

**MODELO TERMOECONÓMICO PARA LA OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE
LAS REDES INDUSTRIALES DE SUMINISTRO DE AIRE COMPRIMIDO**

Diego Jesús Guillen Pérez

**Proyecto de Grado Presentado como Requisito para Optar al Título de
Magíster en Ingeniería Industrial**

**Director
Ingeniero Lesme Corredor Martínez, Ph.D.**

**Fundación Universidad del Norte
Programa de Ingeniería Industrial
Departamento de Ingeniería Industrial
División de Ingenierías
Barranquilla
2012**

A mis padres Diego y Luisa, gracias por su constante apoyo.

Agradecimientos

A mi abuela por nunca preguntarme cuando la terminaría, a Luis Arias y Antonio Bula por su colaboración en momentos claves de la investigación y en general a todas aquellas personas que participaron en la consecución de este logro. GRACIAS TOTALES!!!

TABLA DE CONTENIDO

¡Error! Marcador no definido.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.2-1 Diagrama de una cadena de suministro y de una red de suministro de aire comprimido (elaboración propia)	10
Figura 1.4-1. Consumo Eléctrico Anual Consumido por sistemas de compresión de aire en la industria Europea. Fuente (Saidur, 2010)	12
Figura 2.2-1 Grafo general para cadenas de suministro de para un centro de distribución.	18
Figura 2.4-1. Tipos de compresores. Fuente US. Energy department	26
Figura 2.4-2. Curva de Operación, Compresor Rotativo Kaeser, fuente CAGI	28
Figura 2.4-3 Curva de Operación, Compresor Rotativo Ingersoll Rand con	28
Figura 2.4-4 Curva de Operación, Compresor Rotativo Ingersoll Rand con Variador	29
Figura 2.4-5. Análisis de ciclo de vida, para los sistemas de compresión de aire. Fuente (Saidur, 2010)	30
Figura 4.1-1. Representación grafica de la población en un algoritmo genético. (Vélez, 2007)	23
Figura 4.1-2. Operaciones básicas en algoritmos genéticos. Fuente (Vélez, 2007)	23
Figura 4.2-1. Diagrama de Flujo Algoritmo Genético, utilizado en la optimización	41
Figura 5.1-1 Esquema del sistema de compresión empleado en el caso estudio	45
Figura 5.2-1 Mínimo gasto energético encontrado en el rango de operación del sistema de compresión	46
Figura 5.2-2. Fracción de flujo entregado por cada compresor para el mínimo gasto encontrado en función del caudal total entregado a la red.	47
Figura 5.2-3. Demanda de flujo requerido por la red industrial	48
Figura 5.2-4 Flujo de Suministrado por el sistema de compresión para garantizar la demanda.....	49
Figura 5.2-5. Presión de entrega a la red en función del caudal demandado y el comprimido	49
Figura 5.2-6 Gasto energético con el sistema de decisión actual vs el propuesto.	50
Figura 5.2-7 Fracción de flujo entregado por cada compresor con el sistema de decisión actual.....	50
Figura 5.2-8 Fracción de flujo entregado por cada compresor con el sistema de decisión propuesto.....	51

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1-1. Clasificación según tipología de las cadenas de suministro. (Beamon B. M., 2001)	17
Tabla 2.4-1 Características y descripción por tipo de compresor.(Basado en Crane 2004)	27
Tabla 4.2-1. Descripción Diagrama de flujo del algoritmo de optimización	44
Tabla 5-1 Información de referencia de los compresores. Fuente CAGI	45

INTRODUCCION

En los modelos de gestión de operación cada planta, proveedor, comprador o centro de almacenaje es modelado como un eslabón de una cadena de suministro permitiendo minimizar los costos globales de producción de una compañía, satisfaciendo la demanda pronosticada de determinado producto y garantizando las restricciones de capacidad instalada y los niveles de inventario. En estos modelos las variables de decisión de cuanto producir o comprar y desde que planta o proveedor hacerlo son las principales causales de disminuir o aumentar el costo de producir un bien o servicio.

Si, se considera que el producto a ser entregado a los diferentes clientes, puede ser un flujo de gas o un líquido, la estructura del modelo de cadena de suministro no variara significativamente. De igual forma se tendrán plantas proveedoras, las cuales serian remplazados por compresores o bombas; los centros de distribución deben ser remplazados por tanques de almacenamiento y los clientes finales por equipos industriales quienes requieren una demanda variable de caudal y presión variables en función del trabajo que estén realizando.

La estructura de la cadena de suministro no sufre una gran modificación sin embargo las ecuaciones matemáticas que soportan cada una de las restricciones deberán ser replanteadas completamente, en primera instancia por que las variables de decisión se ven afectadas por las leyes de la física; en segundo orden por que a diferencia de un centro de almacenaje en el cual los productos entran en forma discreta, la acumulación de un fluido en un tanque se maneja de forma continua, lo cual implica restricciones dinámicas.

Partiendo de la metodología utilizada para resolver las cadenas suministros industriales en esta investigación se plantea el desarrollo un modelo que facilite la toma de las decisiones, en la operación continua de una cadena de suministro de aire comprimido, cuando el objetivo del administrador es minimizar los costos de compresión de aire a nivel industrial, teniendo siempre presente que se deben garantizar las restricciones físicas, tecnológicas y operativas de la red

1. GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1. ANTECEDENTES

Según Beamon (1998), Una cadena de suministro (CS) puede considerarse como un proceso integrado en el que un conjunto de organizaciones compuesto por proveedores, fabricantes y distribuidores trabajan conjuntamente desde adquisición de materias primas pasando por la transformación de esta y terminando en la distribución del producto ya terminado.

Al modelar los eslabones de un sistema productivo como una CS es posible perseguir diferentes intereses los cuales van desde mejorar el desempeño económico de la empresa al trabajar con objetivos como la minimización de los costos globales de operación, la maximización de las ventas, del beneficio o del retorno de la inversión; hasta intereses que buscan mejorar los indicadores de satisfacción del cliente los cuales buscan maximizar o cumplimiento del nivel de servicio, la flexibilidad en volumen o en plazo de entrega así como minimizar las entregas retrasadas. (Beamon B. M., 1998)

La modelación de cadenas de suministros cuando se deben tomar decisiones operativas que afecten todos los eslabones de la red de distribución de un producto es un tema ampliamente estudiado en la literatura, algunas investigaciones adoptan programación lineal (PL) y entera mixta (PM) como algoritmos de optimización. Mula (2010), hace una revisión literaria de dichos estudios entre los cuales se citan los siguientes artículos para PL y para PEM destacándose las siguientes investigaciones:

Lim (2006), presenta un modelo híbrido formado por un modelo de programación lineal entera mixta para decidir las capacidades de producción y almacenamiento de cada uno de los eslabones de una CS y un modelo de simulación discreta de eventos para ejecutar la planificación de la producción y la distribución. Sakawa (2001) elaboran un modelo de programación lineal entera mixta para la planificación de la producción y el transporte aplicado a una fábrica japonesa de elementos de construcción.

Los enfoques de PL y PEM pueden generar soluciones óptimas. Sin embargo exigen un alto tiempo computacional para converger en dichas soluciones. En situaciones no lineales, como los modelos donde los costos son funciones de la cantidad de producto enviado es necesario implementar técnicas de optimización no lineales (PNL), lo cual involucra una mayor complejidad en la modelación y en

los tiempos de cómputo. Razón por la cual son remplazados por enfoques heurísticos y metaheurísticos los cuales no necesariamente producen una solución óptima, sin embargo ofrecen soluciones cercanas al óptimo en tiempos de cómputos razonables. (Chan, 2004). Dentro de los diferentes métodos metaheurísticos utilizados en la optimización de las CS se destacan los de Colonia de Hormigas (Silva, 20009), Búsqueda Tabú (Melo, 2012) y Algoritmos Genéticos (Chan, 2004).

Las investigaciones en transporte de fluidos orientadas a disminuir los gastos de operación, modelando cada componente como una red de suministro son más comunes en las industrias que comprimen gas natural, vapor y en el transporte de agua y en donde se pueden destacar las siguientes investigaciones.

En la industria del gas natural, es un tema detalladamente estudiado, para esta industria la programación de operación de los compresores se hace de forma global teniendo en cuenta la red de suministro de gas. Wu (2000) junto a un grupo de investigadores presentó dos modelos, uno para el funcionamiento de compresor principal y otro para el consumo de combustible en función de los costos. Posteriormente Chebouba y Smati (2003) utilizaron modelación dinámica para la selección de unidades compresoras. Flórez (2005) planteó la selección de parámetros operacionales para las estaciones compresoras mediante el método del gradiente reducido teniendo como principal fin la disminuir los costos asociados al transporte del gas. Borraz y Ríos (2008). Teniendo también como objetivo minimizar la cantidad total de gas que consumen las estaciones compresoras implementaron un algoritmo de optimización por búsqueda tabú, donde modelaron una red no lineal teniendo como variables a considerar la presión y el flujo másico de gas. Para resolver problemas similares Mora y Ulieru (2005) y Chebouba (2006) programaron algoritmos genéticos y de colonia de hormigas respectivamente.

Paralelamente el alto costo de suministrar agua a los hogares ha motivado un incremento en las investigaciones que buscan garantizar la presión, caudal y calidad del agua entregada a los usuarios disminuyendo los costos de bombeo tanto para la operación de las redes ya existentes como para el diseño de las nuevas, para lograr ese objetivo los investigadores han implementado algoritmos similares a los utilizados en la optimización del transporte de gas natural como son: algoritmos genéticos (Savic, 1995), (Wu, 2001), (Jen-Ya Wang, 20009); colonia de hormigas (Tong, 2011), (Maier, 2003) ; recocido simulado (Cunha, 199) ; entre otros.

Sin embargo cuando el aire comprimido es el fluido a transportar, son más escasas las investigaciones que buscan disminuir los costos globales de compresión modelando de forma integral la red de suministro esto ocurre debido a que las bajas temperaturas de operación y la naturaleza poco combustible del fluido hacen que las variables de presión flujo y temperatura sean monitoreadas con menos rigurosidad en las redes de aire comprimido.

Debido a esto las investigaciones que buscan disminuir los gastos producto de la compresión de aire centran en el mejoramiento de la eficiencia individual de cada compresor; la primera busca encontrar los patrones de diseño que les permita obtener una mayor eficiencia del equipo, [(Tseng, 2006), (Yangguang, 2010)], y la segunda busca encontrar los parámetros de operación que les permita cumplir con dicho objetivo, concentrando sus esfuerzos en los compresores que tienen integrados variadores de frecuencia, [(C. Aprea, 2009), (Aprea, 2004) (Koury, 2000) (S. Shao, 2004)]. De los anteriores se destacan (Schiffmann, 2010) y (Duprez, 2007), quienes trabajaron en la modelación y optimización de la operación de compresores tipo scroll para la generación de aire caliente, aplicado a industrias y hogares.

Una tercera rama de investigación poco explorada como ya se ha hecho referencia anteriormente y en donde se ubica esta investigación las cuales buscan disminuir los costos globales de compresión, modelando de forma integral el sistema de compresión y en donde se encuentran (Han, 2004), quien busco disminuir el consumo eléctrico para una planta química, implementó un modelo capaz de predecir el consumo energético de los sistemas de suministro de aire y vapor un algoritmo de optimización cuadrática, que sujeto a las restricciones del sistema encontró los mejores puntos de operación. (Kong, 2011), quien abordó esta problemática buscando mejorar el desempeño global del sistema de los sistemas de aire comprimido, propone una metodología para calcular el pronóstico del caudal de aire a comprimir, sin embargo no tiene en cuenta el porcentaje de ese flujo que debe ser suministrado por cada uno de los diferentes compresores que hacen parte del sistema.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Las investigaciones que abordan el tema de minimizar el consumo eléctrico global en una red de suministro de aire comprimido (RSAC) modelándola de forma integral son escasas, razón por la cual no existe una metodología detallada sobre cómo afrontar este problema, si el objetivo es desarrollar un modelo que mas allá de pronosticar los flujos aire y presiones requeridos para cumplir las demandas de los procesos, sea capaz de determinar qué porcentaje de esa

carga debe ser suministrada por cada uno de los compresores en determinado instante de tiempo para que el gasto asociado a este proceso sea mínimo.

Para mitigar la falta de dicha metodología al modelar una RSAC se propone modelarla como CS. Donde las plantas proveedoras, serán remplazados por compresores; los centros de distribución deben ser remplazados por tanques de almacenamiento y los clientes finales por equipos industriales (Figura). Este símil es claro si comparamos las funciones de cada uno de los elementos de componen la RSAC donde:



Figura 1.2-1 Diagrama de una cadena de suministro y de una red de suministro de aire comprimido (elaboración propia)

El sistema de compresión suministra el producto de interés (aire), a un tanque de almacenamiento, partiendo de esta premisa es claro que su función es proveer un bien, ahora este sistema está compuesto por múltiples proveedores cada uno de ellos representado por un compresor, quienes manejan capacidades de envío mínimas y máximas y tienen asociado un gasto diferencial en función del número de unidades del producto que están abasteciendo (Caudal).

Los tanques de almacenamiento tienen como funciones consolidar el producto (aire) que sale de los diferentes proveedores (compresores) y manejar el inventario antes de ser enviado a los clientes finales. Funciones similar a las que cumplen los centros de distribución con la diferencia que a diferencia de estos donde los productos llegan por lotes en las RSAC el producto (aire) llega de forma continua.

En una cadena de suministro los clientes finales son el último eslabón de la cadena y son los responsables de dictar la demanda del producto que se está comercializando, en una red de suministro de aire comprimido este rol lo desempeñan los equipos industriales que necesitan este producto para operar.

Paralelamente en una RSAC las decisiones que deben ser tomadas con el objetivo de minimizar los costos globales de operación, se dan a un nivel táctico y/o operativo; sin embargo, es menester tener en cuenta que, a diferencia de los

procesos de abastecimiento de productos convencionales donde el producto se demora días o semanas en llegar desde el proveedor hasta los centros de distribución y usuarios finales, en el problema a estudiar el transporte del producto (aire) desde los proveedores (Compresores) hasta los centros de distribución (Tanques) y usuarios finales (Equipos Industriales) ocurre en minutos, lo cual implica una modelación continua y un cambio en los horizontes de tiempo con respecto al enfoque tradicional de una cadena de suministro (CS). De lo descrito anteriormente surge la siguiente pregunta:

¿Es posible desarrollar un modelo que facilite en la toma de decisiones para la gestión global de una red de suministro de aire comprimido, garantizando las condiciones operacionales de la red y teniendo como variable de decisión el costo de compresión del aire, partiendo de la metodología utilizada para resolver las cadenas suministros industriales?

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo General

Desarrollar un modelo que facilite la toma de decisiones para la gestión global de una red de suministro de aire comprimido, garantizando sus parámetros de operación y teniendo como variable de decisión la minimización de la demanda de electricidad para la compresión del aire, con base en la metodología utilizada para optimizar cadenas de suministro industriales

1.3.2. Objetivos Específicos

- Establecer las analogías y las ecuaciones que permiten relacionar una cadena de suministro y una red industrial de aire comprimido.
- Desarrollar un modelo Termoeconómico que relacione los gastos en electricidad de los compresores de aire para cumplir la demanda de flujo y presión a los usuarios finales.
- Diseñar con base en la literatura un algoritmo de optimización que mediante la programación de operación de los compresores, minimice los costos de electricidad globales de una red de suministro de aire comprimido garantizando su operación continua.

1.4. JUSTIFICACIÓN

El aire comprimido, por ser de bajo riesgo y gran versatilidad a la hora de emplearse, es utilizado en múltiples industrias dentro de los cuales destacan los sectores de alimentos, Textil, química, plásticas, mineras entre otras, paralelamente sus aplicaciones dentro de estas generan un sinnúmero de posibilidades, debido a que entre sus usos más comunes se encuentran ser refrigerante, fluido de limpieza, elemento transportador, activador de herramientas neumáticas y distintos elementos de control y ha demostrado ser indispensable en procesos robotizados.

