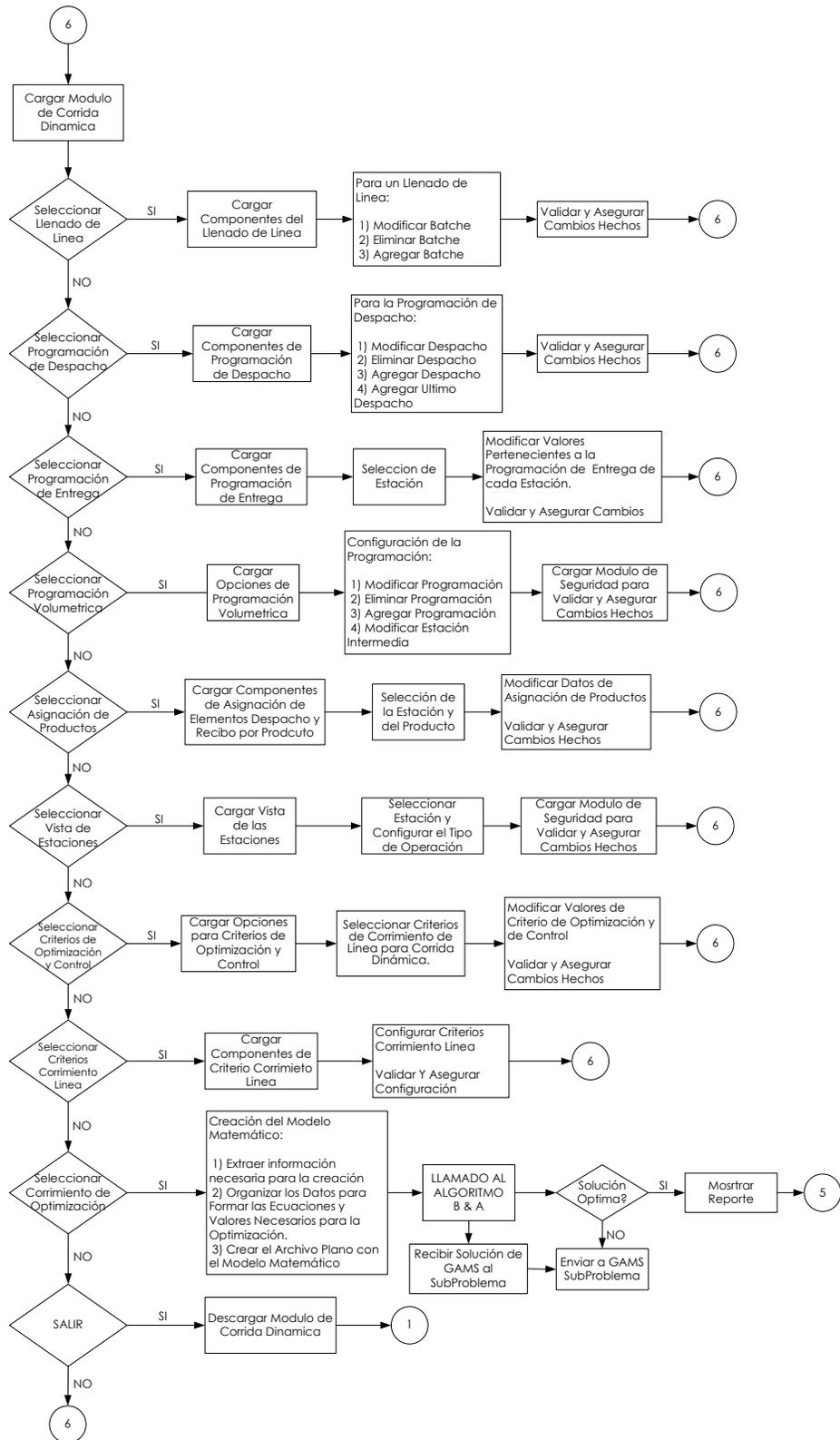
Ramificación y Acotamiento, 10 ,13 ,14 ,35.

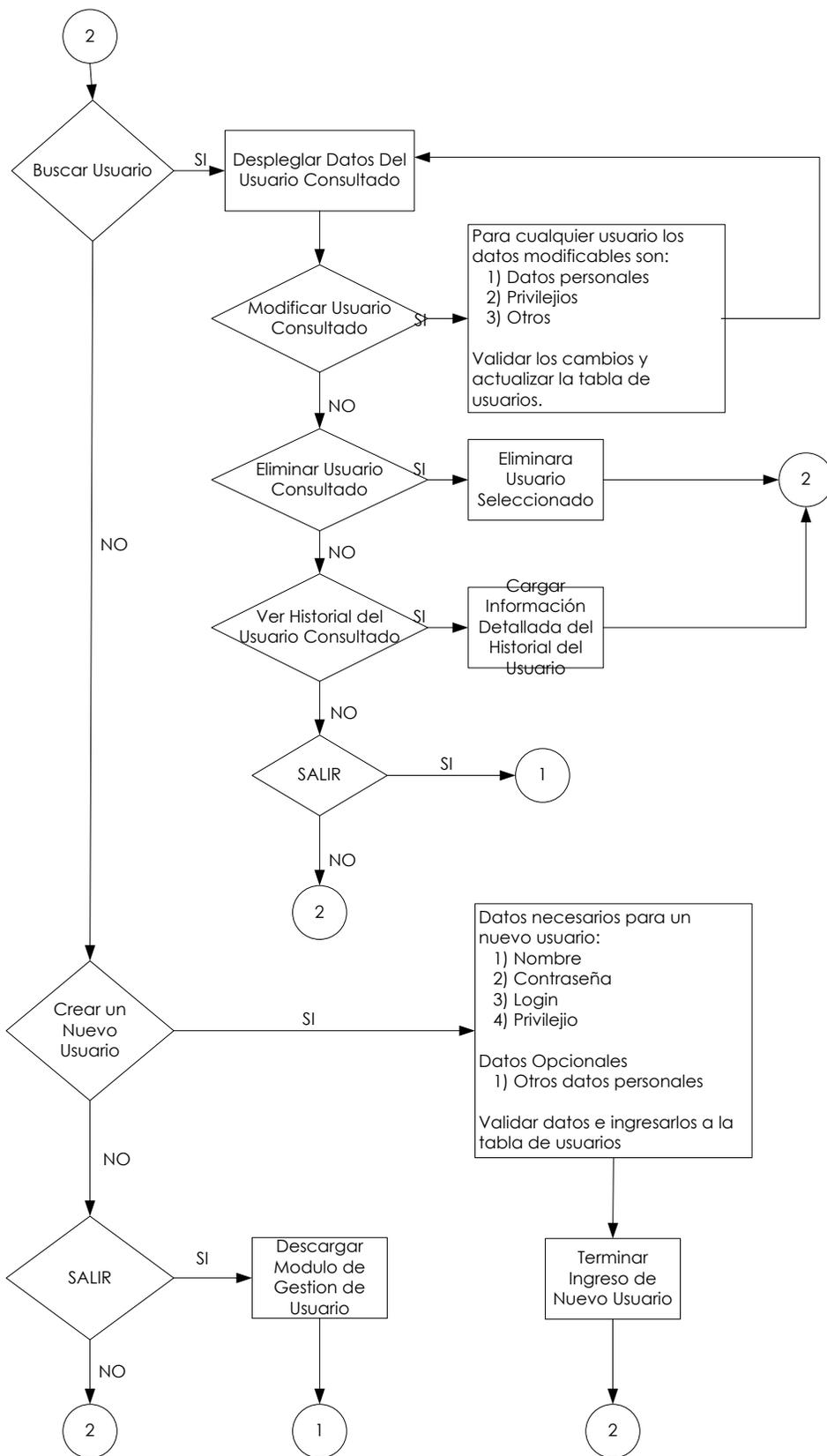
Ramificar, 9 ,10 ,11.

