



CEMEX COSTA RICA

**‘Diseño de la red principal de aire comprimido de la planta CEMEX, Colorado,
Costa Rica’**

Informe de práctica profesional para optar por el título de Ingeniería en
Mantenimiento Industrial, grado Licenciatura

ESTUDIANTE:

JOSÉ MIGUEL BONILLA GUTIÉRREZ

Guanacaste, noviembre de 2014



engineerscanada

Escuela Acreditada por el
Canadian Engineering Accreditation Board (CEAB)

Información del estudiante

Nombre: José Miguel Bonilla Gutiérrez

Cédula: 503750502

Carné ITCR: 200851143

Dirección de su residencia en época lectiva: Ciudadela Cemex, Colorado, Guanacaste.

Dirección de su residencia en época no lectiva: Santa Cruz, Guanacaste

Teléfono: 87312065

Email: josemiguelbo@gmail.com

Información del Proyecto:

Nombre del Proyecto: **'Diseño de la red principal de aire comprimido de la planta CEMEX, Colorado, Costa Rica'**

Profesor Asesor: Óscar Eduardo Monge Ruiz

Horario de trabajo del estudiante: Lunes a jueves: 8:00 a.m.–5:00 p.m., viernes: 7:00 a.m.–4:00 p.m.

Información de la Empresa:

Nombre: Cemex Costa Rica

Zona: Colorado de Abangares, Guanacaste

Dirección: Guanacaste, Costa Rica, Colorado de Abangares, de la Shell de Limonal 27km, carretera hacia el Puente de La Amistad.

Teléfono: 22-01-22-44

Actividad principal: Producción de materiales para la construcción (cementos, agregados y concretos).

Dedicatoria

A Dios todo poderoso, por su guía a través de mi vida; a mi madre, por su esfuerzo y apoyo durante las diferentes etapas de mi formación; a mi abuela Ermida, por su estímulo y muestras de cariño; a mis hermanos, por estar allí; a mi padre, por apoyarme cuando lo pudo hacer.

Agradecimiento

Agradezco profundamente al ingeniero Jesús Rubaldo Batista Castillo, por abrirme las puertas de esta gran compañía; a mi profesor tutor, Óscar Eduardo Monge Ruiz, por preocuparse durante el desarrollo del proyecto; a mi asesor industrial, el ingeniero Guido Alberto Alpizar Castro, y a todas y cada una de las personas que me apoyaron durante el desarrollo de esta práctica y durante todo el proceso de formación recibido en el Tecnológico de Costa Rica.

Índice

Introducción	9
Objetivo general	9
Objetivos específicos.....	9
Metodología	10
Definición del problema	11
Capítulo 1: Reseña de la empresa.....	12
Capítulo 2: Marco teórico	17
Humedad	25
Calidad del aire	31
Diseño de sistemas de aire comprimido.....	35
Capítulo 3: Inventario de equipo conectado a la red y requerimientos de funcionamiento	45
Capítulo 4: Evaluación de la condición de la tubería principal.....	57
Resultados de detección de fugas.....	58
Capítulo 5: Diseño de la nueva tubería principal	61
Caudal de diseño para la red de aire comprimido:	64
Selección de diámetros	66
Propuesta # 1	66
Propuesta # 2	69
Comparación de propuestas:	70
Diseños adicionales	71
Selección de accesorios.....	73
Derivaciones.....	73
Soportes	74
Codos	74
Juntas de expansión	74
Uniones.....	74
Bridas	74
Válvulas	74

Bajantes	75
Resumen	75
Capítulo 6: Oportunidades de conservación de la energía (OCE)	76
1. Modificación de sistema de enfriamiento de virola del horno y chumaceras.....	76
2. Potenciar la detección de fugas	79
Capítulo 7: Estudio económico	80
Costo del aire comprimido para Cemex	80
Costo de energía	80
Costo de mantenimiento	91
Costo de inversión	93
Costo total de aire producido	96
Costo de la tubería principal actual	99
Estudio económico de las oportunidades de conservación de energía	105
Modificación del sistema de enfriamiento de la virola y de sistemas de enfriamiento. ..	105
Estudio financiero de potenciar sistema de detección de fugas	106
Estudio económico del nuevo diseño.	107
Conclusiones	109
Recomendaciones	110
Bibliografía	111
Anexos	113
Apéndices	120