En la mayoría de las aplicaciones industriales la fracción de costo energético producto de la compresión de aire es significativa en comparación con los costos energéticos generales de la compañía (Saidur, 2010). En países con desarrollados el consumo eléctrico de los sistemas de aire comprimido representan entre el 9% y el 10% de los consumos industriales, Unión Europea y Estados Unidos 10%, china 9,4%, (Radgen 2006, Senniappan 2009, Saidur, 2010); en la Figura 0-1, se muestra el gasto Eléctrico Anual generado por los sistemas de compresión de aire en la industria Europea.

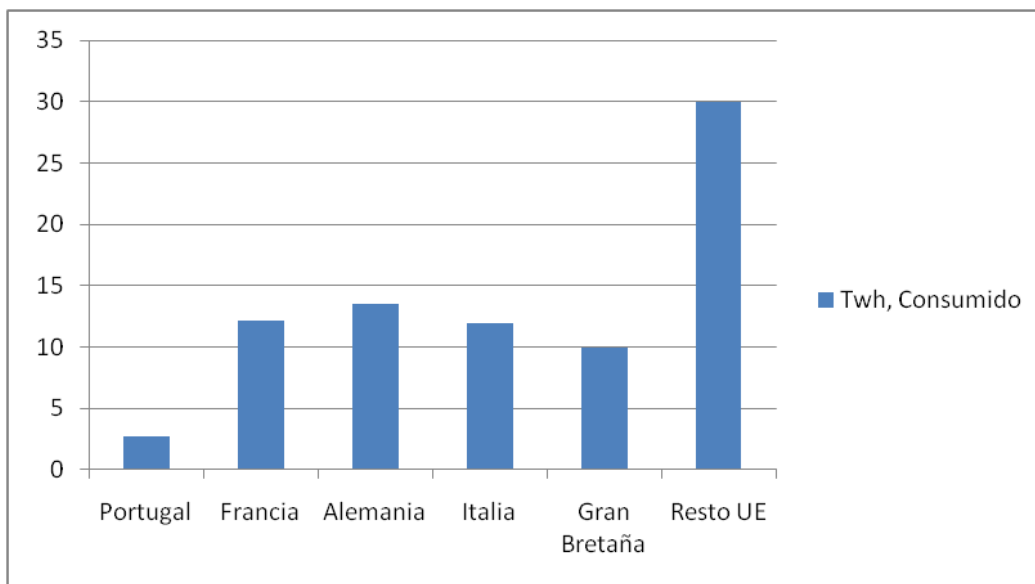


Figura 0-1. Consumo Eléctrico Anual Consumido por sistemas de compresión de aire en la industria Europea. Fuente (Saidur, 2010)

Las investigaciones científicas que buscan reducir estos costos, se encuentran enfocados a disminuir la potencia requerida por los sistemas de compresión dado que es el causal del 96% de estos costos. (Kaya 2002) Todo esto hace al

problema de minimizar el consumo de Eléctrico en un sistema de transporte de aire comprimido significativamente importante.

1.5. ALCANCES Y LIMITACIONES

Las modelaciones de los procesos se encuentran limitadas por las variables analizadas, por las consideraciones adoptadas por el modelador y por el recurso matemático que requieren, para obtener una solución o respuesta viable a partir de la modelación. Partiendo de esto es necesario determinar los supuestos y las variables de proceso que se consideraran en la presente investigación.

Supuestos.

- Se conocen los puntos de entrega de aire comprimido, al igual que las demandas de flujo y presiones del sistema.
- Se tiene un conjunto de compresores del cual se conocen sus curvas de operación además se asume que el caudal entregado corresponde a una función continua
- Solo se consideraran los gastos energéticos asociados a la compresión del aire, se excluyen por lo tanto los de mantenimiento, mano de obra, impuestos etc.
- El tanque es rígido y de volumen conocido, y el cambio de la temperatura del aire en su interior es tan pequeña que se considerara homogénea.
- Los equipos auxiliares como el post enfriador, las válvulas no serán modeladas desde el punto de vista fenomenológico del fluido.

VARIABLES DE PROCESO A CALCULAR

- Flujo másico de aire a comprimir
- Presión de suministro a la red
- Gasto energético por unidad de flujo.

Limitaciones

A pesar que el costo de los sensores de flujo se ha reducido en los últimos años y que los sistemas de control que basan su decisión en esta medición son más eficientes, su valor es bastante elevado con respecto a los sensores de presión, por lo cual la mayoría de las empresas industriales controlan sus procesos mediante la cuantificación de esta última variable de operación dejando el caudal

como una variable dependiente la cual no es cuantificada, dada esta limitante junto con la falta de un banco para realizar pruebas dificulta la consecución de datos históricos o reales de flujo. Si la demanda de caudal no es conocida, no se tendrá la suficiente información para validar el modelo para la toma de decisiones planteado.

1.6. METODOLOGÍA

La metodología de investigación de este proyecto es del tipo deductiva-descriptiva dado que se inicia con los conceptos generales de la operación de la red de aire comprimido y del funcionamiento de los compresores dependiendo de su tecnología, esto con el fin de construir un modelo que permita la simulación del comportamiento global de la red incluyendo: presiones de descarga y demandas de flujos variables, así como la modelación de tanques de almacenamiento y el cambio de propiedades termodinámicas lo que permite emular los procesos de secado del aire en los procesos de compresión.

1.6.1. Revisión literaria

Se fundamentará la ejecución del proyecto con base en publicaciones especializadas, información que permitirá el desarrollo del estado del arte y el marco teórico. Pasos obligados para establecer los fundamentos teóricos necesarios para cumplir los objetivos que se han planteado.

1.6.2. Identificación de la función objetivo y restricciones del problema.

Para lograr el objetivo de minimizar el consumo eléctrico global de los sistemas de compresión de aire cada uno de los componentes de la red conformará un eslabón de la cadena y se vea afectado por el eslabón anterior y por el subsecuente, esta metodología se basa en la utilizada para resolver los problemas de la gestión de la producción industrial, cuando se tiene un único producto, con múltiples periodos, y un determinado número de nodos proveedores, consumidores y centros de distribución, por lo cual se seguirán los siguientes pasos:

1.6.2.1. Proveedores:

Restricciones de capacidad de producción serán remplazados por las curvas de operación de cada compresor en base a esta se determinará si el compresor puede entrar a operar en determinado momento, y que parte del flujo total del sistema debe suministrar.

Costos diferenciales en función del número de unidades a producir, esta variación se encuentra soportada en que la potencia requerida por el compresor varía en función de la presión y el flujo suministrado. Relación que se utilizará para Plantear la ecuación de consumo eléctrico global del sistema de compresión la cual será utilizada como la función objetivo a minimizar

1.6.2.2. Centros de Distribución:

Para cumplir con las restricciones de inventario por periodo debe ser necesario modelar de forma continua el comportamiento del tanque de acumulación, para lo cual se utilizaran la ecuación de Vessel para un taque a presión en estado transitorio. Implementar las ecuaciones que permiten calcular los estados termodinámicos del proceso de secado y las cuales hacen parte de las restricciones del modelo a optimizar.

1.6.2.3. Clientes Finales:

En una cadena de suministro los clientes finales son el último eslabón de la cadena y son los responsables de dictar la demanda del producto que se está comercializando, en una red de suministro de aire comprimido este rol lo desempeñan los equipos industriales que necesitan este fluido para operar, y la demanda a suministrar es un caudal y una presión variables en el tiempo.

1.6.3. Selección e implementación del algoritmo de búsqueda.

En este punto teniendo en cuenta la revisión bibliográfica y las características del modelo, se implementará un algoritmo de búsqueda el cual permitirá minimizar el costo de compresión garantizando que las variables de proceso se encuentren dentro de sus rangos de operación.

1.6.4. Análisis de los resultados

En este punto se realizará el análisis de la información obtenida a partir de la modelación y optimización del modelo termo económico y por último la realización del informe final

2. MARCO TEORICO

2.1. GENERALIDADES CADENA DE SUMINISTRO

Según (Beamon B. M., 1998) Una cadena de suministro (CS) puede considerarse como un proceso integrado en el que un conjunto de organizaciones compuesto por proveedores, fabricantes y distribuidores trabajan conjuntamente desde adquisición de materias primas pasando por la transformación de esta y terminando en la distribución del producto ya terminado.

En los modelos de gestión de operación cada planta, proveedor, comprador o centro de almacenaje es modelado como un eslabón de una cadena de suministro permitiendo Minimizar los costos globales de producción de una compañía, el retorno de la inversión o la maximización de las ventas, satisfaciendo la demanda pronosticada de determinado producto y garantizando las restricciones de Capacidad instalada y los niveles de inventario. En estos modelos las variables de decisión de cuanto producir o comprar y desde que planta o proveedor hacerlo son las principales causales de disminuir o aumentar el costo de producir un bien o servicio.

El objetivo a perseguir en la modelación se encuentra restringido a su vez por las diferentes decisiones que se puedan tomar en los eslabones de la cadena, según Mula et al (2010) Los niveles de decisión en las CS se diferencian principalmente por el alcance y la influencia durante el tiempo de la decisión por tomar. En el nivel táctico pueden identificarse aspectos tales como la planificación de la producción y la distribución, la asignación de capacidades de producción y transporte e inventarios. En el nivel operativo, pueden distinguirse las operaciones de reabastecimiento y envíos, por ultimo en el nivel estratégico la selección de lugares de Producción, almacenaje y distribución, y subcontratación de la producción para minimizar el costo global.

Para cualquier nivel de decisión y de eslabones Beamon y Chen (2001) clasifica las cadenas de suministro según su complejidad teniendo en cuenta la topología estructural de estas, agrupándolas de esta forma en cuatro subconjuntos:

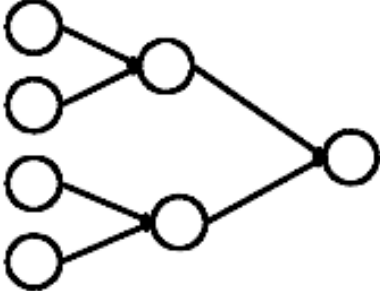
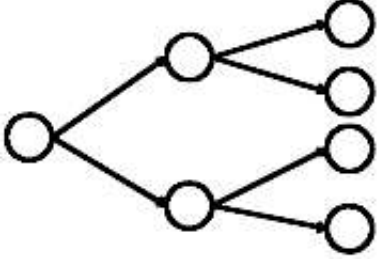
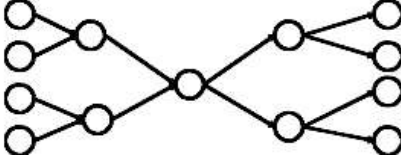
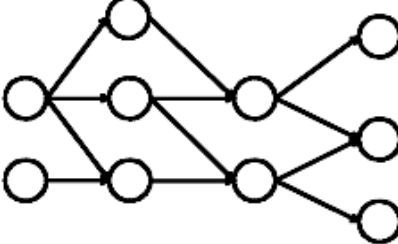
Tipo de Clasificación	Ejemplo	Características
Convergente		<p>Son estructuras en las que cada nodo de la CS tiene al menos un sucesor pero puede tener varios predecesores. Un ejemplo son las industrias navales y de construcción en estas, los componentes procedentes de los proveedores son ensamblados en los centros de producción o en la construcción</p>
Divergente		<p>Cada nodo tiene, al menos, un predecesor y varios sucesores. En este caso, una misma entidad distribuye sus productos a varias organizaciones en su CS. Ejemplo industria minera.</p>
Mixta (conjoined)		<p>Son de cadenas de suministro cuya estructura es una combinación de una CS convergente y una divergente. Estas estructuras son</p>
Red		<p>Estas no tienen las estructuras de ninguna de las tres citas anteriormente, estas exhiben una estructura general por lo cual no pueden clasificarse como convergentes, divergentes o mixtas, presentando una mayor complejidad que los tipos anteriores. Ejemplo es la fabricación de automóviles o manufactura.</p>

Tabla 2.1-1. Clasificación según tipología de las cadenas de suministro. (Beamon B. M., 2001)

2.2. MODELO BASE PARA UNA CADENA DE SUMINISTRO: MULTIPROVEEDOR-CENTROS DE DISTRIBUCION, MULTIPLES CLIENTES FINALES

En base a los modelos descritos por Sipper, (1998), se plantea el modelo general para la localización de Centros de Distribución, el cual describe el comportamiento de una cadena de suministro con la estructura mostrada en la

Figura 2.2-1. En este se expresa la función objetivo, esta se ve influenciada por las variables de decisión y las restricciones del sistema, en un modelo matemático. Este problema puede expresarse entonces como el de elegir un conjunto de valores de las variables de decisión de manera que maximice la función objetivo, sujetas a las restricciones dadas.

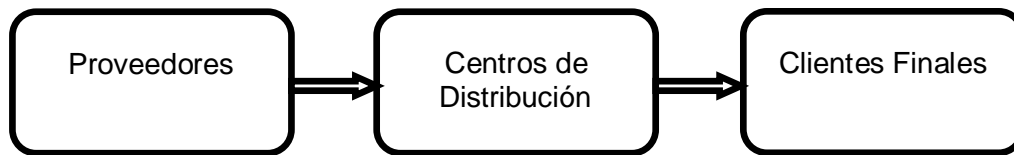


Figura 2.2-1 Grafo general para cadenas de suministro de para un centro de distribución.

Sub-índices

- j = *Producto*
- p = *Proveedores*
- d = *Centro de Distribución*
- m = *Mercado*
- t = *Periodo (tiempo)*

VARIABLES DE DECISIÓN

$X_{pjd t}$ = cantidad de componente j comprado del proveedor p enviado al centro de distribución d en el periodo t

$M_{jd m t}$ = Cantidad del producto j a enviar del centro de distribución d hacia el mercado m en el periodo t

Parámetros

$C_{j p d t}$ = costo unitario de compra y envío del producto j del proveedor p hacia el centro de distribución d en el periodo t

$m_{j d m t}$ = costo unitario de envío del producto j desde el centro de distribución d hacia el mercado m en el periodo t

$D_{j m t}$ = demanda del producto j en el mercado m en el periodo t

$P_{j p t}$ = capacidad de oferta del producto j por parte del proveedor p en el periodo t

p_{jmt} = precio de venta (o valor) del producto j vendido en la región m en el periodo t

Función Objetivo

Minimizar Costos: Donde los costos se componen por: Costo de producción variable y de envío desde el centro de producción al de distribución mas los costos de distribución del producto al consumidor final o al distribuidor minorista.

$$\sum_p \sum_j \sum_d \sum_t c_{jpdt} X_{jpdt} + \sum_j \sum_d \sum_m \sum_t m_{jdmt} M_{jdmt} \quad (2.2-1)$$

Sujeto a:

A continuación se presentan las restricciones de mercado, materiales, capacidad, logísticas y de flujo:

Capacidad de oferta de productos

$$\sum_j \sum_d X_{pjd} \leq P_{jpt}; \forall i, p, t \quad (2.2-2)$$

Inventarios Centros de distribución.

$$\sum_j \sum_d I_{jdt} = \sum_j \sum_d I_{jdt-1} + \sum_j \sum_d X_{pjd} - \sum_m M_{jdmt}; \forall j, d, t \quad (2.2-3)$$

Cumplimiento de demanda

$$\sum_d M_{jdmt} \geq D_{jmt}; \forall j, m, t \quad (2.2-4)$$

$$X_{pjt} \geq 0; \geq 0; M_{jdmt} \geq 0; \forall p, j, d, m, t \quad (2.2-5)$$

2.3. ALGORITMOS DE OPTIMIZACION USADOS EN LA MODELACION DE CADENAS DE SUMINISTRO

Del análisis de los antecedentes es posible observar que los algoritmos utilizados en la optimización de la administración de las cadenas de suministro se dividen en 4 grandes grupos: (i) programación lineal, (ii) programación no lineal, (iii) Métodos heurísticos y (iv) métodos meta heurísticos; en este aparte del documento se realizara una breve descripción de los mismos haciendo énfasis en los algoritmos que son adaptables al problema de estudio.