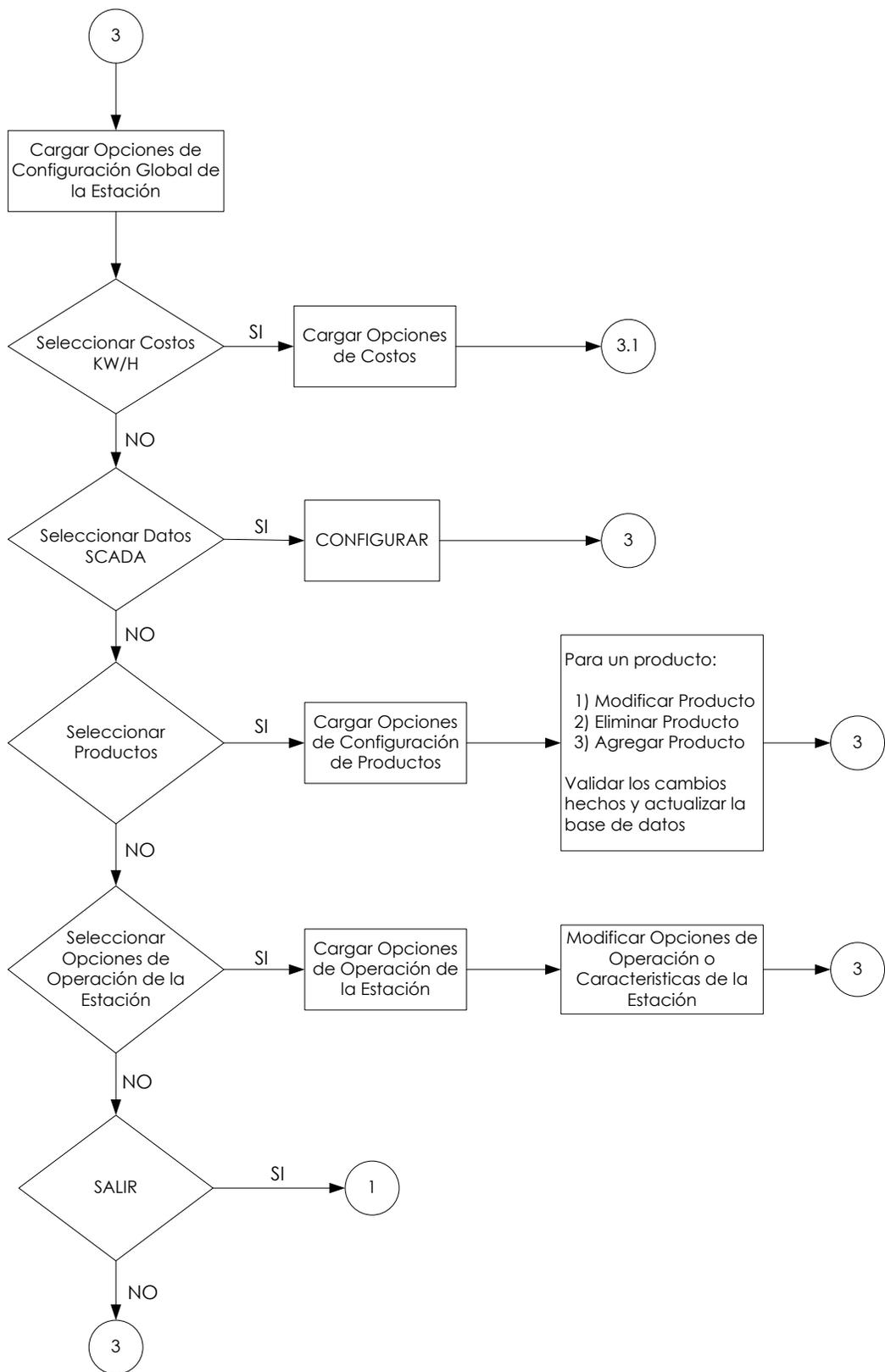
Sondear, 9, 10 ,11.