Índice de figuras

Figura 1. Estructura organizacional del Departamento de Mantenimiento.	13
Figura 2. Composición del aire.	17
Figura 3. Ilustración de escalas de presión.	18
Figura 4. Escalas de temperatura.	19
Figura 5. Clasificación de compresores.	21
Figura 6. Compresor de pistón en V.	22
Figura 7. Diagrama de funcionamiento de compresor de tornillo.	22
Figura 8. Compresor tipo roots.	23
Figura 9. Compresor de paletas.	24
Figura 10. Compresor centrífugo.	24
Figura 11. Compresor axial.	25
Figura 12. Relación de punto de rocío y presión.	26
Figura 13. Tipos de métodos de secado	27
Figura 14. Postenfriadores	27
Figura 15. Circuito de secador de refrigeración	28
Figura 16. Secador por absorción	29
Figura 17. Secador por adsorción.	30
Figura 18. Secador por membrana	30
Figura 19. Elementos a extraer de un sistema de aire comprimido	31
Figura 20. Filtro ciclónico	32
Figura 21. Prefiltro Boge Seri V.	33
Figura 22. Forma de filtrado de microfiltro	33
Figura 23. Filtro de carbón activo	34
Figura 24. Factores que aumentan caída de presión	35
Figura 25. Ciclo para cálculo de caudal de diseño	36
Figura 26. Longitud equivalente de accesorios.	39
Figura 27. Nomograma de cálculo de tuberías	40
Figura 28. Selección de tuberías de aluminio	41
Figura 29. Caudal de fuga según la presión y diámetro del orificio	44
Figura 30. Estimación de gasto de energía según orificio de fuga.	44
Figura 31. Detección de fugas en unión soldada con ultrasonido	58
Figura 32. Aplicación de agua jabonosa a unión soldada	59
Figura 33. Propuesta de diseño # 1.	63
Figura 34. Propuesta de diseño # 2.	63
Figura 35. Caudal de diseño de equipos conectados.	64
Figura 36. Selección de diámetro de tramo A-B por nomograma.	67
Figura 37. Calculo de diámetro con software de fabricante para tramo A-B	68
Figura 38. Selección de diámetros con propuesta #2.	70

Figura 39. Diseño de tubería para tramo T2-T3	72
Figura 40. Operación de mangueras de enfriamiento.	77
Figura 41. Sistema moderno de cuchillas de aire.	78
Figura 42. Fugas detectadas en la torre con detector ultrasónico	79
Figura 43. Muestreo de corrientes realizado 6/10/2014.	81
Figura 44. Gráfico de operación diaria.	83
Figura 45. Gráfico de distribución de costos de energía.	90
Figura 46. Gráfico de costos de mantenimiento.	93
Figura 47. Distribución de costos de aire comprimido en Cemex Colorado.	96
Figura 48. Cálculo de puntos para control de válvula espiral.	97
Figura 49. Costo de aumento de presión.	99
Figura 50. Consumo de energía en función de la presión de trabajo.	100
Figura 51. Gráfico de presión de operación día 9/10/14.	102
Figura 52. Tramo de la tubería con síntomas claros de corrosión.	104
Figura 53. Tramos de tubería con aparente buen estado.	104
Figura 54. Medición de consumo de aire de mangueras de enfriamiento y estaciones de servicio.	105
Figura 55. Cálculo de punto de rocío de un compresor.	113
Figura 56. Bomba de torre envirocare.	114
Figura 57. Curva de operación de bombas Farval.	114
Figura 58. Tipo de bomba de lubricación existente.	115
Figura 59. Foto de ficha técnica de filtros de mangas.	116
Figura 60. Isométrico de manga de filtro colector de polvos.	117
Figura 61. Curva de operación de compresores Sullair.	118
Figura 62. Diagrama de flujo de fabricación de cemento.	119
Figura 63. Medición de presión en filtro de 96 mangas.	121
Figura 64. Cálculo de Tramo B-C.	123
Figura 65. Cálculo de Tramo C-D.	124
Figura 66. Cálculo de tramo D-E.	126
Figura 67. Cálculo de tramo E-F.	127
Figura 68. Cálculo de tramo F-G.	128
Figura 69. Cálculo tramo G-H.	129
Figura 70. Juntas de expansión que se deciden instalar.	131
Figura 71. Datos técnicos de la junta de expansión escogida.	131
Figura 72. Cotización de tubería transair.	132
Figura 73. Cotización de tubería Transair.	133
Figura 74. Medición de consumo en combustibles alternos.	138
Figura 75. Medición de presión en puntos a la salida del acumulador cuarto compresores 1.	138