2.3.1. Programación Lineal.

La programación lineal (PL) tiene como misión determinar los valores de las variables de decisión que maximizan o minimizan una función objetivo. La decisión debe estar sujeta a satisfacer las restricciones dadas por la operación del sistema, garantizando de esta forma el proveer la selección de las mejores soluciones en una región factible de operación; sin embargo tiene como gran limitante que tanto la función objetivo como las restricciones deben ser lineales, lo cual restringe el número y el tipo de problemas al cual puede ser aplicable.

2.3.2. Programación No Lineal

La Programación no Lineal (PNL) comparte la misión de la PL sin embargo tanto la función objetivo, como las restricciones que determinan el conjunto de soluciones factibles pueden ser no lineales; lo cual implica una mayor complejidad en la estructura del problema y por tanto en la obtención numérica de las soluciones. En este sentido, hay que distinguir entre las diversas caracterizaciones de óptimo entendiendo que en función de la complejidad del problema se incrementa la probabilidad de encontrar o garantizar óptimos locales o relativos mas allá del óptimo global o absoluto para un problema de estudio.

2.3.3. Métodos Combinatorios

En un problema combinatorio de optimización se desea encontrar un orden específico sobre un conjunto de elementos discretos (Sait S. M, 1999). Para ilustrar esta definición puede considerarse el problema de encontrar la ruta que debe seguir un viajero para visitar un número determinado de ciudades, de manera que la distancia recorrida sea mínima. En este problema una solución es una posible ruta (orden), y la solución óptima es la ruta que minimiza distancia recorrida (Vélez, 2007). En general los algoritmos de optimización combinatoria resuelven

instancias de problemas que se creen difíciles en general, explorando el espacio de soluciones (usualmente grande) para estas instancias. Los algoritmos de

optimización combinatoria logran esto reduciendo el tamaño efectivo del espacio, y explorando el espacio de búsqueda eficientemente.

Los métodos habitualmente utilizados para resolver este tipo de problemas son del tipo heurístico o metaheurístico. Estos son capaces de generar soluciones al problema las cuales pretenden acercarse lo más posible al óptimo, esta falta de precisión la suplen con menores tiempos y requerimientos de cómputo con respecto a una búsqueda matemática o exhaustiva las cuales lo garantizan.

2.3.3.1. Métodos Heurísticos

Los algoritmos heurísticos son procedimientos simples, a menudo basado en el sentido común o en la experiencia que ofrece una buena solución (no necesariamente la óptima) de un modo fácil y rápido a problemas difíciles de resolver; y que suelen diseñarse de modo específico para cada problema. Un buen algoritmo heurístico debe requerir un esfuerzo computacional realista, su resultado debe estar cerca del óptimo y la probabilidad de obtener una mala solución debe ser baja.

Los algoritmos heurísticos se pueden clasificar en varias categorías entre las cuales se encuentran:

- Heurísticas constructivas: estas se pueden utilizar siempre que el problema se pueda resolver mediante decisiones sucesivas; y consiste en ir añadiendo componentes individuales a la solución inicial hasta que se obtiene una final factible. Un ejemplo es la búsqueda voraz.
- Heurísticas de mejora local: Estas parten de una solución cualquiera (no necesariamente aleatoria) y buscan en la vecindad de esta una mejor solución, hasta que ningún elemento en el vecindario es mejor que la solución de la que ya se dispone.

2.3.3.2. Métodos Meta heurísticos

Glover (1986) introduce el termino metaheurístico al definir una clase de algoritmos de aproximación que combinan heurísticos tradicionales con estrategias eficientes de exploración del espacio de búsqueda. Osman y Kelly (1996) proponen la siguiente definición: Los metaheurísticos son métodos aproximados diseñados para resolver problemas de optimización combinatoria, en los que los heurísticos clásicos no son efectivos; proporcionando un marco general para crear nuevos algoritmos híbridos, combinando diferentes conceptos

derivados de la inteligencia artificial, la evolución biológica y los mecanismos estadísticos. (Vélez, 2007) Destaca los algoritmos mas utilizados en esta categoría:

- Búsqueda tabú (tabu search),
- Algoritmos genéticos (genetic algorithms)
- Redes neuronales artificiales (artificial neural networks).
- Colonias de hormigas (ant collony optimization),
- Búsqueda local iterativa (iterated local search) y
- Computación evolutiva (evolutionary computing).

2.3.4. Algoritmos genéticos

El Algoritmo genético es una técnica de optimización desarrollada John Holland en 1960. Por medio de la cual se pueden encontrar soluciones aproximadas a problemas de gran complejidad computacional y se basa en un proceso de evolución simulada para explorar con eficiencia el espacio de búsqueda, partiendo del concepto de selección natural propuesta por Charles Darwin (1859) en el cual unos individuos con ciertas características son aptos para sobrevivir y por lo cual tienen una mayor probabilidad de transmitir estas características a su descendencia. Los conceptos y las operaciones básicas necesarias para implementar un algoritmo de búsqueda genético se describirán a continuación

El primer paso consiste en la generación de la población inicial, compuesta por un conjunto finito de cromosomas. A este último se le considera una cadena binaria que representa un individuo o solución, donde cada elemento en la cadena se conoce como gen. (Figura 2.3-1. Representación grafica de la población en un algoritmo genético. Y al criterio que evalúa la calidad de un cromosoma se le conoce como aptitud.

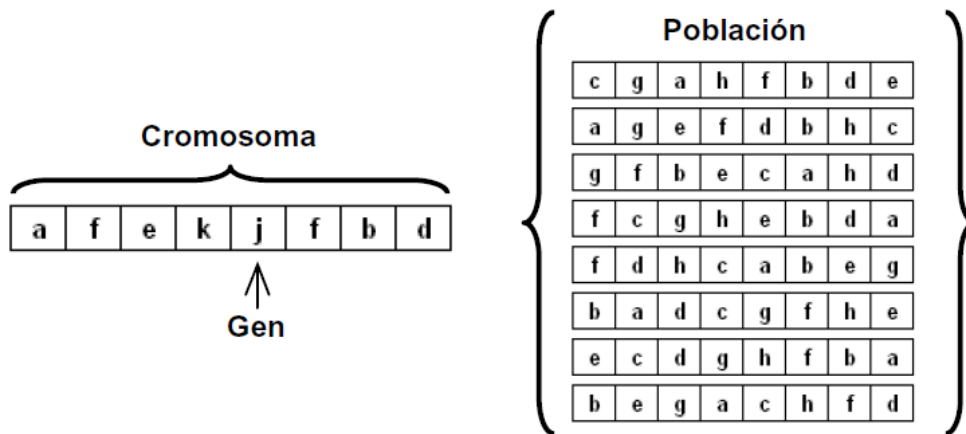


Figura 2.3-1. Representación grafica de la población en un algoritmo genético. (Vélez, 2007)

A mayor aptitud, mejor la solución y mayor la probabilidad de que sobreviva y transmita sus características a su descendencia. Una de los métodos mas utilizados para determinar la posibilidad de subsistir en función de la aptitud de un cromosoma es el de la ruleta planteado por Goldberg (1989). En éste cada solución o individuo x_i de la población tiene una posibilidad de pasar sus genes a la próxima generación, asociada a que tan buena fue la solución individual $f(x_i)$ respecto a el conjunto de soluciones globales $\sum_{i=1}^n x_j$. Ecuación (4.1-1)

$$p(x_i) = \frac{f(x_i)}{\sum_{i=1}^n x_j} \quad (2.3-1)$$

Las generaciones siguientes se generan por cruzamiento de esta forma Dos o mas individuos tomados de la población inicial o de generaciones posteriores, son seleccionados para jugar el papel de padres, estos son recombinados por medio de la selección de uno varios puntos de corte, para posteriormente intercambiar las secciones que se encuentran a la derecha de dicho punto. (De Jong ,1975). Ver Figura 2.3-2).

Método secundario para heredar los genes a la siguiente generación es la mutación, este se utiliza paralelamente al cruzamiento y tiene como función evitar que las soluciones queden en una región de óptimos locales ayudando de esta forma a la convergencia del problema. Este método consiste en cambiar a la azar o de forma preestablecida uno de los genes que conforman los cromosomas del cruzamiento y evaluarlo en la función objetivo. (Ver Figura 2.3-2)

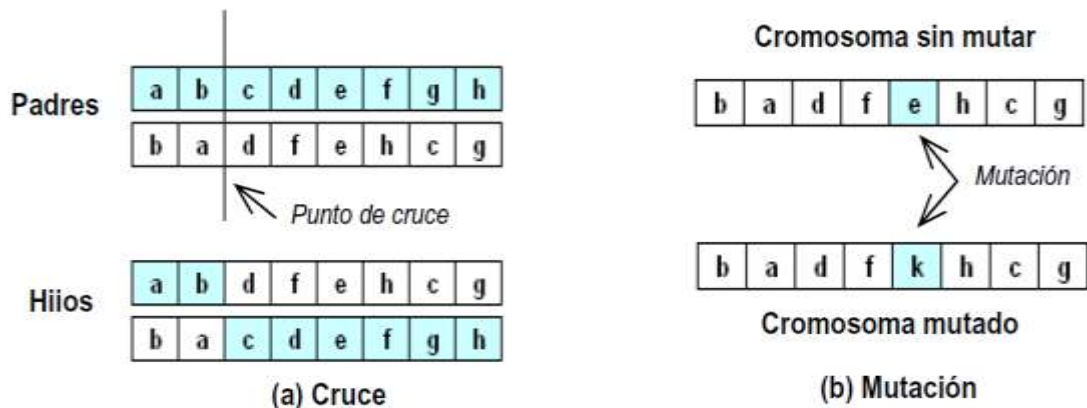


Figura 2.3-2. Operaciones básicas en algoritmos genéticos. Fuente (Vélez, 2007)

2.3.5. Complejidad algorítmica

La complejidad computacional determina si un problema es fácil o no en función de los algoritmos conocidos para resolverlo. Y la descripción de este tema enunciado en este aparte de la investigación es tomada del artículo de Vélez (2007).

“Un algoritmo es un conjunto ordenado y finito de operaciones que permiten solucionar un problema. Para la teoría de la complejidad computacional, la capacidad de un algoritmo para resolver un problema la determina el número de operaciones aritméticas necesarias para su ejecución. Un problema es fácil si existe un algoritmo que lo resuelve en tiempo polinomial; es decir, si el número de operaciones necesarias para que el algoritmo resuelva el problema es una función polinomial del tamaño del problema. Si esta función no es polinomial, se dice que el algoritmo es no polinomial y el problema se considera difícil.

Aunque esta clasificación parezca sólo de interés teórico, en la práctica resulta de gran importancia. Saber si un problema se puede resolver en tiempo polinomial equivale a saber si es posible encontrar la solución óptima en unos cuantos segundos o minutos o si, por el contrario, son necesarios años o incluso siglos para hacerlo. En el último caso surge la necesidad de desarrollar estrategias para encontrar soluciones buenas a un costo computacional razonable. Ahuja, Magnati y Orlin (1993), Bertsimas y Tsitsiklis (1997), T'kindt y Billaut (2005) y Tovey (2002) presentan un tratamiento detallado sobre el tema.

De otro lado, mientras los problemas se clasifican en fáciles o difíciles, los algoritmos se clasifican en exactos o completos y de aproximación o heurísticos.

Los algoritmos exactos son aquellos en los que existe la garantía de que encontrarán la solución óptima; mientras que para los algoritmos de aproximación sólo se puede afirmar que encontrarán una solución aceptable, no necesariamente óptima (Sait S. M, 1999). “

Como los algoritmos exactos más eficientes conocidos hoy para resolver problemas combinatorios requieren un número exponencial de operaciones (Lenstra, 2003), podemos afirmar que estos problemas son difíciles. Estos algoritmos, entre los que se encuentran la programación dinámica y el algoritmo de ramificación y acotamiento, implican un costo computacional en ocasiones tan elevado que hace que deban descartarse como alternativa de solución.

2.4. GERALIDADES DE LAS REDES DE SUMINISTRO DE AIRE COMPRIMIDO

Una red de transporte de aire comprimido consiste en un conjunto de tuberías que parten del depósito y que conducen el aire comprimido a diferentes tipos de equipos que operan bajo principios neumáticos; por lo cual es necesario que el aire se entregue a presiones mayores que la atmosférica, razón por la cual es necesario la implementación de sistemas de compresión, estos se pueden desglosar generalmente en tres subprocesos: (2.4.1) Compresión, (2.4.2) Secado y (2.4.3) Almacenamiento y Transporte.

2.4.1. Compresores

En una red de suministro de aire comprimido a nivel industrial, la potencia requerida para llevar a cabo todos los subprocesos involucrados en la operación es proporcionada por motores eléctricos, siendo el proceso de compresión el que demanda una mayor potencia y se estima que representa el 96% de la potencia global requerida (Kaya, 2002) la cual que se puede traducir a costos cercanos al 10% del consumo eléctrico en países de la Unión Europea, Estados Unidos y china. (Saidur, 2010);

Teniendo en cuenta los picos en el consumo energético que conllevan prender un compresor, estos pueden trabajar en 3 condiciones de operación: a carga parcial o total, donde el consumo depende de las condiciones de operación, en vacío donde el compresor a pesar de estar operando no está comprimiendo y donde consume alrededor del 20% del consumo eléctrico a carga total y el tercer estado apagado el cual solo es utilizado cuando se estima que el compresor no está próximo a entrar en funcionamiento.

Los sistemas de compresión generalmente se encuentran conformados por equipos de diferentes características operativas y tecnologías (tornillo, embolo o centrífugos). Estos están diseñados para manejar valores fijos de presión a la descarga, conocida como presión nominal o de diseño. Dependiendo de la tecnología del equipo, la presión nominal puede ser entregada en un rango de caudales o en un punto específico.

2.4.1.1. Tipos de Compresores

Los compresores se subdividen en 2 categorías los de desplazamiento positivo y las de flujo continuo o turbo máquinas y su subdivisión se muestra a continuación en la Figura 2.4-1.

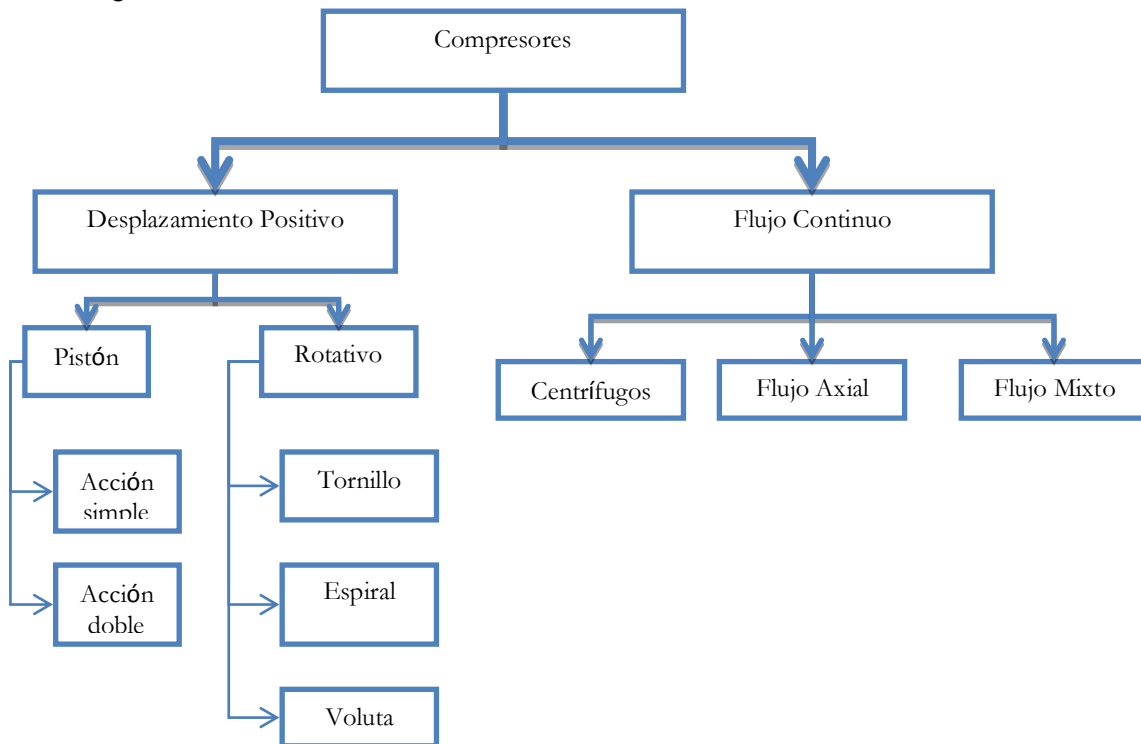


Figura 2.4-1. Tipos de compresores. Fuente US. Energy department

Tipo	Descripción	Característica
Compresor Rotativo de Lóbulos	Posee dos rotores simétricos y en paralelo sincronizados por engranajes.	Produce altos volúmenes de aire seco a baja presión. Requieren flujo constante. Posee pocas piezas en movimiento.