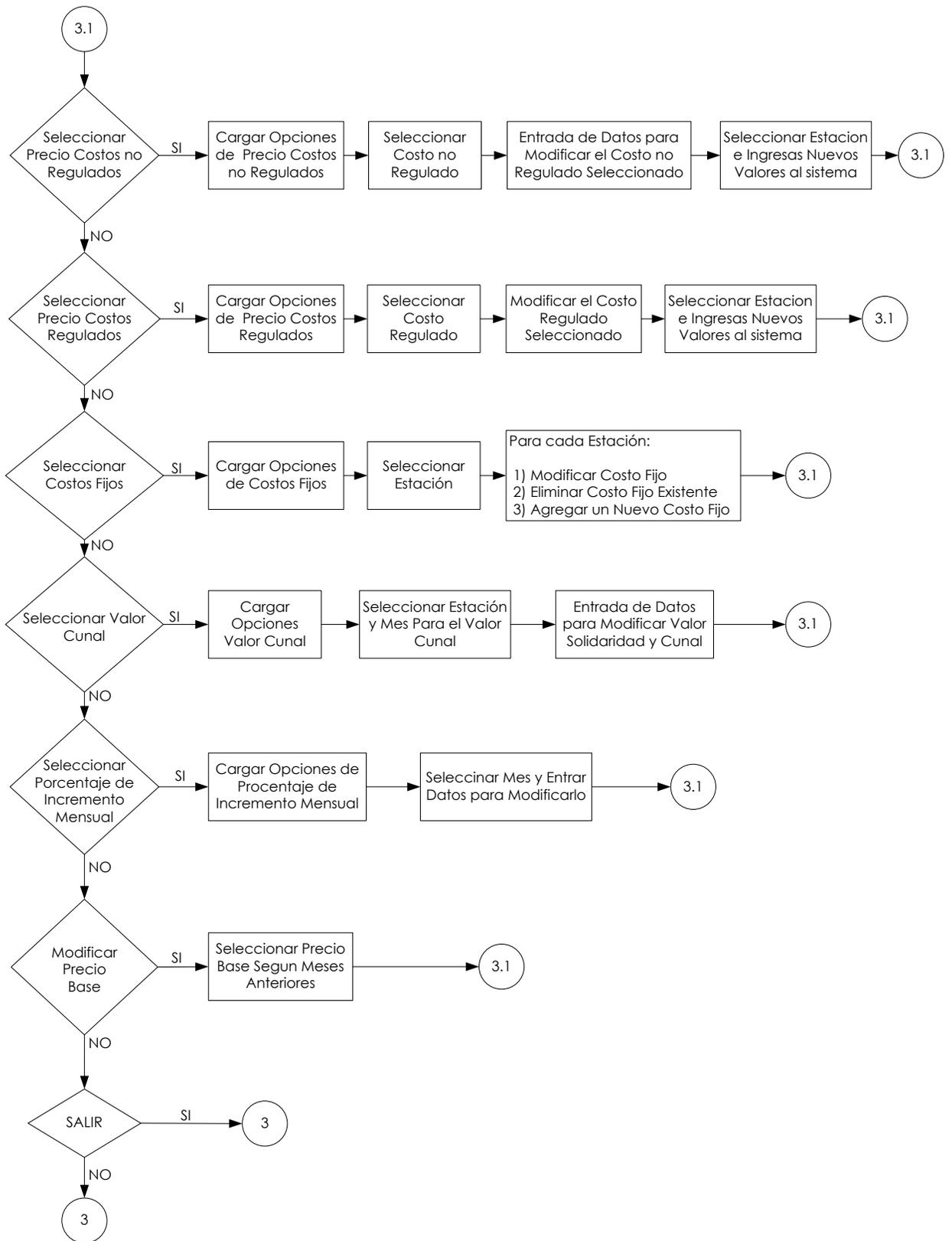
## Anexo A. Diagrama Procedimental

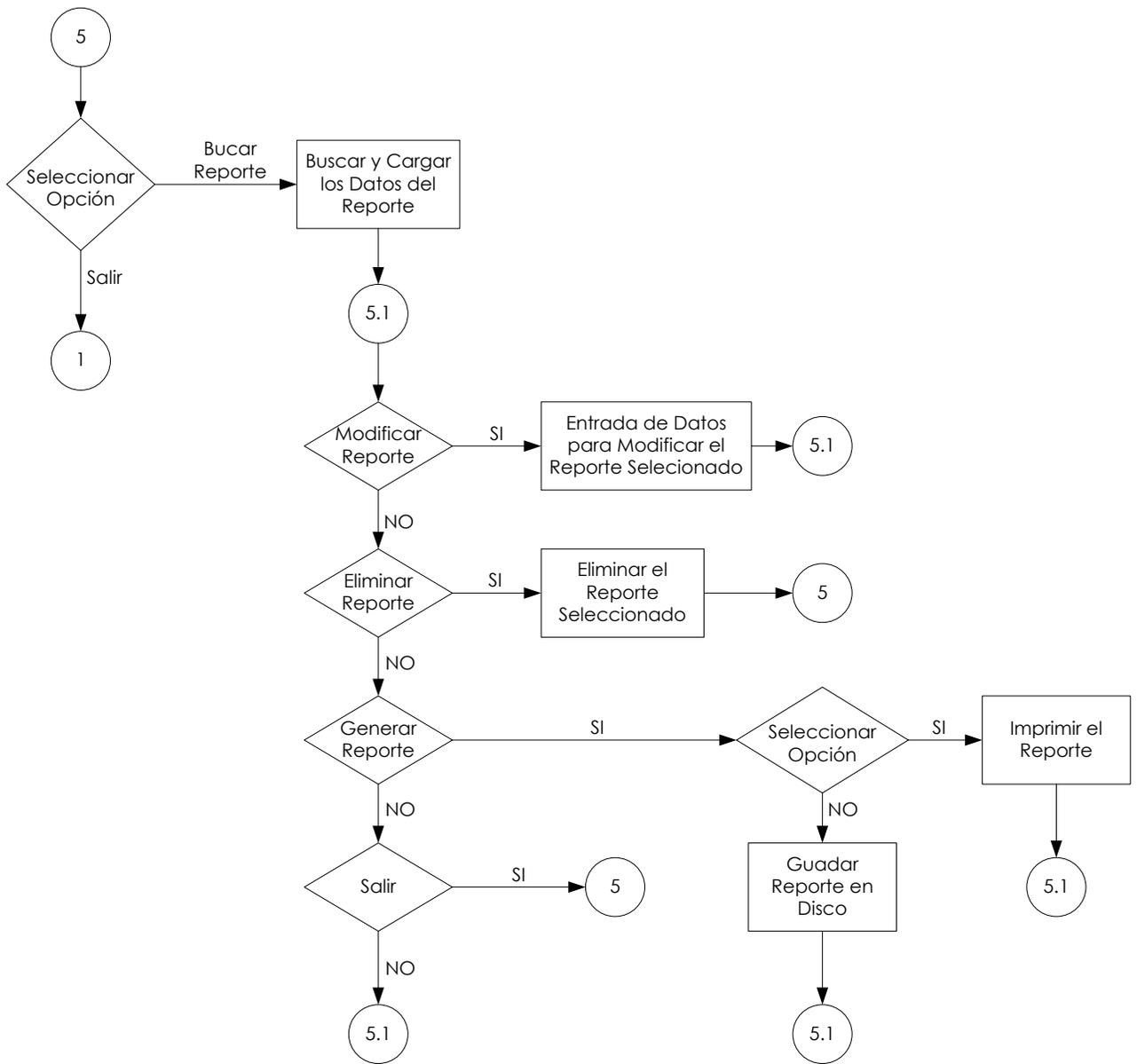












Anexo B. Tablas de Módulos

**Tabla 1. Modulo de Configuración de Valores de una Corrida Estacionaria**

NÚMERO DEL PROCESO	NOMBRE DEL MODULO
001	CONFIGURACIÓN DE VALORES DE UNA CORRIDA ESTACIONARIA
<p><b>INTRODUCCIÓN</b></p> <p>La gestión de las actividades que se desarrollan en una estación de bombeo es para toda empresa transportadora crudo muy importante ya que la configuración de los elementos que componen estas estaciones se deben optimizar de tal forma que una corrida tenga éxito y se pueda reducir los costos que conlleva utilizar ciertos recursos. Se hace necesario una herramienta que facilite esto sin tener perdidas, con este modulo se empezará a trabajar los elementos mas importantes en estas estaciones de bombeo para la optimización.</p> <p>Los beneficios que trae la implantación de este modulo son los siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Mayor facilidad para el desarrollo de las operaciones en las estaciones de bombeo por medio de una interfaz grafica donde el usuario se familiarice rápido.</li><li>• Permitir al usuario ver todos los componentes que hacen parte de una corrida estacionaria.</li><li>• Permitir al usuario configurar los principales elementos de una estación de bombeo de una manera fácil, rápida y segura.</li><li>• Permitir al usuario una gestión sencilla de los elementos necesarios para las</li></ul>	

actividades que se desarrollan en una estación de bombeo.

- Dar seguridad a todo cambio que se haga en los elementos de la estación de bombeo.
- Guardar la configuración hecha para la corrida estacionaria.

## DESCRIPCIÓN

El sistema de optimización le permite al usuario tener un mejor control de las operaciones en las estaciones por medio de una interfaz grafica que le ayude al usuario en su trabajo diario. Le permite configurar los principales de los elementos que hacen parte de una estación así como otros parámetros necesarios para el desarrollo normal de una estación de bombeo cuando se esta transportando un producto determinado. El usuario decide si crea, edita o elimina estos parámetros dependiendo de su criterio. El modulo garantiza que cualquier cambio que el usuario haga será validado para evitar errores.

## OBJETIVOS

- Brindar al usuario una interfaz grafica amigable donde pueda manejar los elementos con facilidad para su configuración.
- Permitir al usuario la configuración de los elementos de la estación y demás parámetros necesarios para las operaciones que a diario se desarrollan en una estación de bombeo.
- Validar los cambios que el usuario haga en la configuración de una corrida estacionaria para dar seguridad y mayor manejo de la aplicación por el usuario.
- Actualizar en la base de datos del sistema los valores que son esenciales para la corrida estacionaria.

## CARACTERISTICAS GENERALES

- El modulo permite ingresar los datos para la configuración de los elementos

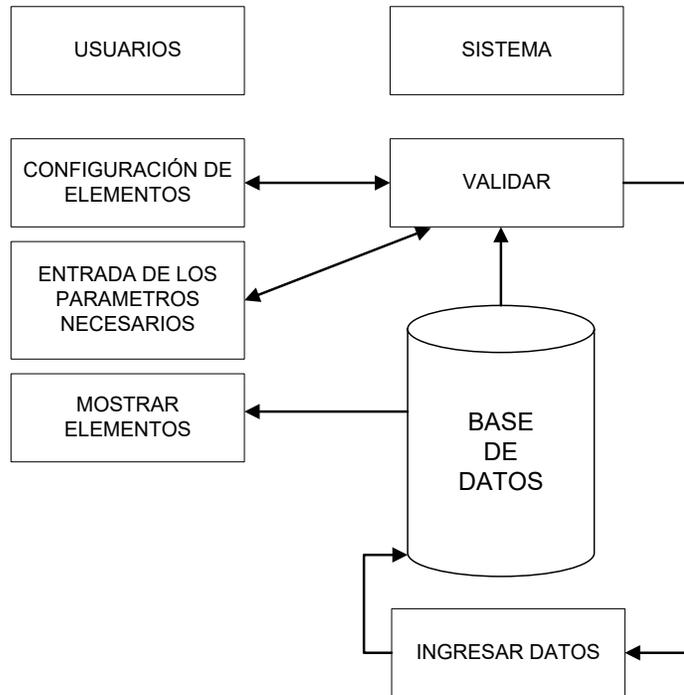
de la estación de bombeo escogida por el usuario.

- Validar los datos que ingresa el usuario para la configuración para dar seguridad de que no se cometerán errores y así poderlos ingresar en la base de datos.
- Una vez validados los datos serán almacenados en la base de datos.

## DOCUMENTOS DE ENTRADA

- Configuración de elementos de la estación de bombeo.
- Datos de los parámetros para una corrida.

## DEFINICION DEL PROCESO



### 1. CONFIGURACIÓN DE ELEMENTOS

Permite al usuario configurar un elemento que pertenece a la estación de bombeo. Cuando el usuario hace un cambio en la configuración de la estación se guarda temporalmente su modificación mientras se valida el cambio. Si la configuración no

es correcta el modulo le dará un mensaje inmediatamente refiriéndose al error del cambio.

## 2. ENTRADA DE LOS PARAMETROS NECESARIOS

Esta opción le permite al usuario llenar todo los datos de los restantes parámetros de una estación de bombeo necesarios para la corrida estacionaria. Puede crear, edita o eliminar y posteriormente guardar los datos para que el sistema los valide y actualice la base de datos.

## 3. MOSTRAR ELEMENTOS

Muestra los valores de los elementos principales de una estación de bombeo que fueron guardados en la base de datos del sistema para que el usuario pueda configurarlos.

## 4. VALIDAR

Esta función se encarga de validar la configuración de los elementos que fueron modificados siguiendo un estándar predeterminado, si esto no se sigue se le dará un mensaje al usuario con el error cometido. También se encarga de validar los datos de los parámetros necesarios para una corrida estacionaria enviando un mensaje al usuario si los datos introducidos son erróneos. Después de ser verificados son enviados a guardar en la base de datos del sistema.

## 6. INGRESAR DATOS

Después de ser validados los datos ingresados por el usuario en la configuración de los elementos de la estación de bombeo son organizados para luego actualizar la base de datos del sistema. Estos datos también corresponden a parámetros necesarios para una corrida estacionaria.

## INFORME DE SALIDA

- Nueva configuración de la estación.

--

**Tabla 2. Modulo de Controlar Seguridad**

NÚMERO DEL PROCESO	NOMBRE DEL MODULO
002	CONTROLAR SEGURIDAD
<p><b>INTRODUCCIÓN</b></p> <p>En la administración de un sistema de apoyo a la toma de decisiones es necesario garantizar la seguridad de los módulos, de la base de datos y de la misma aplicación. El restringir al personal no autorizado es algo que es necesario para que no haya ninguno tipo de problema.</p> <p>Los beneficios que trae la implantación de este modulo son los siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Llevar un registro de la interacción del usuario con el sistema.</li> <li>• Controlar toda interacción que el usuario haga sobre el sistema dependiendo de su privilegio.</li> <li>• Guardar de forma segura los cambios que el usuario haga.</li> </ul>	
<p><b>DESCRIPCIÓN</b></p> <p>El sistema controla toda interacción que el usuario haga, creando un detallo registro</p>	

de que módulos utilizo, cuanto tiempo, entre otros detalles. Controla toda entrada de datos por parte del usuario validándolos y si los acepta mirar si su privilegio le permite hacer tales cambios.

#### OBJETIVOS

- Brindar seguridad tanto a la empresa como al sistema de tal forma que cada vez que el usuario haga un cambio en la aplicación el modulo de seguridad se activa validando la acción que ha ocurrido.
- Crear un registro de lo que el usuario hizo mientras estuvo en el sistema.
- Ver que se cumpla con la configuración necesaria con los elementos de la estación de bombeo.

#### CARACTERISTICAS GENERALES

- El modulo valida cada dato que el usuario ingrese al sistema. Si el dato es correcto de acuerdo a lo definido entonces se guarda esta modificación en un registro donde se llevará un historial de la interacción del usuario con la aplicación. En caso contrario, si el dato no corresponde se le informará al usuario.
- Restringe el acceso a personas no autorizadas o a usuarios que no puedan entrar a ciertos sitios de la aplicación muy importantes. Esto lo valida dependiendo el privilegio que tenga el usuario.

#### DOCUMENTOS DE ENTRADA

- Datos que el usuario ingresa para actualizar el sistema.
- Peticiones para acceder a pantallas del sistema.

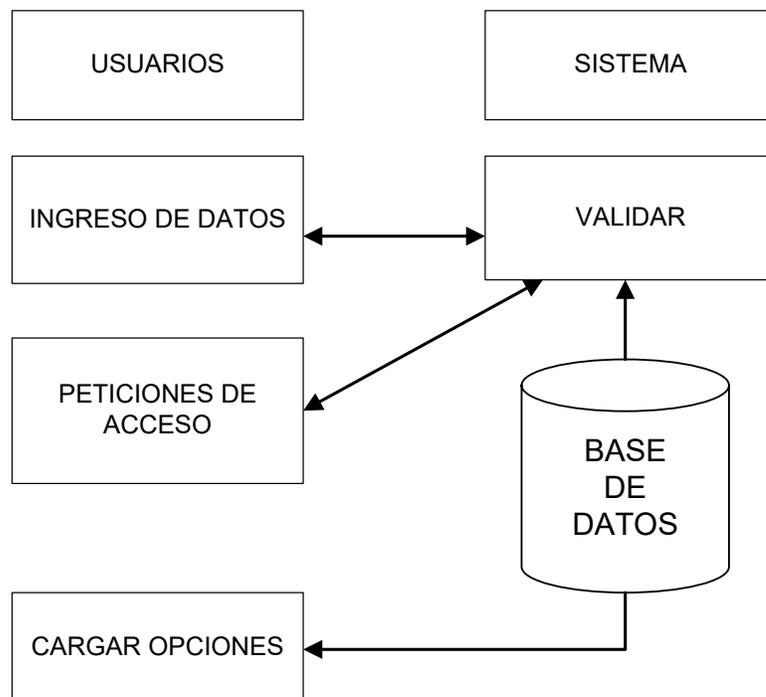
#### DEFINICION DEL PROCESO

### 1. INGRESO DE DATOS

Permite al usuario ingresar datos cuando el sistema así se lo autorice. Estos datos son necesarios para que el sistema funcione correctamente.

### 2. VALIDAR

Cada dato digitado por el usuario es validado si coincide o no con el campo definido donde se esta modificando. Toda petición que el usuario haga se validará para saber si esta o no permitida este acceso. El proceso se encarga de revisar la base de datos extrayendo los datos para compararlos con los que el usuario digito. Si coinciden la petición o los datos serán aceptados y se creara un registro en la base de datos de esta transacción.



### 3. PETICIONES DE ACCESO

Esta opción se da cada vez que el usuario oprime un botón de la aplicación, entonces el sistema por medio de la validación revisa si el está o no autorizado para esta acción. Cada vez que el usuario tenga acceso se creará un registro de su entrada.

#### 4. CARGAR OPCIONES

Cuando el usuario hace un petición de acceso a una pantalla o modifica algún dato el sistema valida esto y si no hay ningún error cargará las respectivas opciones que el usuario ha solicitado o ha modificado.

#### INFORME DE SALIDA

- Mensajes de errores o de acceso no autorizado.

**Tabla 3. Modulo de Gestión de Reportes**

NÚMERO DEL PROCESO	NOMBRE DEL MODULO
003	GESTION DE REPORTES
<p><b>INTRODUCCIÓN</b></p> <p>La administración de las actividades que se llevan a cabo en las estaciones de bombeo es muy importante para la empresa que transporta los derivados del petróleo. Por ello es necesario llevar un reporte de las operaciones que se hicieron y como lo hicieron.</p> <p>Los beneficios que trae la implantación de este modulo son los siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Manejo más sencillo de las operaciones que se hacen en una estación de bombeo.</li><li>• Permitir al usuario tomar mejores decisiones en las actividades que se realizan diariamente.</li></ul>	

- Llevar un historial de los recursos utilizados en anteriores actividades de estas estaciones.
- Permite guardar descripción detalla de la actividad que se va a realizar en una estación de bombeo.
- Darle la posibilidad al usuario de imprimir el reporte en pantalla, para almacenar en disco o para mandarlo a la impresora.