<p>Compresores Rotativos Tipo Tornillo</p>	<p>Poseen dos tornillos engranados o entrelazados que rotan paralelamente con un juego o luz mínima, sellado por la mezcla de aire y aceite.</p>	<p>Silencioso, pequeño y de bajo costo.</p> <p>Flujo continuo de aire.</p> <p>Fácil mantenimiento.</p> <p>Presiones y volúmenes moderados.</p>
<p>Compresores Rotativos Tipo Paletas</p>	<p>En el compresor rotativo a paletas el eje gira a alta velocidad mientras la fuerza centrifuga lleva las paletas hacia la carcasa (estator) de afuera. Por la carcasa ovalada, continuamente entran y salen por canales en su rotor.</p>	<p>Silencioso y Pequeño.</p> <p>Flujo Continuo de Aire.</p> <p>Buen Funcionamiento en Frio. Sensible a Partículas y Tierra.</p> <p>Fácil Mantenimiento.</p> <p>Presiones y Volúmenes Moderados</p>
<p>Compresores Alternativos</p>	<p>También conocido como compresor a Pistón, es semejante al motor de combustión interna de un auto y puede ser de efecto simple para baja presión o doble para alta presión.</p> <p><i>De Efecto Simple:</i> de baja presión, y normalmente usado en talleres para pintar, soplar, inflar neumáticos y operar herramientas neumáticas.</p> <p><i>De Efecto Doble (Dúplex):</i> usado para altas presiones en sistemas de compresión de gases a licuados</p>	<p>Ruidoso y Pesado.</p> <p>Flujo de Aire Intermitente.</p> <p>Funcionamiento en Caliente hasta 220°C.</p> <p>Mantenimiento Costoso Y de necesidad Periódica.</p> <p>Alta Presión con Moderado Volumen.</p>
<p>Compresores Dinámicos O de flujo continuo</p>	<p>Los compresores dinámicos pueden ser Centrífugos (radiales) o de Flujo Axial. Una de las ventajas de ambos es que su flujo es continuo. Una serie de paletas en un solo eje que gira, absorbiendo el aire/gas por una entrada amplia y acelerando por fuerza centrifuga para botarlo por el otro lado. Estos compresores tienen pocas piezas</p>	<p>Aire sale libre de aceite.</p> <p>Flujo de aire/gas es constante.</p> <p>Caudal de flujo variable con una presión fija.</p> <p>Caudal alto a presiones moderadas y bajas.</p>

en movimiento con lo cual reducen la pérdida de energía por fricción y calentamiento.

Tabla 2.4-1 Características y descripción por tipo de compresor.(Basado en Crane 2004)

2.4.1.2. Curva De Operación De Los Compresores

La curva de operación de un compresor relacionan la potencia requerida para suministrar un caudal a una presión dadas, en general son particulares por cada compresor sin embargo siguen la misma tendencia dependiendo de la familia a la cual este pertenezca, indiferentemente de si son de la misma marca o no. A continuación se muestra una curva de operación típica para un compresor rotativo sin variador de frecuencia. (Figura 2.4-2)

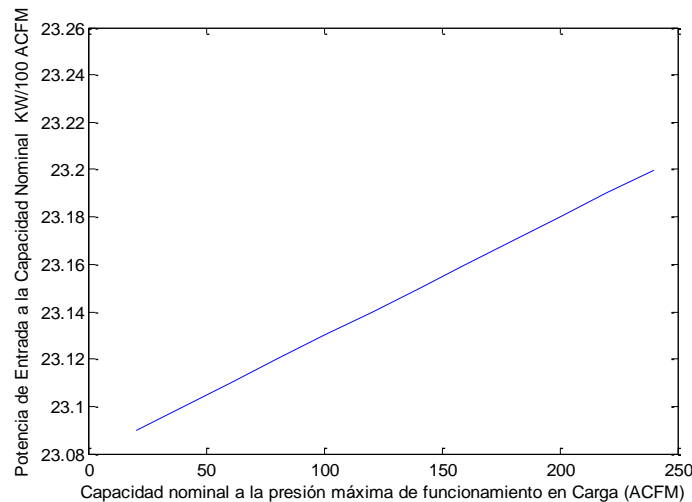


Figura 2.4-2. Curva de Operación, Compresor Rotativo Kaeser, fuente CAGI

Un variador de frecuencia es un dispositivo que permite controlar el régimen de giro de un motor a través de la frecuencia de alimentación suministrada al motor. Dentro de las principales ventajas de usar estos dispositivos se encuentra: la reducción de costos de energía, reducción de picos de tensión (a partir de motores de corriente alterna), por lo cual son altamente usados cuando se tienen demandas de caudal altamente variables en el tiempo sin embargo tienen como desventaja la sensibilidad de estas unidades, especialmente al calor y la humedad. En la Figura 2.4-3

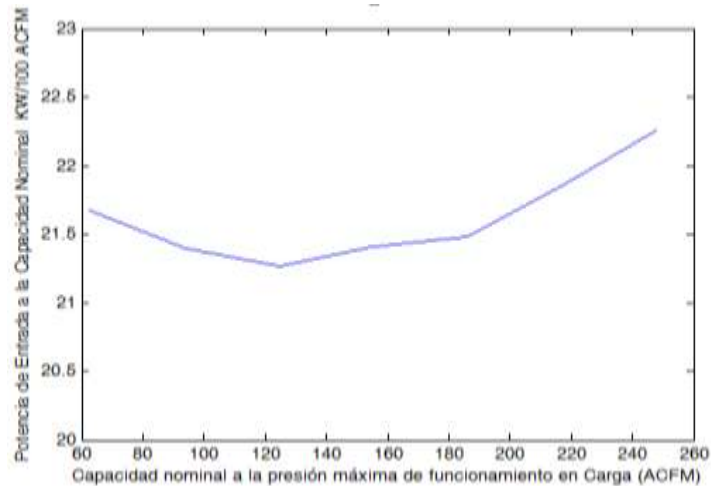


Figura 2.4-3 Curva de Operación, Compresor Rotativo Ingersoll Rand con Variador de Frecuencia, fuente CAGI

En el anexo A se compilan las curvas de operación de los compresores utilizados en esta investigación los cuales tienen las características de ser un conjunto heterogéneo conformado por compresores de diferentes tecnologías con y sin variador de frecuencia, ahora bien para poder emular el comportamiento de dichos equipos es necesario parametrizar las curvas en ecuaciones matemáticas, ítem que será tratado a continuación.

2.4.1.3. Parametrización de curvas de operación

Partiendo de las curvas de operación se generan las ecuaciones matemáticas que permiten emular el comportamiento del compresor de aire, dadas una presión de descarga fija y un caudal de aire variable, se determina el gasto eléctrico en unidades de potencia por caudal comprimido (kw/cfma). En la Figura 2.4-4 se muestra la curva de operación para un compresor de rotativo, con su respectiva ecuación características y los residuales obtenidos al comparar los datos reales con los obtenidos por la regresión.

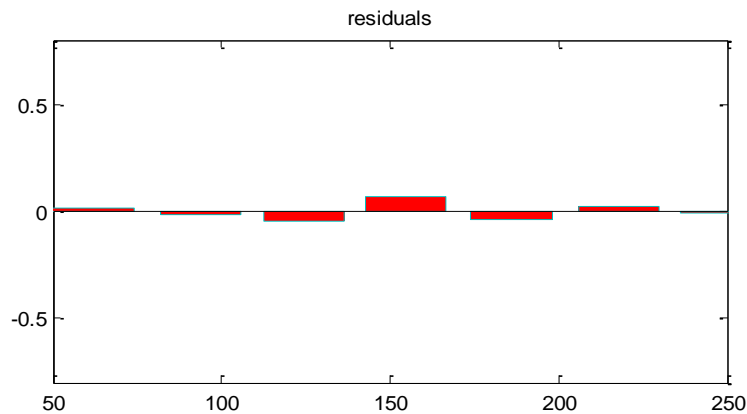
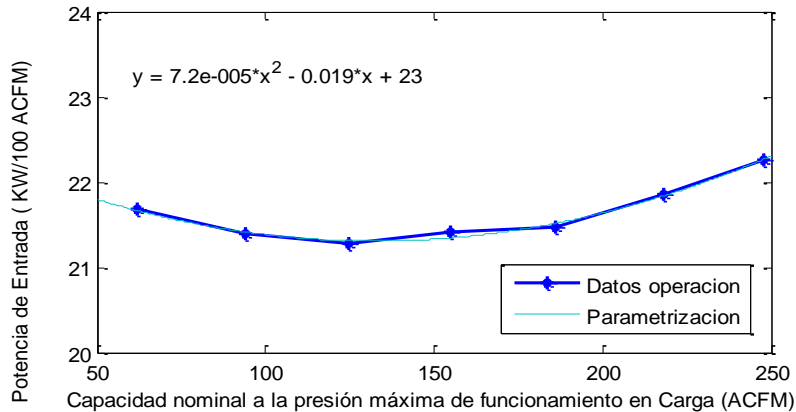


Figura 2.4-4 Curva de Operación, Compresor Rotativo Ingersoll Rand con Variador de Frecuencia, fuente CAGI. Residuales de la ecuación matemática de la curva.

La ecuación 6 muestra la regresión matemática de la curva de operación.

$$Pot = 7.2 \times 10^{-5} Q^2 - 0,019Q + 23 \quad (2.4-1)$$

Las curvas de los compresores a modelar representan la Potencia requerida para comprimir un caudal de aire a una presión dada bajo unas condiciones de operación fijas de temperatura y humedad (*ACFM*, pies cúbicos reales por minuto); Sin embargo el caudal requerido por equipos se dan generalmente en condiciones estándar (*SCFM*, pies cúbicos estándar por minuto), 0% de humedad relativa, 14,6 psia y 60°F, ara pasar de *ACFM* a *SCFM* se debe utilizar la siguiente ecuación:

$$ACFM = SCFM \left[\frac{Pstd}{(Pact - Psat \Phi)} \right] \left(\frac{Tact}{Tstd} \right) \quad (2.4-2)$$

2.4.1.4. Gastos Energéticos

El análisis de ciclo de vida para los sistemas de compresión de aire (Figura 1.2-1), muestra que el costo energético asociado a la operación es casi 5 veces el costo de adquisición de los equipos de compresión y 13 veces mayor que el de mantenimiento, lo cual simplifica la escogencia de un nuevo compresor, o la disminución del costo de general del equipo sabiendo que el 80% de los costos totales se asocia a la operación.

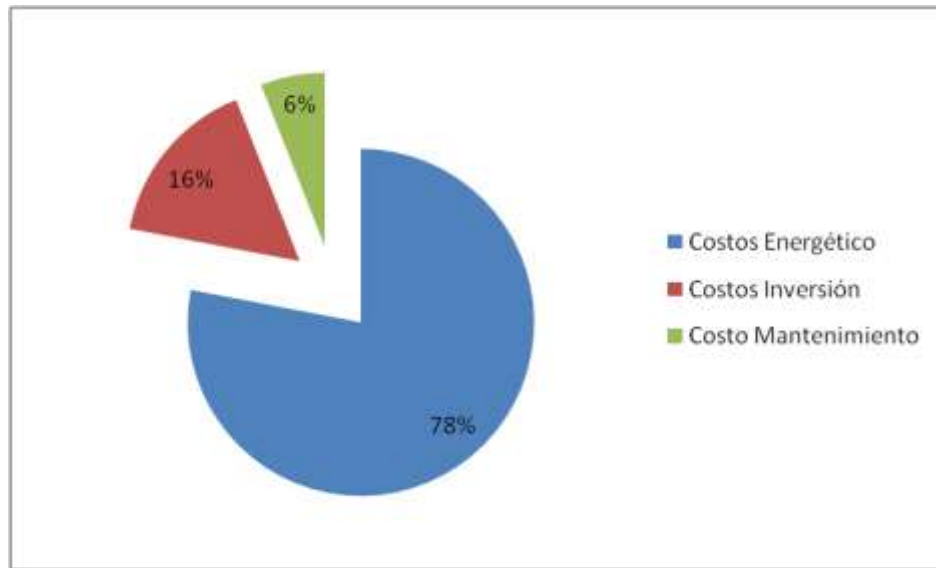


Figura 2.4-5. Análisis de ciclo de vida, para los sistemas de compresión de aire.
Fuente (Saidur, 2010)

Tradicionalmente la ecuación que se utiliza para calcular los costos de operación debido al gasto eléctrico de un compresor en un periodo de tiempo de representa

en la

$$costos(\$) = \frac{pot_{comp} * t_{operacion} * costo_{unit.elec.}}{n_{motor}}$$

(2.4-3).

$$costos(\$) = \frac{pot_{comp} * t_{operacion} * costo_{unit.elec.}}{n_{motor}} \quad (2.4-3)$$

Donde:

Costo de electricidad anual gastado ($costos(\$)$), potencia del compresor ($pot_{comp.}$), ($t_{operacion}$) horas de operación, costo unitario de electricidad ($costo_{unit.elec.}$) eficiencia del compresor (n_{motor}).

Dado que el costo de un kilovatio hora varía en función de la ubicación de la planta industrial no es posible hacer comparaciones directamente con este indicador para industrias que se encuentren en diferentes ubicaciones aunque el sistema de compresión sea similar, razón por la cual se utiliza el gasto energético como indicador de los requerimientos del compresor para operar. Este se puede expresar de dos formas en unidades de energía kwh o de potencia relativa al caudal comprimido kw/m³

$$\text{Energía Requerida} = \frac{\text{pot}_{\text{comp.}} \cdot t_{\text{operacion}}}{n_{\text{motor}}}$$

(2.4-4)

$$\text{Potencia por Caudal comprimido} = \frac{\text{pot}_{\text{comp.}} \cdot t_{\text{operacion}}}{n_{\text{motor}} \cdot Q_{\text{Comp}}}$$

(2.4-5)

2.4.2. Secado del aire comprimido

El aumento de la temperatura del fluido consecuencia del proceso de compresión produce a su vez un aumento en la humedad relativa del aire con respecto a la ambiental; una alta humedad relativa puede afectar la operación de los equipos industriales por lo cual es implementación procesos de secado antes del almacenamiento es necesaria para la posterior distribución del aire.

Para lograr este objetivo se instala un postenfriador el cual es un intercambiador de calor ubicado entre el compresor y el tanque, el cual tiene la función de reducir la temperatura del aire para condensar, separar y drenar el vapor de agua, casi todos los sistemas industriales los poseen, salvo aquellos en que el aire caliente no resulta perjudicial, tales como procesos de forja o fundición.