## DESCRIPCIÓN

La gestión de reportes le permite al usuario buscar en la base de datos del sistema un reporte y verificar los detalles de configuración de los elementos de una estación de bombeo para una corrida estacionaria hecha por otro usuario o por el mismo. Permite añadir, modificar o eliminar un reporte del sistema.

## OBJETIVOS

- Llevar un historial de los reportes que el usuario creo.
- Generar según el usuario desee un reporte en pantalla, en un archivo lógico o en impresora.
- Permitir el ingreso de datos para añadir un nuevo el reporte.
- Tomar resultados de la base de datos del sistema hecha por la optimización de recursos y mostrarlos en pantalla.

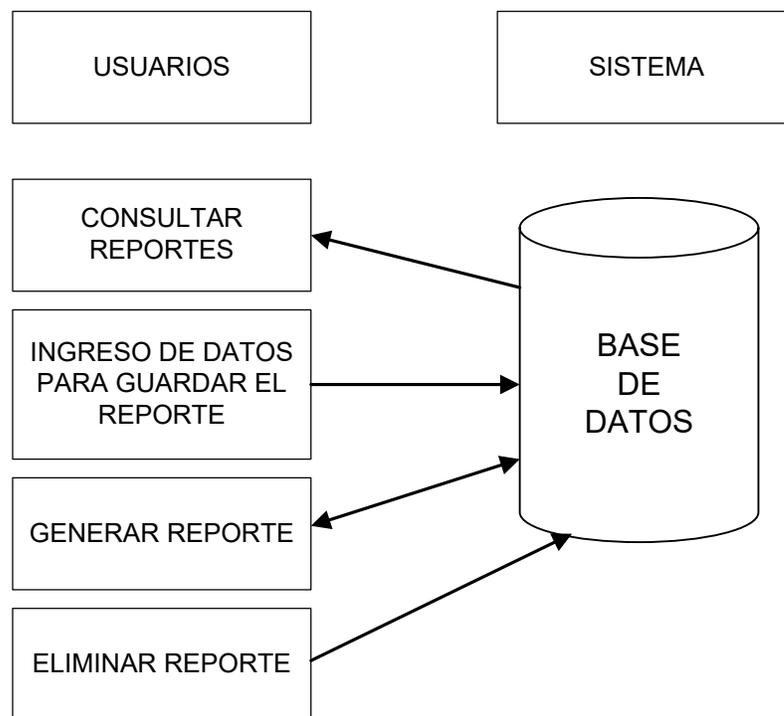
## CARACTERISTICAS GENERALES

- Lleva un historial en la base de datos del sistema de todos los reportes que el usuario guardo para cuando este decida verlos en pantalla, guardarlo en disco o imprimirlo.
- Poder modificar el reporte para después guardarlo en el sistema.
- Consulta la base de datos organizando los datos que se optimizaron y los muestra en pantalla para el análisis del usuario.

## DOCUMENTOS DE ENTRADA

- Datos para guardar un nuevo reporte.

## DEFINICION DEL PROCESO



### 1. CONSULTAR REPORTES

Muestra en pantalla un reporte específico que el usuario desea ver. Se encarga de ir a la base de datos sacar los datos necesarios y organizarlos para mostrarlos en pantalla.

### 2. INGRESO DE DATOS PARA GUARDAR EL REPORTE

El usuario ingresa detalles del reporte y el sistema se encarga de organizar y agregar otros necesarios para actualizar la base de datos del sistema.

### 3. GENERAR REPORTE

Permite al usuario pedirle al sistema un reporte para mostrar en pantalla, poderlo guardar en disco o si lo prefiere imprimirlo. El sistema se encarga de organizar los datos extraídos de la base de datos y hacer la opción que el usuario escogió.

### 4. ELIMINAR REPORTE

El usuario puede eliminar o reporte que ha consultado o el sistema si lo ve necesario también lo puede borrar de la base de datos.

### INFORME DE SALIDA

- Reportes de configuraciones hechas.

**Tabla 4. Modulo de Gestión de Usuarios**

NÚMERO DEL PROCESO	NOMBRE DEL MODULO
004	GESTION DE USUARIOS
<b>INTRODUCCIÓN</b>  Un sistema de apoyo a la toma de decisiones debe tener una forma de administrar los usuarios que lo utilizan para su correcto funcionamiento. Esta administración se debe hacer por los riesgos que se corren con los usuarios que no están autorizados a ciertos sitios del sistema o al mismo sistema. La gestión de los usuarios permite la configuración de los usuarios del sistema.  Los beneficios que trae la implantación de este modulo son los siguientes:	

- Ingreso de login y contraseña a los usuarios.
- Permitir al administrador (usuario) crear nuevos usuarios.
- Permitir al administrador (usuario) buscar un usuario para su modificación o para eliminarlo del sistema.
- Permitir al administrador ver el historial de entradas de un usuario.

## DESCRIPCIÓN

La gestión del usuario permite al usuario administrar el sistema en su totalidad. Cuando se inicia una nueva sesión del sistema el usuario debe introducir un login y contraseña para tener acceso a la aplicación. El administrador (usuario) crear un nuevo usuario o si es necesario buscar uno existente para la modificación de sus datos o eliminarlo del sistema. Facilita el historial de un usuario para saber la fecha y hora de ingreso y en que sitios estuvo.

## OBJETIVOS

- Permitir el ingreso de una contraseña a los usuarios al comenzar la sesión del sistema.
- Validar login y contraseña de usuario.
- Permitir al administrador (usuario) crear nuevos usuarios.
- Permitir al administrador (usuario) buscar usuarios para su modificación o para eliminarlo del sistema.
- Validar datos que ingrese el administrador (usuario) para la creación o modificación de un usuario.
- Permitir ver el historial al administrador (usuario) del sistema.

## CARACTERÍSTICAS GENERALES

- El modulo de gestión de usuarios permite ingresar un login y una contraseña a un usuario cuando el sistema esta comenzando una nueva sesión.

- Para el ingreso de un usuario a la nueva sesión el sistema toma el login y la contraseña y lo valida con la base de datos para permitir el acceso.
- El administrador (usuario) podrá crear un nuevo usuario con los privilegios que el vea convenientes.
- Los datos que el administrador (usuario) ingresa al sistema para un usuario nuevo o existente son validados por el modulo para evitar errores.
- En la búsqueda de un usuario el administrador (usuarios) podrá modificar sus datos o eliminarlo del sistema.
- Validar datos que ingrese el administrador (usuario) para la creación o modificación de un usuario.
- Se encarga de visualizar los historiales de los usuarios al administrador (usuario) del sistema con fecha y hora y que sitios de la aplicación manejo.
- El sistema se encarga de visualizar de forma ordenada los datos de los usuarios.

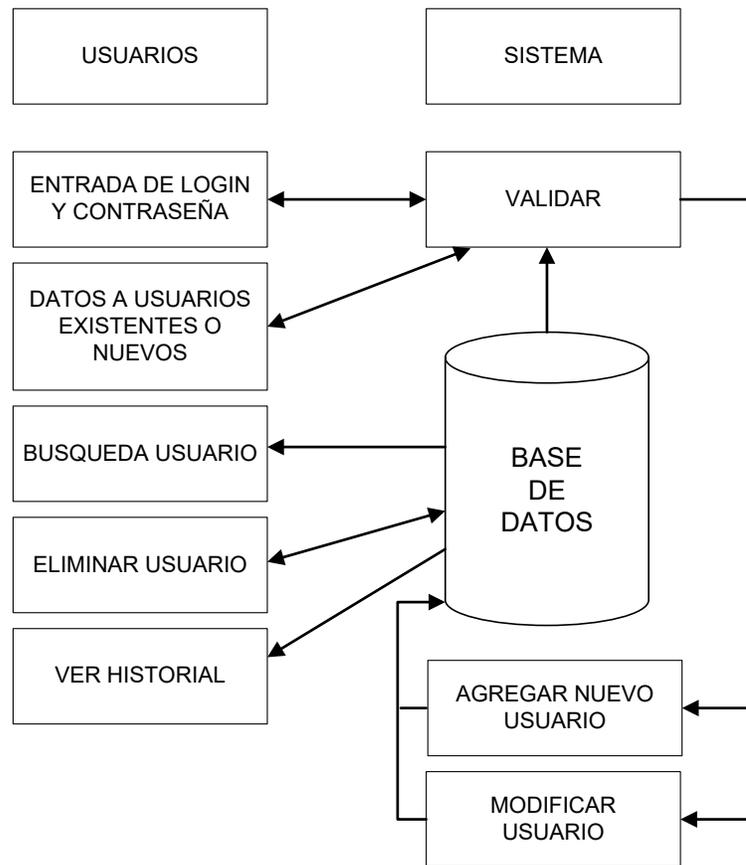
#### DOCUMENTOS DE ENTRADA

- Login y contraseña del usuario.
- Datos para nuevos usuarios.
- Datos nuevos para usuarios existentes.

#### DEFINICION DEL PROCESO

##### 1. ENTRADA DE LOGIN Y CONTRASEÑA

Permite al Usuario poner un login y contraseña que le fue asignado por el administrador. El sistema se encarga de validar y si no puede acceder, el sistema le informa que por medio de un mensaje en pantalla que el login o contraseña son incorrectos y no tendrá acceso al sistema.



## 2. INGRESO DE DATOS DE USUARIOS EXISTENTES O NUEVOS

El administrador (usuario) podrá cambiar en cualquier momento los datos de un usuario existente o crear nuevos usuarios. Estos valores serán verificados para que estén correctamente escritos y poder actualizar la base de datos. Si uno de los valores presenta errores el sistema le informará por medio de un mensaje en pantalla que hay valores erróneos y por ello no se puede actualizar la base de datos

## 3. BUSQUEDA DE USUARIO

Permite que el administrador (usuario) busque un usuario específico y poder ver

todos los sus datos. En caso que no se encuentre el usuario el sistema le informará por medio de un mensaje en pantalla que el usuario no existe.

#### 4. ELIMINIAR USUARIO

Cuando el administrador (usuario) haya buscado un usuario específico esta función le permitirá eliminarlo del sistema. Si causa algún error el eliminar el usuario el sistema se encarga de enviarle un mensaje en pantalla al administrador informando del error.

#### 5. VALIDAR

Esta función se encarga de validar login, contraseña y todos los datos que sean ingresados para la modificación o creación de un usuario. Control la interacción del usuario con la aplicación dando acceso a los usuarios para hacer cambios con en los datos de este mismo o de otro, con una autorización dado previamente por el administrador (usuario) en sus privilegios.

#### 6. VER HISTORIAL

Permite al administrador ver la fecha y hora en que un usuario entro al sistema y en que sitios entro.

#### 7. AGREGAR NUEVO USUARIO

Después de haber sido validado los datos del nuevo usuario el sistema se encarga de introducirlo a la base de datos interna del sistema para que este inmediatamente habilitado y pueda comenzar una nueva sesión.

#### 8. MODIFICAR USUARIO

Después de haber sido validado los datos del usuario existente para su modificación el sistema se encarga de actualizar en la base de datos del sistema los nuevos datos y que pueda inmediatamente abrir una nueva sesión con sus datos ya modificados.

## INFORME DE SALIDA

- Lista de usuarios en el sistema.
- Historiales del usuario.
- Mensajes de actualizaciones o errores cometidos.

**Tabla 5. Modulo de Petición de Optimización**

NÚMERO DEL PROCESO	NOMBRE DEL MODULO
005	PETICIÓN DE OPTIMIZACIÓN

## INTRODUCCIÓN

Reducir los costos que conlleva utilizar unos recursos para las operaciones en estaciones de bombeo es lo más importante y es uno de los objetivos que las empresas de transporte de crudo desean. El objetivo que se desea es de poder transportar el mayor producto utilizando la menor energía de los recursos. Los beneficios que trae la implantación de este modulo son los siguientes:

- Ahorro de los recursos dando como resultado bajos costos cuando se está transportando el producto.
- Dar la mejor utilidad a los recursos de la empresa y a su vez preservarlos.
- Mejorar el rendimiento en cuanto al transporte del producto y así mejorar las

actividades que se realizan diariamente en las estaciones de bombeo.

- Garantizar que la operación a realizar se hará de la mejor manera minimizando todo costo y maximizando el transporte del producto.

## DESCRIPCIÓN

Este es el modulo principal del sistema. Se encarga de organizar los datos extraídos de la base de datos, llamar a otros procedimientos, crear modelo matemático para la optimización, comunicarse con la aplicación que ayudará a optimizar o extraer datos de una base de datos externa al sistema. El usuario hace la petición de optimizar después de haber configurado todo los elementos de la estación mas los parámetros globales necesarios y el sistema comienza a trabajar en la solución mas optima para luego mostrarla al usuario como reporte final.

## OBJETIVOS

- Crear modelo matemático para la optimización.
- Correr el algoritmo con el cual se buscará la mejor solución para el problema que el usuario configuro anteriormente.
- Comunicarse con la aplicación que resolverá cada subproblema que es creado por el sistema.
- Guardar datos al finalizar la optimización para luego visualizarlos en pantalla.
- Extraer datos necesarios tanto de la base de datos interna como una externa (si existe) del sistema para poder organizar y crear el modelo matemático.

## CARACTERISTICAS GENERALES

- Se toman los datos de la base de datos del sistema y si existe de una base de datos externa al sistema para organizarlo y poder crear el modelo matemático con sus funciones objetivas y sus respectivas restricciones que fueron ingresadas al sistema como parámetros globales.

- El modelo será creado en un archivo que se guardará en disco para luego resolverlo.
- El modulo tiene una comunicación con la herramienta que resuelve el modelo matemático. Le envía los parámetros y la ruta del archivo creado con el problema no lineal para que lo resuelva, luego recibe una posible respuesta de esta herramienta.
- Cuando el algoritmo decida que es la mejor solución el sistema guarda en la base de datos estos resultados para luego ser mostrados al usuario.

## DOCUMENTOS DE ENTRADA

- Datos de la base de datos interna.
- Datos de la base de datos externa (si existe).