Es posible simular el comportamiento de este sistema como un proceso termodinámico, el cual es función de la presión y temperatura del aire a la descarga del compresor y las condiciones de operación del postenfriador (temperatura de salida y caída de presión). Para hacer esta evaluación es necesario apoyarse en las ecuaciones psicométricas expresadas a continuación (ecuaciones tomadas del (Yunus A, 202)):

Calculo de:	Constantes	Ecuaciones: Donde T (k), P(psia)
--------------------	-------------------	---

Presión de Saturación (dada una temperatura):	S_i	$T \leq 0$	$T > 0$	$T(K) = T(^{\circ}C) + 273.15$
	A_1	5.6745359* 10 ³	5.8002206* 10 ³	$P_{sat} = \frac{A_1}{T} + A_2 + A_3 * T + A_4 * T^2 + A_5 * T^3 + A_6 * T^4 + A_7 * \log(T)$ (2.4-6)
	A_2	6.3925247	1.3914993	
	A_3	9.677843*10 ⁻³	48.640239* 10 ⁻³	
	A_4	0.6221570* 10 ⁻⁶	41.764768* 10 ⁻⁶	
	A_5	2.0747825* 10 ⁻⁹	14.452093* 10 ⁻⁹	
	A_6	0.9484024* 10 ⁻¹²	0	
	A_7	4.16735019	6.5459673	
Temperatura de Saturación, (dada una presión):	A_0	19.5322		
	A_1	13.6626		
	A_2	1.17678		
	A_3	-0.189693		
	A_4	0.087453		
	A_5	-0.0174053		
	A_6	0.00214768		
	A_7	-0.138343/1000		
	A_8	0.38/100000		
	C	0.00145		
Entalpia de Vaporización:	Para temperaturas entre 0 y 65 °C:			$h_{fg} = 2501 - 2.42 * T$ (2.4-9)
humedad absoluta	dada una presión atmosférica saturada y presión de vapor			$w = 0.62198 * \frac{P_v}{P - P_v}$ (2.4-10)
Temperatura de rocío	Para temperaturas mayores a 0°C:			$T_{dp} = -35.957 - 1.8726 * \log(P_v) + 1.1689 * (\log(P_v))^2$ (2.4-11)

Tabla 2.4-2 ecuaciones psicometría tomadas de (Yunus A, 202)

2.4.3. Tanque de almacenamiento

El tanque de acumulación se ubica a la salida del compresor y tiene dos funciones principales: (i) disminuir las fluctuaciones causadas por el caudal de salida del compresor y (ii) Acumular aire comprimido; esto permite controlar de una mejor manera el suministro de fluido a los equipos industriales el cual es variante en el tiempo.

Partiendo del principio de conservación de masa en el cual se establece que la transferencia neta de masa hacia o desde el volumen de control durante un intervalo de tiempo, es igual al cambio neto en la masa total dentro del volumen de control en el intervalo; es posible plantear el modelo matemático que emula el comportamiento de un tanque:

$$m_{ent} - m_{sal} = \Delta m_{VC}, \text{ donde } \Delta m_{VC} = \frac{dm_{VC}}{dt} \quad (2.4-12)$$

Debido a que el aire tiene la característica de ser un fluido compresible su densidad es variable en función de la presión y temperatura por lo cual es necesario expresar la ecuación anterior en función de esta.

$$(\rho_{ent} \cdot \dot{V})_{ent} - (\rho_{sal} \cdot \dot{V})_{sal} = \frac{dm_{VC}}{dt} \quad (2.4-13)$$

3. MODELACIÓN REDES DE SUMINISTRO DE AIRE COMPRIMIDO

3.1. FUNCIÓN DE GASTO ELÉCTRICO POR UN CONJUNTO DE COMPRESORES.

Retomando la analogía planteada anteriormente donde los compresores entran a jugar un rol similar a el de los proveedores en una cadena de suministro donde sus costos de venta son diferenciales en función del número de unidades enviados a los centros de distribución, suposición que se encuentra soportada en que la potencia requerida por el compresor varía en función de la presión y el flujo suministrado.

Relación que se utilizara para Plantear la ecuación de consumo eléctrico global del sistema de compresión la cual será utilizada como la función objetivo a minimizar y se construirá en base a las ecuaciones 6 Y 7 las cuales describen el comportamiento individual de un compresor y su gasto energético.

A hora bien, partiendo de que la intención de esta investigación es que el desarrollo documentado pueda ser aplicable a cualquier sistema de compresión, sus soluciones no debe ser dependiente a la variables ajenas a la operación del sistema razón por la cual variables como el costo producto del consumo eléctrico deben ser descartadas, a pesar de que es esta variable es de interés para cualquier operario de una red de aire, es dependiente del costo del kilovatio hora, el cual a su vez varia dependiendo de la ubicación, la forma de compra y el consumo total de la planta industrial.

Para solucionar dicho impase se trabajara con el gasto energético asociado a comprimir 100 ACFM, datos que es posible obtener a partir de la parametrizacion de las curvas de operación de los compresores independientemente del tipo o el fabricante.

Si bien en el problema a estudiar el transporte del producto (aire) desde los proveedores (Compresores) hasta los centros de distribución (Tanques) y usuarios finales (Equipos Industriales) ocurre en minutos, lo cual implica una modelación continua la función objetivo se maneja de forma discreta con el fin de facilitar la entrada y salida de operación de los compresores y la validación de las restricciones del sistema.

$$\text{Min } Z(Pd_{t,c,i}, Qc_{t,i}) = \sum_{t=1}^t \sum_{i=1}^n Pot_{t,i} \quad (3.1-1)$$

Donde Los caudales comprimidos $Qc_{t,i}$, presiones de descargas $Pd_{t,i}$, y gasto producto de la compresión $Pot_{t,i}$ deben estar contenidas dentro de la curva de operación del compresor i , perteneciente al conjunto de compresores c , que se encuentran en el sistema.

La ecuación $Pot_{t,i} = C1_i Qc_{t,i}^2 + C2_i Qc_{t,i} + C3_i$

(3.1-2), representa el gasto energético global de la red de aire comprimido, donde el gasto individual de cada compresor Pot , depende del tiempo de operación y de la curva de operación específica de cada compresor. En general si son compresores rotatorios con variador de frecuencia los compresores siguen una tendencia marcada por la ecuación (3.1-2); por el contrario si son compresores de desplazamiento positivo o rotativo sin variadores de frecuencia, se rigen por la ecuación (3.1-3).

$$Pot_{t,i} = C1_i Qc_{t,i}^2 + C2_i Qc_{t,i} + C3_i \quad (3.1-2)$$

$$Pot_{t,i} = C2_i Qc_{t,i} + C3_i \quad (3.1-3)$$

La importancia de esta función, no solamente radica en la operación día a día del equipo, juega un papel primordial en el escenario que se desee incorporar un nuevo equipo al conjunto de compresores de la empresa.

3.2. RESTRICCIONES FÍSICAS Y OPERATIVAS DE LA RED DE SUMINISTRO DE AIRE.

A continuación se presentan las restricciones operativas del sistema las cuales se encuentran inspiradas en la modelación de una cadena de suministro la cual tiene una topología compuesta por múltiples proveedores un centro de distribución y múltiples clientes finales.

Restricción capacidad de envío (proveedores):

En general un proveedor tiene una capacidad de venta determinada por su sistema de producción, generando un límite máximo del número de unidades que se puede comprar a cada uno de ellos, sin embargo ciertos tipos de proveedores manejan también un límite inferior al enviar un lote mínimo de producto; en los sistemas de compresión se maneja este ultimo caso el compresor tiene un rango de flujos en el que es capaz de operar garantizando la presión de suministro al sistema. De esta condición surgen las siguientes restricciones.

Los caudales comprimidos Qc_i , presiones de descargas Pd_i , y regímenes de giro S_i deben estar contenidas dentro de la curva de operación del compresor Y_i , perteneciente al conjunto de compresores c , que se encuentran en el sistema, de no ser así este no podrá entrar a operar.

$$(Qc_i, Pd_i, S_i) \in Y_i \quad i \in c \quad (3.2-1)$$

Restricciones Demanda:

El principal objetivo de una cadena de suministro es satisfacer una demanda pronosticada cumpliendo con las restricciones del sistema al menor costo posible; los clientes finales son el último eslabón de la cadena y son los responsables de dictar la demanda del producto que se está comercializando, en una red de suministro de aire comprimido este rol es desempeñado por equipos industriales que necesitan este fluido para operar, y la demanda a suministrar es un caudal y una presión variables en el tiempo.

Partiendo de lo anterior es claro que, el caudal Qa_t y la presión Pa_t de alimentación a la red debe ser mayor o igual a la demandas de caudal DQ_t y presión DP_t aire requerida para la operación de la misma.

$$Qa_t \geq DQ_t \quad (3.2-2)$$

$$Pa_t \geq DP_t \quad (3.2-3)$$

Y en donde Qa_t y Pa_t corresponden a los valores de flujo y presión a la salida del tanque de almacenamiento.

Restricciones de Inventario:

Los centros de almacenamiento manejan un período de gestión de inventario en el que toman decisiones sobre cuanto pedir a sus proveedores basados en políticas tradicionales de pronóstico e inventarios. Dichas políticas están orientadas a la optimización de los procesos mediante la consecución de menores costos de aprovisionamiento.

Los tanques de almacenamiento en una red de aire comprimido tiene similar función es decir consolida el caudal proveniente de los diferentes compresores y maneja un inventario del producto antes de ser enviado a los clientes finales; las diferentes estrategias de control deciden cuanto flujo debe salir del tanque para mantener una presión en la línea de suministro.

La ecuación 3.2-4, es utilizada para calcular el inventario actual en un eslabón de una cadena de suministro, en función del inventario en el tiempo anterior y la llegada y salida de producto; ecuación similar al balance de masa en un volumen de control (ecuación 3.2-4), en la cual el cambio en la masa acumulada en el sistema es función a el caudal de entrada y salida en el tiempo.

$$\sum_i^c \rho c_t \cdot Q \dot{c}_t - \rho a_t \cdot Q \dot{a}_t = \frac{dm_a}{dt} \quad (3.2-5)$$

Si comparamos la ecuación 3.2-4, con la de inventario (ecuación 2.2-3), podemos observar que el componente $\frac{dm_a}{dt}$ es análogo al cambio de inventario en función en un periodo de tiempo $\frac{\Delta t}{\Delta t}$, teniendo en cuenta que la dinámica del sistema de aire comprimido es continuo en el tiempo. Para manejar los niveles de inventario del fluido en el tanque de almacenamiento, es necesario garantizar la presión en el tanque, debido a que son variables dependientes; si la presión del tanque es mayor de la presión de entrega a la red y menor que la presión de descarga del compresor, el flujo a través del sistema cumplirá las restricciones operativas. (Ecuación 3.2-5)

$$P_{c_t} < P_{a_t} < P_{D_t} \quad (3.2-6)$$

Con el objeto de determinar la relación del flujo de salida con la presión de la salida al tanque de almacenamiento, es necesario implementar el balance energético en el tanque: ecuación 2.5-9.

$$\left(\sum_i^c \rho c_t Q \dot{c}_t P_{c_t} \right) * v - \rho a_t Q \dot{a}_t P_{a_t} = C_v Vol \frac{d}{dt} \left(\frac{P_a}{Z} \right) \quad (3.2-7)$$

Asumiendo que la presión a la salida del tanque es igual a la presión en el interior del tanque, y calculando las propiedades a presiones y temperaturas de trabajo el factor de compresibilidad Z varía entre 0.97 y 0.99 por lo cual es posible trabajarlo como gas ideal. Por lo cual se simplificará la ecuación anterior obteniendo la ecuación 3.2-7.

$$\left(\sum_i^c \rho a_t Q \dot{c}_t P_{c_{ti}} \right) * v - \rho a_t Q \dot{a}_t P_{a_t} * v = C_v Vol \frac{dP_a}{dt} \quad (3.2-8)$$

Para el cálculo de la caída de presión entre el compresor y el tanque de almacenamiento, así como entre la salida del tanque y la red de transporte se utilizan las ecuaciones 3.2-8 y 3.2-9 respectivamente las cuales se derivan de la ecuación de Bernoulli.

$$\frac{P_{ea}}{\rho g} = \frac{P_c}{\rho g} + k \frac{Q^2}{A^2 g} \quad (3.2-9)$$

$$\frac{PD_t}{\rho g} = \frac{P_c}{\rho g} + k \frac{DQ_t^2}{A^2 g} \quad (3.2-10)$$

Donde P_e es la presión a la entrada del tanque P_c es la presión de entrega del sistema de compresión y Q es el caudal suministrado por la red ecuación 31.

$$\sum_i^c Q_i c_t = Q \quad (3.2-11)$$

4. MINIMIZACION DEL GASTO ENERGETICO DEL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO

4.1. SELECCIÓN DEL ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN.

Para realizar una correcta selección del algoritmo de búsqueda, el primer paso es definir que tan difícil de resolver es el problema de optimización planteado, para esto se deben tener en cuenta, el orden de las ecuaciones compuestas por la función objetivo y el conjunto de restricciones, así como la complejidad de la topología de la red de suministro.

Del análisis del conjunto de ecuaciones matemáticas compuesto por la función objetivo y las restricciones operativas del sistema es posible identificar que: (i) las ecuaciones de gasto energético de algunos tipos de compresores son de segundo orden, (ii) las ecuaciones que relacionan el caudal y la presión de entrega a la red contiene un radical, (iii) la ecuación que modela el comportamiento del depósito de almacenamiento contiene una ecuación diferencial; exceptuando las descritas anteriormente, (iv) las demás restricciones operativas son lineales con desigualdades.

Partiendo de esto se debe descartar los métodos de solución que se encuentran acotados por la programación lineal, debido a que para aplicar este método es menester que todas y cada una de las ecuaciones que hacen parte de la función objetivo y del conjunto de restricciones sean de orden lineal.

Ahora bien, sabiendo que las técnicas de programación no lineal y búsquedas combinatorias son aplicables dada la estructura matemática del problema, queda como variable de decisión la posibilidad de encontrar las mejores soluciones posibles en tiempos computacionales racionales con requerimientos de cómputos actuales.

Si se analiza la estructura morfológica de la cadena de suministro. Esta se encuentra compuesta por un conjunto de proveedores (compresores), un centro de almacenamiento (deposito de almacenamiento) y múltiples clientes finales se puede clasificar como una cadena de suministro mixta, es decir tiene una estructura la cual es una combinación de una CS convergente y una divergente (Ver Tabla 2.1-1. Clasificación según tipología de las cadenas de suministro. (Beamon B. M., 2001)), por lo cual tiene una complejidad solo superada por las cadenas de suministro las cuales tienen una caracterización tipo red.

A la complejidad de la red de suministro hay que agregarle un factor que es inherente del problema abordado; el hecho de que una de las restricciones sean dinámicas implican un mayor numero de periodos de tiempo en el cual deben evaluarse las restricciones con respecto a una cadena de suministro típica, por ejemplo si se esta evaluado una hora de operación implica que las restricciones sean evaluadas 3600 veces, debido a que en ningún instante de tiempo se puede afectar la operación normal y continua de la red.

Las anteriores razones limitan los algoritmos de búsqueda que pueden ser implementados para el problema de estudio y redirigen la elección hacia algoritmos combinatorios. Estos son capaces de generar soluciones pretenden acercarse lo más posible al óptimo sin garantizarlo sin embargo puede encontrar soluciones factibles lo suficiente mente cerca de este con tiempos cómputo racionales y tecnologías existentes.

Algunas de las metaheurísticas que hacen parte de los algoritmos de búsqueda combinatorios mas destacados utilizados en la modelación de cadena de suministro son búsqueda tabú, algoritmos genéticos, Redes neuronales artificiales y colonias de hormigas. Chan (2004), afirma que los algoritmos genéticos son ampliamente usados en situaciones no lineales, como cuando los costos de entrega varían en función de la cantidad de unidades enviadas, dando razones similares a las anteriormente citadas y referenciando a diferentes autores como Abdinnour (1999), indican que esta es una herramienta robusta para resolver problemas complejos de cadena de suministros.

Los Algoritmos genéticos son ampliamente referenciados en el estado del arte como algoritmos de búsquedas utilizadas tanto en la modelación de cadena de suministro como en la optimización del transporte diferentes gases diferentes, esto junto a las apreciaciones de Chan (2004) y Abdinnour (1999) y a la inexistencia de estudios previos similares para aire comprimido, sobre los cuales apoyarse

justifican la escogencia del algoritmo genético como el método de búsqueda utilizado en la presente investigación.