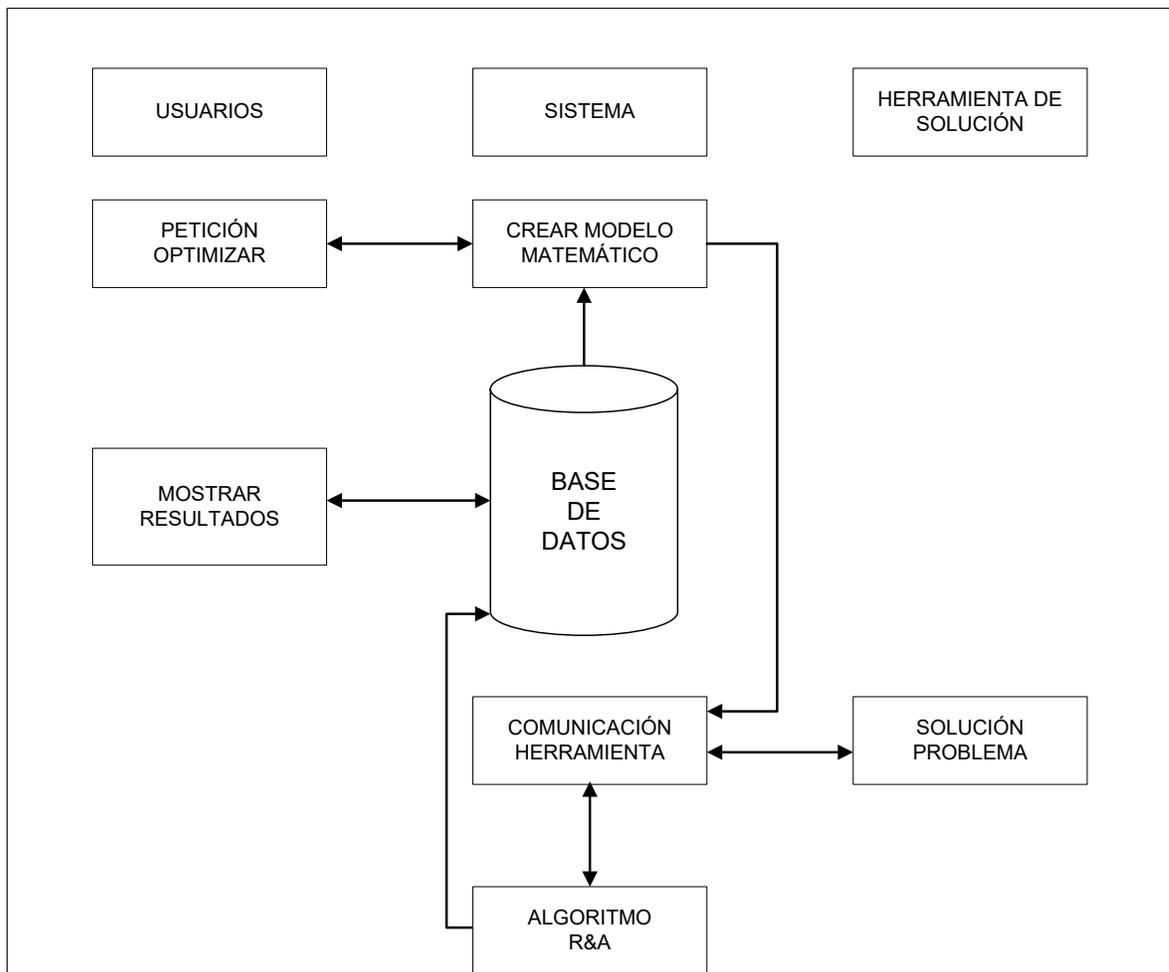
## DEFINICION DEL PROCESO

### 1. PETICIÓN OPTIMIZAR

Esta opción le permite al usuario hacer la petición de optimizar la operación que el ya ha configurado anteriormente. El sistema empezará a trabajar en la solución mas optima para más tarde mostrársela al usuario.

### 2. CREAR MODELO MATEMÁTICO

Este proceso se encarga de dos puntos claves para el comienzo de lo que va a ser la optimización. El primer punto es el de extraer todos los datos necesarios tanto de la base de datos del sistema como de una externa (si existe) y luego los organiza de acuerdo al modelo matemático que se creará. El segundo punto es la escritura de este modelo matemático. El proceso crear un archivo plano que será guardado en disco para luego poder utilizarlo con la herramienta que solucionará el problema.



### 3. COMUNICACIÓN HERRAMIENTA

El resultado del proceso CREAR MODELO MATEMÁTICO es tomado por esta opción y tendrá dos procesos que ayudarán con la comunicación con la herramienta. El primer proceso es el de enviarle el problema no lineal con los parámetros para resolverlo. La herramienta se encargará de desarrollar la mejor solución para el problema que se le envió. El segundo proceso es el de tomar esa respuesta que arrojó la herramienta y traerla al sistema para traducir la respuesta. Este segundo proceso se encarga también de organizar esta respuesta y la manda al algoritmo de Ramificación y Acotamiento.

### 4. ALGORITMO RAMIFICACIÓN Y ACOTAMIENTO

Este proceso se encarga de ir construyendo poco a poco la mejor solución que

puede ser tomada por el usuario para la operación que se va a realizar. El algoritmo busca reducir la utilidad de los elementos de una estación de bombeo sin llegar a damnificar las actividades que a diario se realizan y así preservar los recursos de la empresa. El proceso garantiza que la solución que resulte será la más óptima para el desarrollo de la operación en la estación. Cuando el algoritmo encuentre la solución optima este guarda los datos y actualiza la base de datos del sistema para luego mostrarlos.

#### 5. SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

Es un proceso externo al sistema y que pertenece a la herramienta de solución que resuelve todo problema que nuestro modulo le envíe. Como respuesta habrá una posible solución optima para el problema la cual será tomada por el sistema para seguirla analizando.

#### 6. MOSTRAR RESULTADOS

El usuario al hacer la petición de optimización el sistema empieza a trabajar en la solución que él definió para almacenarla en la base de datos. Esta opción le permite al usuario ver lo que el algoritmo y la herramienta decidieron como mejor resultado. El reporte que el sistema muestra servirá para apoyar la decisión que el usuario tome.

#### INFORME DE SALIDA

- Datos de cada iteración
- Figura del árbol binario.

Anexo C. Tabla de Diseño de Datos

<b>Batches</b>		
<b>Campo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Comentario</b>
ID	Autonumérico	PK
LlenadoLinea	Entero Largo	
Producto	Entero Largo	FK(Producto)

<b>Bombas</b>		
<b>Campo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Comentario</b>
ID	Autonumérico	PK
Codigo	Texto	
Tipo	Byte	
R	Byte	
PotenciaMax	Simple	
RpmMin	Entero	
RpmMax	Entero	
PotenciaAux	Simple	
EficienciaMotor	Simple	
EtapasDisegno	Byte	
EtapasActuales	Byte	
Qmax	Numérico Simple	
Qmin	Numérico Simple	
CQ	Numérico Simple	
CE	Numér Simple ico	
CH	Simple	
C1	Simple	
C2	Simple	
C3	Simple	
C4	Simple	
BEPE	Simple	
BEPQ	Simple	
BEPH	Simple	
Coefh1	Simple	
Coefh2	Simple	
Coefh3	Simple	
Coefh4	Simple	
Coefh5	Simple	
Coefe1	Simple	
Coefe2	Simple	
Coefe3	Simple	
Coefe4	Simple	

Coefe5	Simple	
Coefn1	Simple	
Coefn2	Simple	
Coefn3	Simple	
Coefn4	Simple	
Coefn5	Simple	
SetSucc	Byte	

<b>CostosFijos</b>		
<b>Campo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Comentario</b>
ID	Entero	PK
SistemaEstacion	Entero Largo	FK(SistemaEstacion)
Nombre	Texto	
Tipo	Byte	
Valor	Simple	

<b>CostosKWH</b>		
<b>Campo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Comentario</b>
ID	Autonumérico	PK
SistemaEstacion	Entero Largo	FK(SistemaEstacion)
Hora0	Simple	
Hora1	Simple	
Hora2	Simple	
Hora3	Simple	
Hora4	Simple	
Hora5	Simple	
Hora6	Simple	
Hora7	Simple	
Hora8	Simple	
Hora9	Simple	
Hora10	Simple	
Hora11	Simple	
Hora12	Simple	
Hora13	Simple	
Hora14	Simple	
Hora15	Simple	
Hora16	Simple	
Hora17	Simple	
Hora18	Simple	
Hora19	Simple	
Hora20	Simple	
Hora21	Simple	
Hora22	Simple	
Hora23	Simple	

<b>CostosNoRegulados</b>		
<b>Campo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Comentario</b>
ID	Autonumérico	PK
SistemaEstacion	Entero Largo	FK(SistemaEstacion)
Hora0	Simple	
Hora1	Simple	
Hora2	Simple	
Hora3	Simple	
Hora4	Simple	
Hora5	Simple	
Hora6	Simple	
Hora7	Simple	
Hora8	Simple	
Hora9	Simple	
Hora10	Simple	
Hora11	Simple	
Hora12	Simple	
Hora13	Simple	
Hora14	Simple	
Hora15	Simple	
Hora16	Simple	
Hora17	Simple	
Hora18	Simple	
Hora19	Simple	
Hora20	Simple	
Hora21	Simple	
Hora22	Simple	
Hora23	Simple	

<b>Estaciones</b>		
<b>Campo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Comentario</b>
ID	Autonumérico	PK
Nombre	Texto	
Alias	Texto	

<b>Historiales</b>		
<b>Campo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Comentario</b>
ID	Autonumérico	PK
Usuario	Entero Largo	FK(Usuarios)
Fecha	Fecha Corta	
Hora	Hora Larga	
Suceso	Texto	

<b>IncrementosMensuales</b>		
<b>Campo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Comentario</b>
ID	Byte	PK
Mes	Byte	FK(Meses)
Valor	Simple	

<b>Meses</b>		
<b>Campo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Comentario</b>
ID	Byte	PK
Nombre	Texto	

<b>Niveles</b>		
<b>Campo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Comentario</b>
ID	Autonumérico	PK
SistemaEstacion	Entero Largo	FK(SistemaEstacion)
Funcion	Byte	
Nivel	Entero Largo	
Tipo	Byte	
IBomba	Entero Largo	
Ubomba	Entero Largo	
IBombar	Entero Largo	
UBombar	Entero Largo	
IFiltro	Entero Largo	
Ufiltro	Entero Largo	
Iinter	Entero Largo	
Uinter	Entero Largo	
Ivalvula	Entero Largo	
Uvalvula	Entero Largo	
Iresistencia	Entero Largo	
Uresistencia	Entero Largo	
Ifiltroturbina	Simple	
Ufiltroturbina	Simple	
Tanque	Entero Largo	
Ramas	Entero Largo	
Bypass	Entero Largo	
DeltaYSucc	Simple	
DeltaYDesc	Simple	
Bypasse	Byte	
Diametro	Simple	
Longitud	Simple	
Espesor	Simple	
Rugosidad	Simple	
SMYS	Simple	

CaidaPres	Simple	
-----------	--------	--

<b>ParamsBombas</b>		
<b>Campo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Comentario</b>
ID	Autonumérico	PK
Bomba	Entero Largo	FK(Bombas)
SistemaEstacion	Entero Largo	FK(SistemaEstacion)
VSEstado	Byte	
VSRpm	Entero	
Rpm	Simple	
PorcRpm	Simple	
Ps	Simple	
H	Simple	
PorcEficiencia	Decimal	
Potencia	Simple	
PorcPotencia	Decimal	
Nphsr	Simple	
Nphsd	Simple	
DeltaYSucc	Simple	
DeltaYDesc	Simple	
CSEnergia	Simple	
CSPotencia	Simple	
CSSucc	Simple	
CSDesc	Simple	
CsRpm	Entero	
Estado	Byte	
Nivel	Entero Largo	
Densidad	Simple	

<b>ParamsResistencias</b>		
<b>Campo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Comentario</b>
ID	Autonumérico	PK
Resistencia	Entero Largo	FK(Resistencias)
SistemaEstacion	Entero Largo	FK(SistemaEstacion)
Unidad	Byte	
Qe	Simple	
CaidaE	Simple	
Estado	Byte	
Nivel	Entero Largo	
XE	Simple	
CSValvula	Simple	
VValvula	Simple	
PresDescMax	Simple	
PresDescMin	Simple	
Qmax	Simple	

Qmin	Simple	
------	--------	--

<b>ParamsTanques</b>		
<b>Campo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Comentario</b>
ID	Autonumérico	PK
Tanque	Entero Largo	FK(Tanques)
SistemaEstacion	Entero Largo	FK(SistemaEstacion)
Nivel	Entero Largo	

<b>ParamsValvulas</b>		
<b>Campo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Comentario</b>
ID	Autonumérico	PK
Válvula	Entero Largo	FK(Válvula)
SistemaEstacion	Entero Largo	FK(SistemaEstacion)
Nivel	Entero Largo	
Estado	Byte	
PorcApertura	Simple	
EstadoControl	Byte	
Xe	Simple	
Caidae	Simple	
CsvEntrada	Simple	
CsvSalida	Simple	
CspApertura	Simple	
CspSuccion	Simple	
CspSuccion	Simple	
CspDescarga	Simple	

<b>Productos</b>		
<b>Campo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Comentario</b>
ID	Autonumérico	PK
Codigo	Byte	
Nombre	Texto	
Alias	Texto	
Densidad	Simple	
Viscosidad	Simple	
PresionVapor	Simple	

<b>Puntos</b>		
<b>Campo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Comentario</b>
ID	Autonumérico	PK
Sistema	Byte	FK(Sistemas)
Punto	Simple	
Critico	Byte	
Posicion	Simple	
Altura	Simple	

DiametroExt	Simple	
Espesor	Simple	
SMYS	Simple	
DiametroInt	Simple	
PresionGeodesica	Simple	
Maop72	Simple	
Area	Doble	
Velocidad	Simple	
Reynolds	Simple	
CF	Simple	
PerdidasFriccion	Simple	
PresionInterna	Simple	
PresionTotal	Simple	
Densidad	Simple	
Viscosidad	Simple	
Volumen	Simple	
U1	Simple	
U2	Simple	
Diferencia	Simple	
Rugosidad	Simple	
PresionVapor	Simple	
PresionMin	Simple	
MaopPMax	Simple	

<b>Resistencias</b>		
<b>Campo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Comentario</b>
ID	Autonumérico	PK
Codigo	Texto	
Longitud	Simple	
Diametro	Simple	
Rugosidad	Simple	
PerdidasFriccion	Simple	
Tipo	Byte	

<b>Sistemas</b>		
<b>Campo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Comentario</b>
ID	Autonumérico	PK
Nombre	Texto	
CostosMesBase	Fecha Corta	

<b>SistemasEstaciones</b>		
<b>Campo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Comentario</b>
ID	Autonumérico	PK
Sistema	Byte	FK(Sistemas)
Estacion	Entero Largo	FK(Estaciones)

Tipo	Byte	
Q	Simple	
Qe	Simple	
Qi	Simple	
PresSuc	Simple	
PresDes	Simple	
PresDb	Simple	
Punto	Entero Largo	FK(Puntos)
DiametroSuc	Simple	
Diametrotes	Simple	
PsMin	Simple	
PsMax	Simple	
PdMax	Simple	
Despacho	Byte	
AlPaso	Byte	
AlPasoEntrega	Byte	
Recibo	Byte	
FueraLinea	Byte	
FuncionFijada	Byte	
ControlEstacion	Byte	
NiEntrega	Byte	
NfEntrega	Byte	
Nsiguiente	Byte	
Tipoi	Byte	
SetpointRPM	Byte	
SetpointPS	Simple	
SetpointPD	Simple	
CriterioEntregas	Byte	

<b>Tanques</b>		
<b>Campo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Comentario</b>
ID	Autonumérico	PK
Codigo	Texto	
Numero	Entero Largo	
Producto	Entero Largo	FK(Productos)
Capacidad	Simple	
Diámetro	Simple	
DiametroDesc	Simple	
AlturaMax	Simple	
AlturaSalida	Simple	
Deltah	Simple	
NivelActual	Simple	
Volumene	Simple	
PresManometrica	Simple	
PresEstatica	Simple	

Altura	Simple	
Dsmys	Entero Largo	
Daltura	Simple	
Sdiametro	Simple	
Sespesor	Simple	
Slongitud	Entero Largo	
Srugosidad	Simple	
Ssmys	Entero Largo	
Saltura	Simple	
CSValvula	Entero	
VSVValvula	Simple	

<b>Trayectos</b>		
<b>Campo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Comentario</b>
ID	Autonumérico	PK
Sistema	Byte	FK(Sistemas)
Trayecto	Entero Largo	
PuntoInicial	Entero Largo	FK(Puntos)
PuntoFinal	Entero Largo	FK(Puntos)
DRA	Simple	
Eficiencia	Simple	

<b>Usuarios</b>		
<b>Campo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Comentario</b>
ID	Autonumérico	PK
Login	Texto	
Password	Texto	
Tipo	Byte	

<b>ValoresSolidaridad</b>		
<b>Campo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Comentario</b>
ID	Autonumérico	PK
SistemaEstacion	Entero Largo	FK(SistemasEstaciones)
Mes	Byte	FK(Meses)
ValorCunal	Simple	
Porcentaje	Simple	
Solidaridad	Simple	

<b>Válvulas</b>		
<b>Campo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Comentario</b>
ID	Autonumérico	PK
Unidad	Byte	
Codigo	Texto	
Coef1	Simple	
Coef2	Simple	

Coef3	Simple	
Coef4	Simple	