4.2. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN

El problema de optimización se puede subdividir en dos categorías: en la primera se debe determinar cuanto flujo y en que momento se debe comprimir para satisfacer la demanda, teniendo en cuenta la acumulación existente en el sistema y cumpliendo con las restricciones de presión de la red; y en segundo lugar para el conjunto de flujos factibles se debe determinar cual es la manera mas eficiente de suministrarlo al sistema, es decir se debe decidir cuanto flujo debe comprimir cada compresor de manera que se minimice el gasto energético global del sistema.

Salvo se cambie la estructura física del compresor o el sistema de accionamiento, es claro que las curvas de cada uno de los equipos que conforman el sistema son invariantes en el tiempo. En otras palabras el comprimir 100 cfm a 125 psi utilizando el compresor A generara el mismo gasto energético en el día 0 de operación que en el día 100, razón por la cual resolver este punto con anterioridad y de una manera exhaustiva resulta lógico.

Partiendo de esto y con miras a disminuir la complejidad del problema se programaran dos algoritmos genéticos en serie el primero resolverá la condición descrita anteriormente, la cual solo se ejecutara una vez a menos que se cambie la curva de operación de algún compresor ya existente , se agregue uno nuevo al o se retire alguno del sistema. El segundo algoritmo resolverá la primera categoría descrita anteriormente y debe ser ejecutado cada vez que se tenga un cambio en la operación de la red (Caudal o flujo). Una vez realizada esta aclaración se mostrara el diagrama de flujo de los algoritmos.

4.2.1.1. Diagrama de Flujo para el Algoritmo Implementado

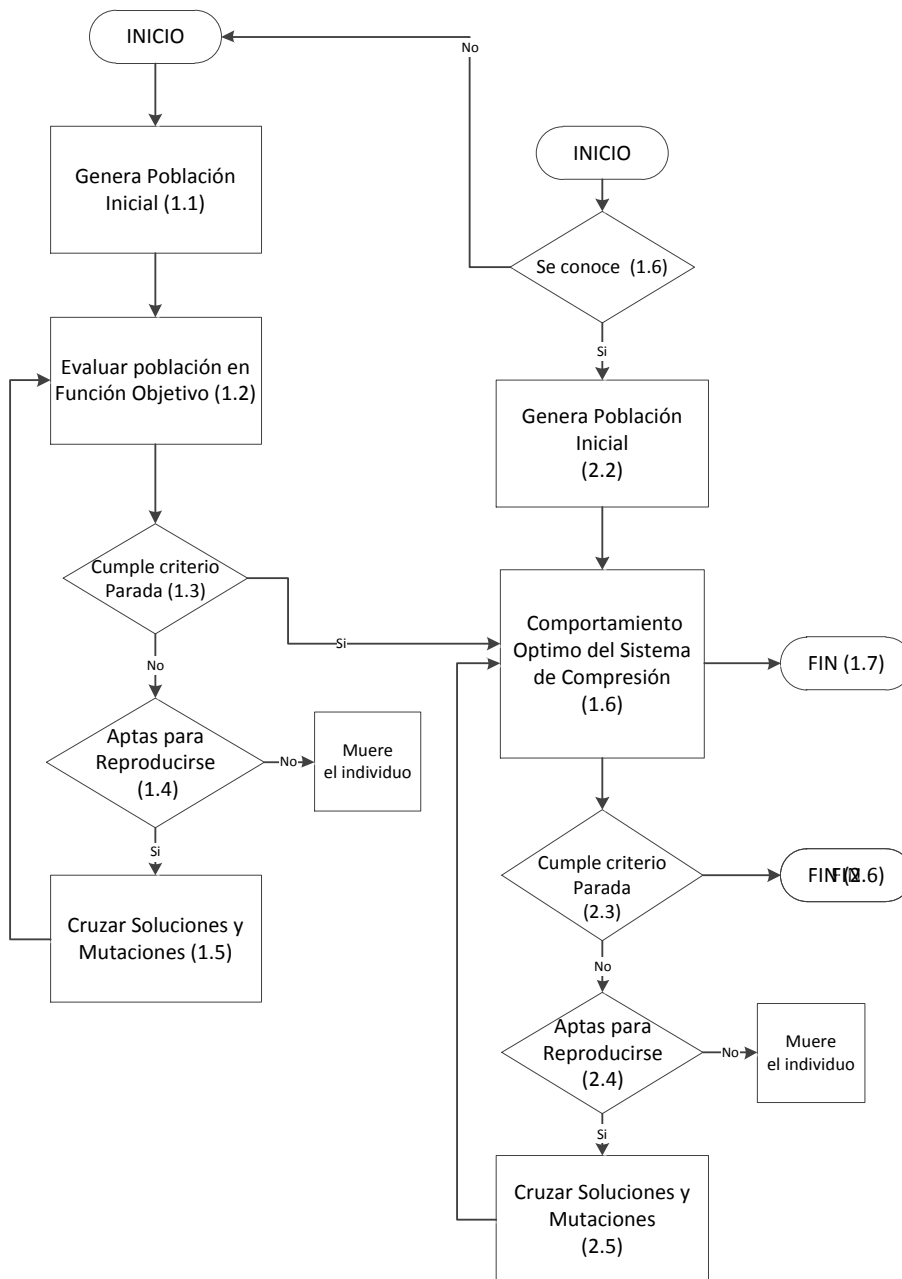


Figura 4.2-1. Diagrama de Flujo Algoritmo Genético, utilizado en la optimización

En la Tabla 4.2-1. Se describe detalladamente cada una de las subrutinas que hacen parte del algoritmo de optimización.

Inciso	Descripción
1) Inicio	La función de Las sub rutinas que empiezan numeradas por 1, están encaminadas a encontrar el mínimo consumo para todas las condiciones de presión y caudal que pueden ser

	suministrados por el sistema de compresión.
1.1) Soluciones Iniciales	<p>Para cada uno de los caudales a suministrar; se generan 30 vectores donde cada uno de estos contiene una forma de suplir el caudal usando un subconjunto de compresores pertenecientes al sistema de compresión. Este subconjunto a su vez es generado aleatoriamente n^2 veces, donde n es el número de compresores pertenecientes al sistema.</p> <p>Es decir para un conjunto formado de 4 compresores la población inicial se encontrara compuesta por 480 individuos los cuales representan igual número de soluciones iniciales.</p>
1.2) Función Objetivo	<p>La función objetivo es una función de gasto energético similar a la ecuación 19, donde el gasto global de la red es la suma de los gastos individuales de cada compresor que hace parte del sistema y es dependiente del caudal a comprimir. En esta se evalúan los diferentes individuos indiferentemente de a que generación pertenezcan tomando valores de 0 si el compresor se encuentra apagado y valores extremadamente altos cuando el individuo no se encuentre dentro del rango de operación del equipo.</p>
1.3) Criterio de parada.	<p>Para que la convergencia del algoritmo se de, es indispensable que al menos se tome una generación posterior a la inicial. El algoritmo dejara de buscar cuando la mejor solución encontrada en la generación actual sea igual a la mejor solución encontrada en la generación anterior con 0.1% de diferencia. Y se evaluarán mínimo 3 generaciones posteriores a la inicial.</p>
1.4) Selección mejores soluciones	<p>Se desechan las soluciones que no se encuentran dentro de las curvas de operación; de las restantes se escogen las mas aptas por el método de la ruleta. (Sección 2.6.2). Escogiéndose las soluciones con probabilidad inferior al 1%.</p>

<p>1.5) Nuevas soluciones.</p>	<p>Se generan las nuevas generaciones según los métodos mostrados en la Sección 2.6.2; y se vuelven a ejecutar los pasos 1.2,1.3 y 1.4.</p>
<p>1.6) Comportamiento optimo del sistema de compresión</p>	<p>Una vez encontrado el mínimo gasto para cualquier condición de operación y una vez determinado cuales compresores deben estar encendido y en que condiciones debe estar operando, se procede a generar una base de datos, de forma que una vez se repita una condición de operación ya evaluada no se deba correr el algoritmo completo.</p>
<p>2) Inicio.</p>	<p>La función de Las sub rutinas que empiezan numeradas por 2, tiene como objeto determinar cuanto flujo a que presión y en que momento se debe comprimir para satisfacer la demanda, teniendo en cuenta la acumulación existente en el sistema y cumpliendo con las restricciones de presión de la red; modelo que se explica en la sección 2.5.2.</p>
<p>2.2) Soluciones Iniciales</p>	<p>Para cumplir con la demanda requerida por los equipos industriales, es necesario conocer cuanto aire comprimido esta almacenado para determinar cuanto flujo debe ingresar al tanque de almacenamiento. Este modelo es continuo por lo tanto resulta imposible estimar cuanto flujo debe ingresar en el tiempo t sin haber modelado el tiempo $t-1$; dada la complejidad de esta restricción, si a la construcción de la solución inicial no se le da un punto inicial de búsqueda no será posible encontrar soluciones factibles en un tiempo de computo razonable partiendo de una búsqueda aleatoria.</p> <p>Para contrarrestar este impase se generan dos modelos exactamente iguales del tanque de almacenamiento el primero es el que hace parte del conjunto de restricciones del problema abordado el segundo será utilizado para generar el punto inicial de búsqueda al adicionándole un controlador e introducirle la demanda de flujo variable y la presión de descarga en el valor deseado, una vez obtenido este vector de referencia se crean 50 soluciones aleatorias alrededor de cada uno de estos puntos y se pasa a los</p>

	<p>puntos 2.3, 2.4 y 2.5 .</p> <p>Si se esta modelando una hora de operación continua con cambios en el flujo intercalados cada minuto, cada solución se compondrá por un vector con 60 datos, por lo cual se evaluarán 300 puntos de operación diferentes.</p>
2.3) Criterio de Parada	El criterio de parada es similar al explicado en el inciso 1.3
2.4) mejores soluciones Selección	El criterio de selección es similar al explicado en el inciso 1.4. sin embargo cambian las restricciones a las cuales son sometidas las soluciones para determinar si son factibles , en este caso la presión de suministro a los equipos debe permanecer con un cambio inferior al 1% del valor deseado , así como las demás restricciones son explicadas en la sección 2.5.2.
2.5) Nuevas soluciones	Se crean las nuevas generaciones según los métodos mostrados en la Sección 2.6.2; y se vuelven a ejecutar los pasos 1.6 , 2.3 y 2.4

Tabla 4.2-1. Descripción Diagrama de flujo del algoritmo de optimización

5. CASO ESTUDIO

5.1. DEFINICIÓN DEL CASO ESTUDIO.

La red de Suministro se encuentra conformada por 4 compresores, 2 de los cuales operan con variadores de frecuencia, un postenfriador, un recipiente de almacenamiento a presión con un volumen de 20 m³ y múltiples equipos industriales con demandas de caudal variables a una presión de suministro constante. Esquema mostrado en la Figura 1.2-1.

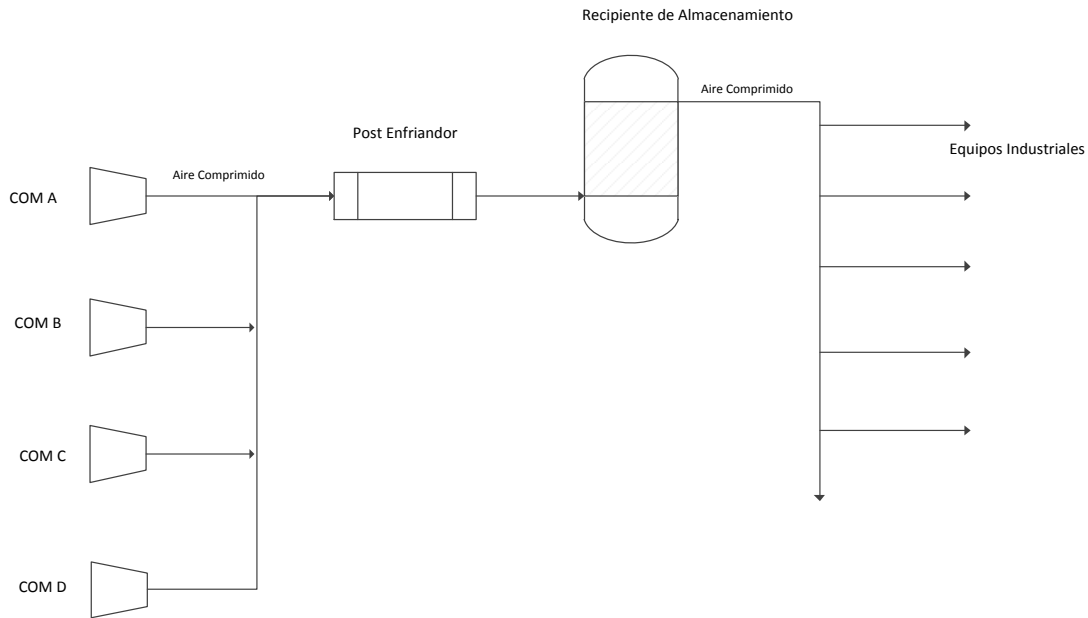


Figura 5.1-1 Esquema del sistema de compresión empleado en el caso estudio

En la Tabla 5.1-1 se consigna la información de los equipos de compresión utilizados en el caso estudio, y la cual contiene: marca modelo, Tipo y curva de gasto encontrada a partir de las curvas de operación (Anexo A)

Código	Compresor utilizado	Tipo	Función de gasto energético
Com A	Ingersoll Rand IRN50H	Rotatorio Tornillo con Variador frecuencia	de $9 * 10^{-5}Q^2 - 0,0257Q + 22,982$ a 125 psig
Com B	Kaeser SFC 37	Rotatorio Tornillo con Variador frecuencia	de $0.00023577Q^2 + 0.12299Q + 6.59$ a 125 psig
Com C	Atlas Copco GA22-125 AP	Rotatorio velocidad fija	de $2.46_iQ + 24.9$
Com D	Atlas Copco GA18-125 AP	Rotatorio velocidad fija	de $2.9_iQ + 24.9$

Tabla 5.1-1 Información de referencia de los compresores. Fuente CAGI

Para generar la línea base de gasto, la cual representa la forma tradicional de operar el sistema de compresión se tomará la decisión simulando el sistema de control maestro en la cual se regula la demanda entregada a la red, metiendo o sacando de operación los compresores.

5.2. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En la Figura 5.2-1, se describe el comportamiento del gasto energético en el rango de operación posible para la red de compresores, el mínimo caudal suministrado (80 ACFM) y el máximo (600 ACFM) correspondiente a la operación a plena carga de los diferentes compresores operando en paralelo.

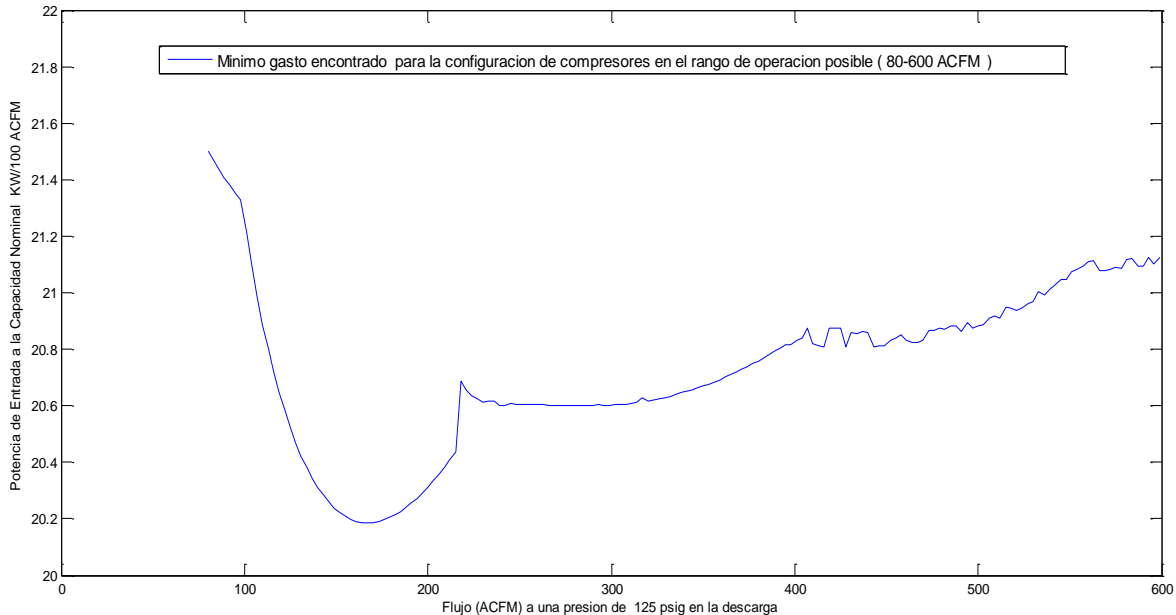


Figura 5.2-1 Mínimo gasto energético encontrado en el rango de operación del sistema de compresión

Esta curva se puede subdividir en cinco zonas la primera entre 80 y 170 ACFM, presenta una disminución del gasto por ACFM comprimido a una tasa de cambio relativamente constante, seguido por un incremento entre (180 y 210 ACFM), la tercera región entre (210 y 310 ACFM) tiene un comportamiento estable con valores cercanos a los 20.6 kw/100 cfm comprimido; la cuarta y quinta zona presentan un incremento en el gasto sin embargo la última presenta una mayor fluctuación entre caudales consecutivos. Comportamientos que solo son posibles analizar a mayor profundidad si se relacionan con la Figura 5.2-2. Esta muestra las condiciones de operación del sistema que generan dicho gasto.

En la abscisa de la Figura 5.2-2 se tiene el caudal total comprimido y en la ordenada la fracción de este que es entregada por cada uno de los compresores pertenecientes a la red, de esta forma si se quiere comprimir 200 ACFM a 125 psi, la decisión que implica un menor gasto energético es hacerlo en su totalidad con el compresor B.

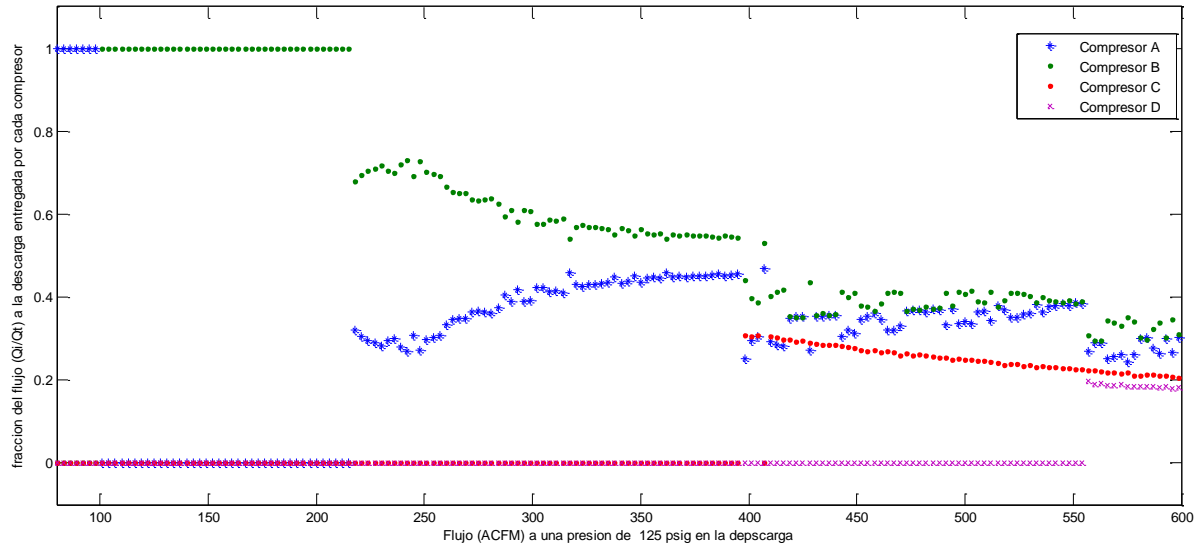


Figura 5.2-2. Fracción de flujo entregado por cada compresor para el mínimo gasto encontrado en función del caudal total entregado a la red.

A hora bien, si analizamos el comportamiento de la Figura 5.2-1 es posible darse cuenta que en la primera y segunda zona descrita en el párrafo anterior la totalidad del caudal es entregada por un solo compresor (A o B), en la zona A, el gasto tiene un cambio en la pendiente en el punto en que pasa de operar el compresor A al B y la tendencia es a reducir el gasto (kw/100cfm) a medida que aumenta el caudal, lo cual tiene explicación si se analizan las curvas de operación individuales de dichos equipos donde para los mínimos y máximos flujos que pueden suministrar tienen un mayor gasto relativo.

En la zona 3 (210 y 310 ACFM), operan en paralelo los compresores A y B. Al variar la fracción de flujo que es entregada por cada uno de estos se logra mantener un gasto constante en esta zona, sin embargo al ingresar en la zona 4, se registra un incremento en la pendiente de la curva hasta llegar a los 400 ACFM. Al Pasar a la zona 5, continua la tendencia al alza no obstante entre valores consecutivos de flujo puede disminuir el gasto por ACFM comprimido, esto ocurre debido a que en esta zona es necesario que entren a operar los compresores C y D que estaban apagados, y los cuales a diferencia de A y B que operan continuamente, estos entran y salen de operación, para evitar esta condición a la función objetivo se le debe sumar el costo de tener el compresor operando en vacío. (Condición que no aplica en esta primera fase debido a que la intención es determinar el mínimo consumo para una caudal específico en el rango de operación independientemente del caudal existente en el instante anterior).

Una vez encontrado el mínimo gasto por ACFM comprimido, se generara la curva de gasto para una demanda consolidada de los equipos que se alimentan de la red Figura 5.2-3.

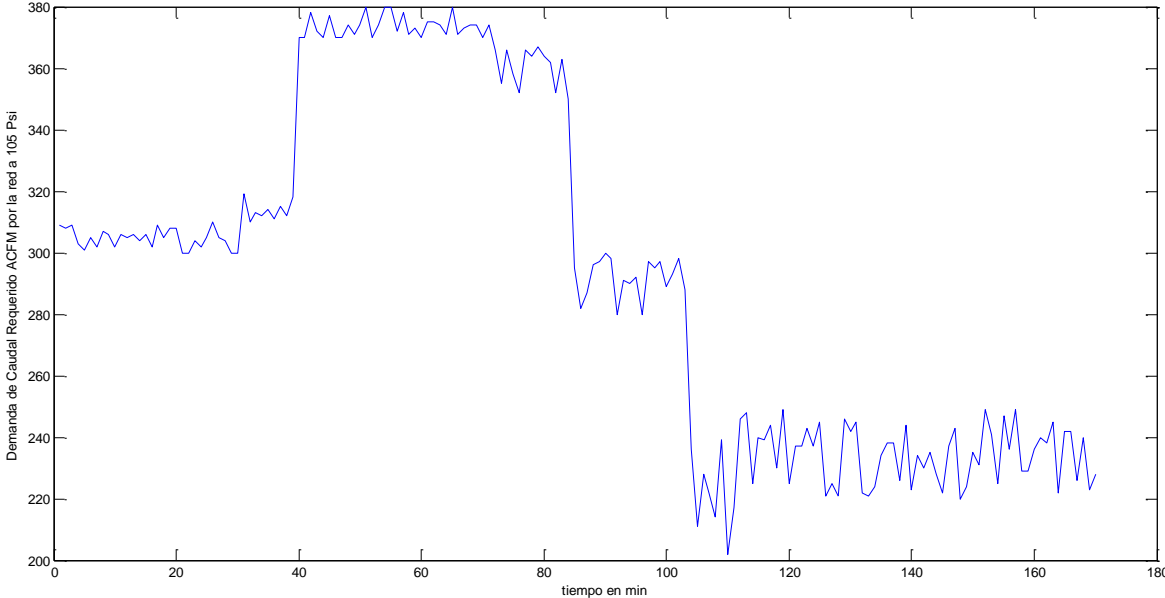


Figura 5.2-3. Demanda de flujo requerido por la red industrial

Partiendo de la demanda de la red se debe encontrar el caudal a comprimir por el sistema de compresión que permite mantener la presión dentro de los rangos de operación determinados, teniendo en cuenta la acumulación en el tanque de almacenamiento, datos que son mostrados en la Figura 5.2-4

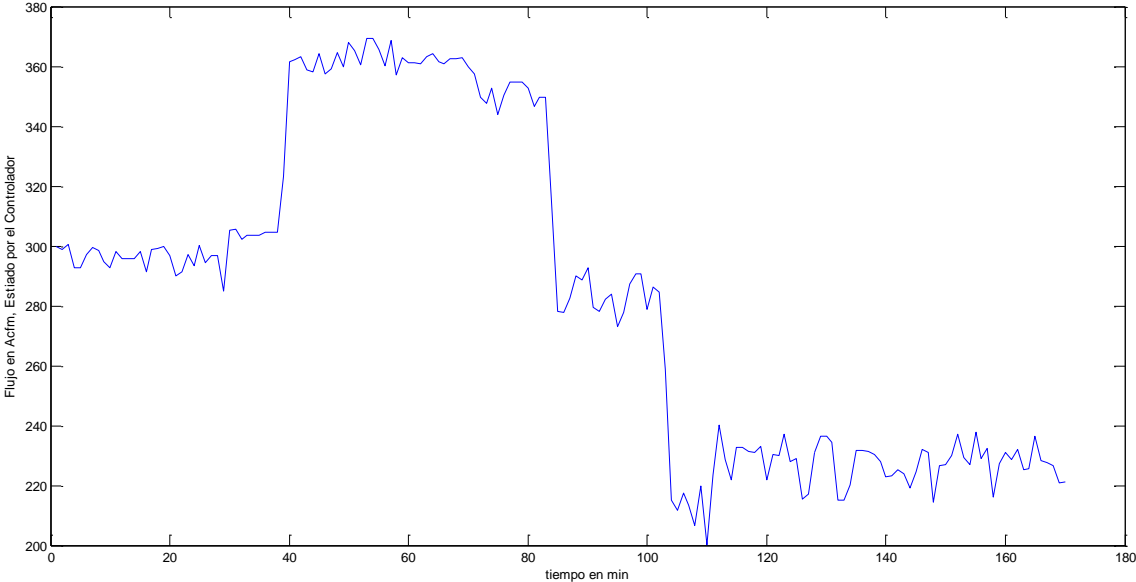


Figura 5.2-4 Flujo de Suministrado por el sistema de compresión para garantizar la demanda

Para el caudal comprimido suministrado Figura 5.2-4 y modelando de forma integral el sistema se obtiene para una salida del sistema igual a la demanda mostrada en el caso de estudio (Figura 5.2-3), el perfil de presiones mostrado en la Figura 5.2-5. Este perfil de presiones varían en el rango de 105 psi mas o menos 0.1 psi, lo cual se ajusta al rango de presiones permisibles a la salida del tanque de almacenamiento. (105 ± 2 psi)

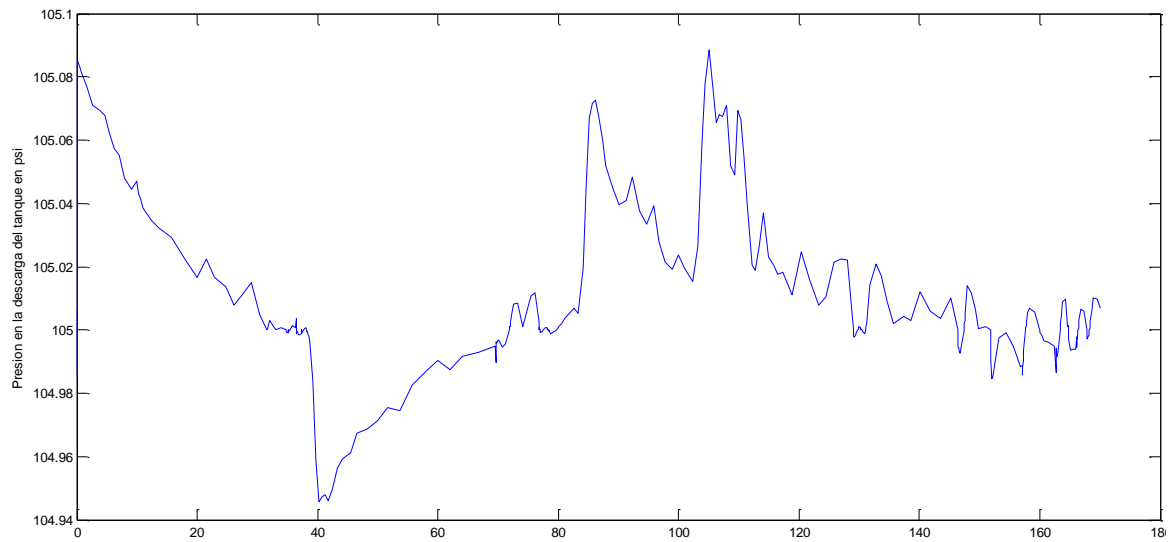


Figura 5.2-5. Presión de entrega a la red en función del caudal demandado y el comprimido

Para el caudal y la presión de suministro encontrado se identificó cuanto es el gasto energético asociado al sistema de compresión si se toman las decisiones con el modelo propuesto (color verde) o con el sistema tradicional (azul) resultados que se grafican en la Figura 5.2-6 Gasto energético con el sistema de decisión actual vs el propuesto., y en la cual es posible observar que en los primeros 40 minutos de operación la diferencia promedio en el gasto es de 0.1 kw por cada 100 ACFM, si trabajamos con el caudal promedio comprimido en ese rango de tiempo se tendría una reducción neta de 0.21 kw/h. ahorro que aumenta significativamente entre los minutos 100 y 180 en el cual se presenta una disminución promedio de 1 kw/100 ACFM comprimido al pasar de 21.8 a 20.8 kw/100 ACFM, lo cual implica una reducción neta de 3.06 kwh, equivalente a 5%.

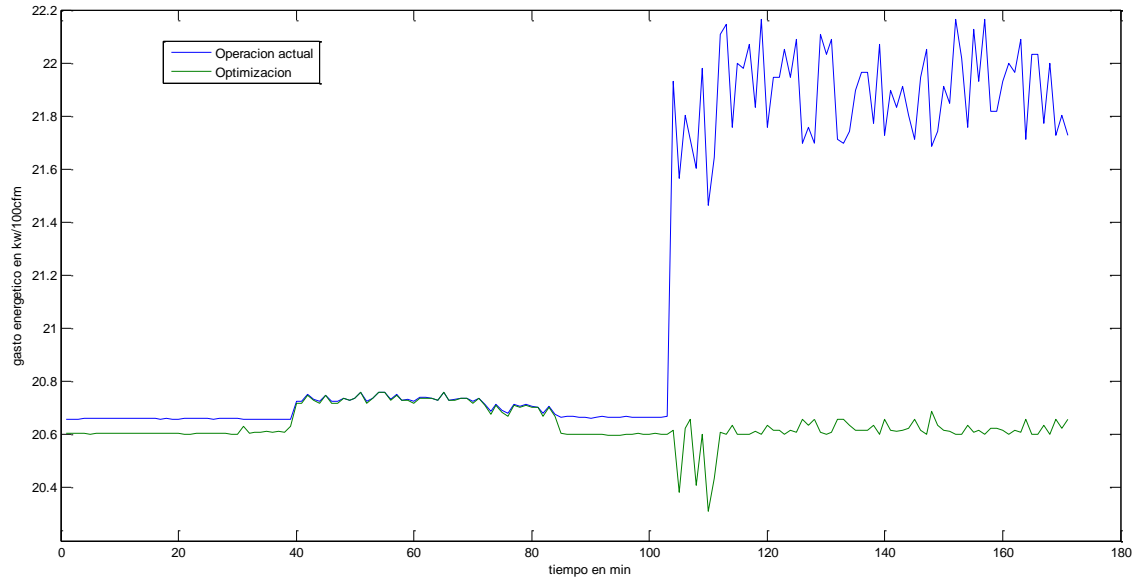


Figura 5.2-6 Gasto energético con el sistema de decisión actual vs el propuesto.

Las figuras Figura 5.2-7 Fracción de flujo entregado por cada compresor con el sistema de decisión actual. Figura 5.2-8 describen las condiciones de operación para las cuales se generaron los consumos mostrados en la primera (Figura 5.2-7 Fracción de flujo entregado por cada compresor con el sistema de decisión actual.) se muestran las decisiones tomadas por el sistema de decisión cuando el control se hace por caudal. Y la (5.2-8) muestra el tomado por el sistema aquí descrito.

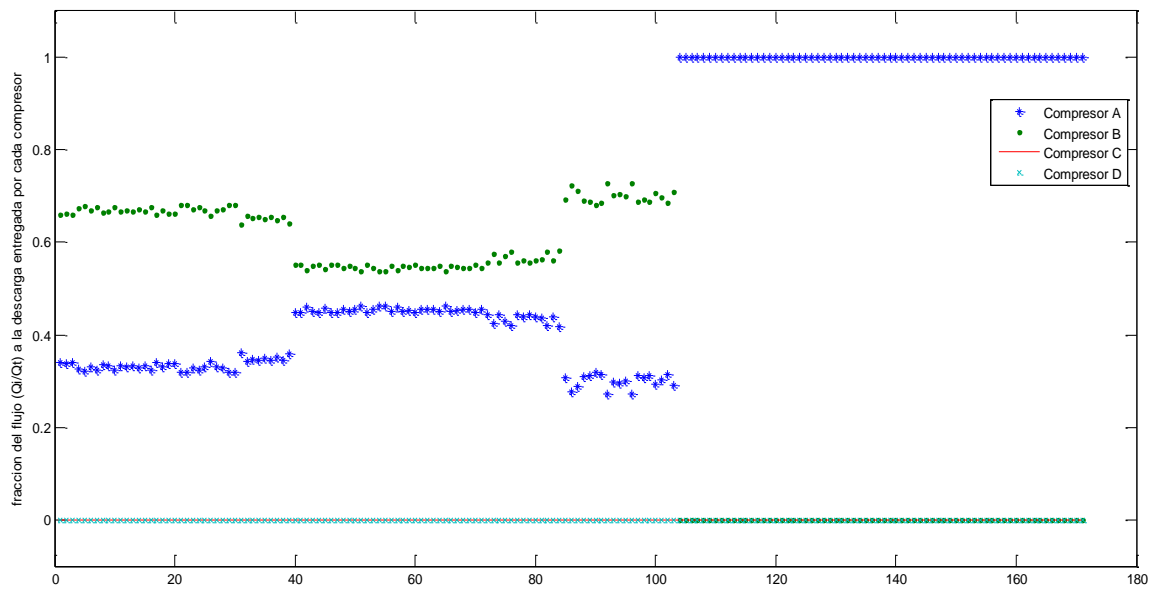


Figura 5.2-7 Fracción de flujo entregado por cada compresor con el sistema de decisión actual.

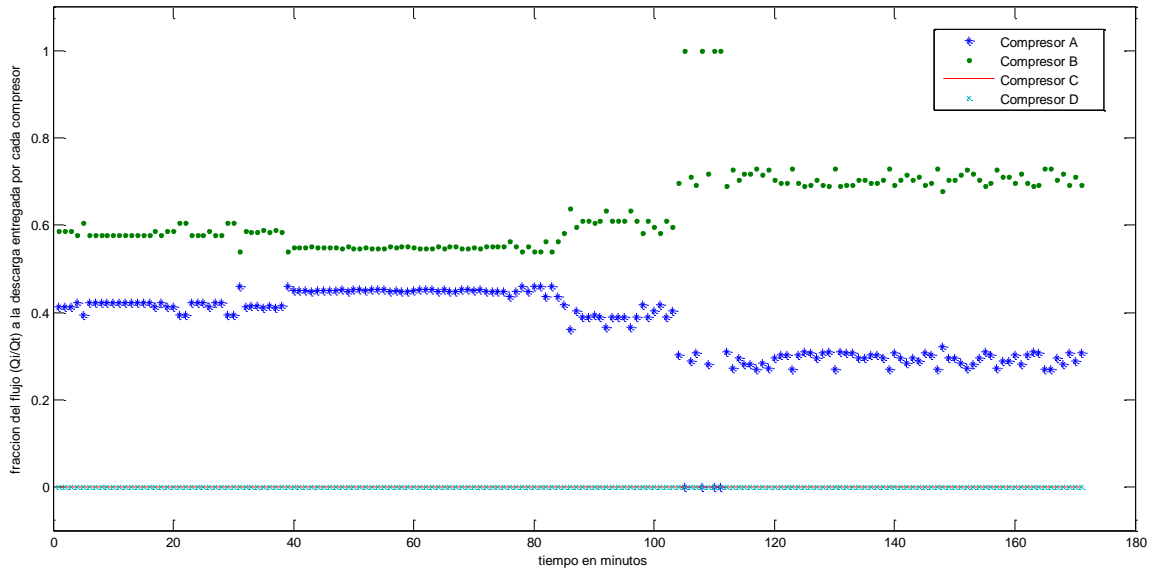


Figura 5.2-8 Fracción de flujo entregado por cada compresor con el sistema de decisión propuesto.

6. CONCLUSIONES.

Este documento aborda el problema de como disminuir los gastos en electricidad producto de la compresión de aire dada la necesidad de cumplir la demanda de flujo y presión de los usuarios finales; y tiene como objeto el desarrollo de un modelo que facilite la toma de decisiones para la gestión global de una red de aire comprimido.

La toma de decisiones se puede subdividir en dos categorías: en la primera se debe determinar cuanto flujo y en que momento se debe comprimir; y en la segunda se debe decidir cuanto flujo debe comprimir cada compresor de manera que se minimice el gasto energético global del sistema. Aplicando dicha metodología se encontró una disminución del 5% en el gasto con respecto a la línea base del caso estudio, siendo este producto de una de las herramientas para la toma de decisiones más eficientes actualmente, sin embargo queda pendiente para futuras investigaciones la validación de la metodología con datos reales de operación.

Con base en la metodología utilizada para optimizar cadenas de suministro industriales y estableciendo las analogías con el modelamiento de redes de suministro se generó un modelo termoeconómico el cual relaciona las variables operacionales de la red con el gasto energético producto de la compresión, brindando las condiciones necesarias para la implementación del algoritmo de búsqueda sobre el cual se soporta la toma de decisiones. Y que es capaz de

determinar cuanto flujo y en que momento se debe comprimir para satisfacer la demanda, teniendo en cuenta la acumulación existente en el sistema y cumpliendo con las restricciones de presión de la red; y la manera mas eficiente de suministrarlo al sistema, es decir se debe decidir cuanto flujo debe comprimir cada compresor y en que momento de manera que se minimice el gasto energético global del sistema.

RECOMENDACIONES

Del aprendizaje y del análisis de los resultados obtenidos durante esta investigación se derivan los siguientes temas de interés a tratar:

(i) Medicion o estimación del caudal de flujo

La recopilación o medición de información necesaria para la validación del modelo surge como uno de los temas de mayor interés donde es necesario conocer: (a) datos de gasto reales de los compresores (ii) mediciones de presión y (b) datos de caudal de aire, siendo esta ultima la variable de interés mas critica debido a que por el alto costo de los equipos de medición de flujo son pocas las industrias que tienen ese grado de instrumentación.

Teniendo en cuenta la alta diferencia en los costos entre un sensor de presión y un sensor de flujo seria interesante lograr una correlación entre estas variables, de tal forma que con mediciones de presión en diferentes puntos de la red se pueda conocer el caudal entregado. Partiendo de esto se sugiere el recipiente de acumulación como punto clave para la medición debido a que aporta una variable extra fácilmente medible como es la tasa de condensado.

(ii) Calculo optimo del volumen del tanque de almacenamiento

Al analizar la curva de gastos por cfm comprimido, es posible observar que en ciertos rangos de operación el valor del gasto se mantiene constante, por lo cual comprimir un poco mas de flujo para suplir o compensar un incremento de la demanda futura se vuelve interesante desde el punto de vista energético, sin embargo el calculo del volumen tanque de almacenamiento no considera grandes acumulaciones lo cual es una limitación a este tipo de estrategia de operación.

Para el cálculo óptimo del volumen del tanque de almacenamiento, una de las variables de interés que es interesante considerar es la de comprimir en horas a las cuales el costo del kw-h sea inferior. De lo anterior surge la siguiente inquietud. ¿Es posible ampliar la metodología para el cálculo de capacidad de bodega al diseño de un tanque de almacenamiento partiendo de una demanda conocida?

(iii) Acoplar el modelo de decisión a una estrategia de control

La herramienta para el soporte de la decisión de como operar la red de aire comprimido como ha sido concebida hasta el momento, es off line, por lo cual el siguiente paso necesario es influir en la operación del sistema de control con las decisiones tomadas por la herramienta, permitiendo una conexión con el sistema vía SCADA.

REFERENCIAS

- Abdinnour, H. S. (1999). Network design in supply chain management *Int. J Agile Manage Syst*, 99-106.
- Apra, C. M. (2004). Fuzzy control of the compressor speed in a refrigeration plant. *Int. J. Refriger.*, 639–648.
- Apra, C. M. (2009, july). Determination of the compressor optimal working conditions. *Applied Thermal Engineering*, 1991-1997.
- Beamon, B. M. (1998). Supply chain design and analysis: Models and. . *International Journal of Production Economics* , 281-294.
- Beamon, B. M. (2001). Performance analysis of conjoined supply chains. *International Journal of*, 3195-3218.
- Chan, F. C. (2004). Multi-criteria genetic optimization for distribution network problems. *Int J Adv Manuf Technol*, 517-532.
- Chebouba A , Yalaouib F, Amodeob, L, Smati, A. Tairi. New Method to Minimize Fuel Consumption of Gas Pipeline Using Ant Colony Optimization Algorithms. IEEE. 2006
- Chebouba, A., Smati, A."Optimisation d'un pipeline de transport de gaz naturel par lap rogrammation dynamique avec choix automatique des compresseurs". Conception et production integrees Meknes, (39), 1-14, octobre 2003.
- Cunha, M. S. (199). Water distribution network design optimization: Simulated annealing approach. *Journal of Water Resources Planning and Management*, , 214–221.
- Duprez, M. ,. (20007). Modelling of reciprocating and scroll compressors. *International Journal of Refrigeration* , 873-886.
- Han, I. ,. (2004). OPTIMIZATION OF THE AIR- AND GAS-SUPPLY NETWORK OF A CHEMICAL PLANT. *Chemical Engineering Research and Design*, 1337–1343.
- Jen-Ya Wanga, T.-P. C.-S. (20009). An enhanced genetic algorithm for bi-objective pump scheduling in watersupply . *Expert Systems with Applications*, 10249–10258.
- Kaya, D. P. (2002). Energy conservation in compressed-air systems. *Int. J. Energy Res*, 837–849.
- Kong, D. L. (2011). Research on forecasting method of air consumption in the industrial site. *IEE*, 419-424.
- Koury, L. N. (2000). Numerical simulation of a variable speed refrigeration system. *International Journal of Refrigeration.*, 24, 192–200.
- Lim, S. J. (2006). A simulation approach for production-distribution planning with consideration given to replenishment policies. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 27, 593-603.

- Maier, H. ,. (2003). Tan Ant colony optimization for design of water distribution systems . *Journal of Water Resources Planning and Management*, 200–209.
- Melo, M. T.-d.-G. (2012). A tabu search heuristic for redesigning a multi-echelon supply chain network over a planning horizon . *Int. J. Production Economics* , 218-230.
- Mula, J. P.-M. (2010). Modelos para la planificación centralizada de la producción y el transporte en la cadena de suministro: una revisión. *Innovar. Revista de Ciencias Administrativas y Sociales*, 20 (37), 179-194.
- S. Shao, W. S. (2004). Performance representation of variable-speed compressor for inverter air conditioners based on experimental data. *International Journal of Refrigeration*, 27, 805–815.
- Saidur, R. R. (2010, May). A review on compressed-air energy use and energy savings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 1135–1153.
- Sait S. M, Y. H. (1999). Iterative computer algorithms with applications in engineering: Solving combinatorial optimization problems. *IEEE Computer Society Press*, 1-248.
- Sakawa, M. N. (2001). Fuzzy programming and profit and cost allocation for a production and transportation problem. *European Journal of Operational Research*, 131.
- Savic, D. W. (1995). Genetic operators and constraint handling for pipe network optimization. *in: Evolutionary Computing*, 154–165.
- Schiffmann, J. F. (2010). Design, experimental investigation and multi-objective optimization of a small-scale radial compressor for heat pump applications. *Energy* , 436–450.
- Shenghui, W., Xing, J., & We., T. (2010). A Research on the Methods of Forecasting and Controlling for Air Compressor. *International Conference on Electrical and Control Engineering (ICECE)*, 240-243.
- Silva, C. S. (2009). Distributed supply chain management using ant colony optimization. *a European Journal of Operational Research* , 349-358.
- Sipper, D , Bulfin, R , Bulfin Jr. Planeación y control de la producción,1998,McGraw-Hill
- Tong, L. H. (2011). Design of water distribution network via ant colony optimization. *Intelligent Control and Information Processing (ICICIP)*, 366-370.
- Tseng, C. C. (2006, July). Family design of scroll compressors with optimization. *Applied Thermal Engineering, Volume 26* , 1074–1086.
- Vélez, M. C. (2007). METAHEURÍSTICOS: UNA ALTERNATIVA PARA LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS. *EIA*, 99-115.
- Wright S., Somani M., Ditzel C. Compressor Station Optimization.Pipeline Simulation Interest Group. (1998)
- Wu, Z. S. (2001). Competent genetic-evolutionary optimization of water distribution systems . *Journal of Computing in Civil Engineering*, 89-101.

Wu, S, Rios-Mercado, R. Z. Byod, E. A, Scott, L. R. Model Relaxation for the Fuel Cost Minimization of steady state Gas Pipeline Networks, *Mathematical and Computer Modeling*, Vol, 31, No. 2-3, PP.197-220, 2000

Yangguang, L. C.-6. (2010, May). Design optimization of scroll compressor applied for frictional losses evaluation. *International Journal of Refrigeration*, 33, 615-624.

HYPERLINK "<http://www.cagi.org/performance-verification/data-sheets.aspx>"
<http://www.cagi.org/performance-verification/data-sheets.aspx>

ANEXO A

En este anexo se encuentran consignadas las curvas de operación de los compresores utilizados en el caso estudio



COMPRESSOR DATA SHEET

Rotary Screw Variable Frequency Drive Compressor

MODEL DATA - FOR COMPRESSED AIR			
1	Manufacturer: Ingersoll Rand		Date: Aug 11th 2009
2	Model Number: IRN50H <input checked="" type="checkbox"/> Air-cooled <input type="checkbox"/> Water-cooled <input checked="" type="checkbox"/> Oil-injected <input type="checkbox"/> Oil-free	# of Stages: 1	
		VALUE	UNIT
3	Full Load Operating Pressure ^b	125	psig ^b
4	Maximum Full Flow Operating Pressure ^c	125	psig ^c
5	Drive Motor Nameplate Rating	50	hp
6	Drive Motor Nameplate Nominal Efficiency	95.0	percent
7	Fan Motor Nameplate Rating (if applicable)	5	hp
8	Fan Motor Nameplate Nominal Efficiency	88.6	percent
	Input Power (kW)	Capacity (acfm) ^{**}	Specific Power (kW/100 acfm) [*]
9	46.9	216.0	21.71
	40.8	190.1	21.45
	35.3	166.3	21.24
	29.5	139.0	21.25
	24.4	114.9	21.21
	18.8	88.0	21.40
	14.0	64.3	21.74
10	Total Package Input Power at Zero Flow ^d	0.0	kW ^d
11	<div style="text-align: center;"> <p style="font-size: small;">Note: Graph is only a visual representation of the data in section 9</p> </div>		

Figura 0