Índice de tablas

Tabla 1. Composición del aire.....	17
Tabla 2. Velocidades recomendadas para diferentes tipos de tuberías.	36
Tabla 3. Coeficiente de simultaneidad según cantidad de equipos instalados	37
Tabla 4. Índice de resistividad.....	38
Tabla 5. Distribución de la planta según áreas y su respectiva codificación.....	47
Tabla 6. Equipos conectados a GFH 110.	48
Tabla 7. Equipos conectados a GFH 221.	49
Tabla 8. Equipos conectados a GFH 222.	49
Tabla 9. Equipo conectado a GFH 223.	49
Tabla 10. Equipos conectados a GFH 250.	50
Tabla 11. Equipos conectados a GFH 300.	50
Tabla 12. Equipos conectados a GFH 301.	51
Tabla 13. Equipo conectado a GFH 302.	51
Tabla 14. Equipo conectado a GFH 303.	52
Tabla 15. Equipo conectado a GFH 608.	52
Tabla 16. Equipo conectado a GFH 304.	52
Tabla 17. Equipo conectado a GFH 370.	53
Tabla 18. Equipo conectado a GFH 604.	53
Tabla 19. Equipo conectado a GFH 605.	53
Tabla 20. Equipo conectado a GFH 420.	54
Tabla 21. Equipo conectado a GFH 431.	54
Tabla 22. Equipo conectado a GFH 432.	54
Tabla 23. Equipo conectado a GFH 433.	55
Tabla 24. Equipo conectado a GFH 500.....	55
Tabla 25. Equipo conectado a GFH 502.	55
Tabla 26. Equipo conectado a GFH 503.	56
Tabla 27. Equipo conectado a GFH 501.	56
Tabla 28. Mediciones de caída de presión.	60
Tabla 29. Compresores disponibles.....	61
Tabla 30. Selección de diámetros de tubería principal.	66
Tabla 31. Resumen de diámetros escogidos con tubería de aluminio	69
Tabla 32. Resumen de selección de diámetros propuesta # 2.....	69
Tabla 33. Diseño de tubería de torre.	71
Tabla 34. Diseño de tramo que comunica dos acumuladores frente a VTI	73
Tabla 35. Lista de materiales necesarios para tubería principal.	75
Tabla 36. Cálculo de ahorros al modificar el sistema nuevo.....	78
Tabla 37. Muestreo horario realizado 6/10/2014.	82
Tabla 38. Distribución de frecuencias de compresor Sullair # 1.....	84

Tabla 39. Distribución de frecuencias de compresor Sullair # 2.....	85
Tabla 40. Distribución de frecuencias compresor Sullair #3.....	86
Tabla 41. Distribución de frecuencias compresor Sullair # 4.	87
Tabla 42. Datos eléctricos de compresores instalados.....	88
Tabla 43. Calculo de potencia consumida por los compresores.	89
Tabla 44. Costo económico de la energía por hora.....	90
Tabla 45. Gastos de mantenimiento por hora.	92
Tabla 46. Costo inicial de compresores instalados.....	94
Tabla 47. Costo de inversión por hora.....	95
Tabla 48. Costos de aire comprimido.	96
Tabla 49. Calculo de aire entregado según energía consumida.	98
Tabla 50. Puntos para la interpolación.	100
Tabla 51. Ahorros por reducción de presión de operación.....	102
Tabla 52. Resumen de costos de fuga determinados.....	103
Tabla 53. Costo total de red de aire actual.	105
Tabla 54. Ahorro de modificación de sistema de enfriamiento.	106
Tabla 55. Ahorro de dinero por potenciar detección de fugas.	107
Tabla 56. Costos del nuevo diseño.	108
Tabla 57. Consumo de filtros de mangas.....	122
Tabla 58. Cálculo de volumen desplazado por ciclo de pistones doble efecto.	125
Tabla 59. Expansión calculada para los distintos tramos de la red principal.	130
Tabla 60. Muestreo distintos días al compresor Sullair # 1.....	134
Tabla 61. Muestreo distintos días al compresor Sullair # 2.....	135
Tabla 62. Muestreo de distintos días al compresor Sullair # 3.	136
Tabla 63. Muestreo de distintos días al compresor Sullair # 4.	137

Resumen

Una compañía de primer mundo siempre trata de mantenerse en el mercado apoyando inversiones y ampliando su eficiencia de productividad. Por tal razón, Cemex, específicamente planta Colorado, abre las puertas a un proyecto de ingeniería con la intención de innovar y comparar la viabilidad de sustituir su tubería principal de aire comprimido por tubería de aluminio.

En primer lugar, dentro del presente proyecto se analiza la condición de la actual tubería principal desde la perspectiva operativa, midiendo la caída de presión de los diferentes tramos y determinando la cantidad de fugas que presenta.

Seguidamente, se construye una base de datos sobre los consumos de los diferentes equipos conectados a la red de aire comprimido, esto con la intención de ajustar el nuevo diseño al contexto operativo actual de Cemex y a las futuras expansiones, ya que una compañía de esta envergadura siempre está proyectando su mirada hacia el futuro; por tal motivo, las condiciones futuras se prevén y se consolidan como pilar fundamental del presente diseño.

Por otro lado, la dimensión de la red de aire comprimido de Cemex obliga a cualquier estudiante de Ingeniería a promover oportunidades de conservación de la energía, por lo que dentro de este proyecto se incorporan propuestas de mejora de algunos sistemas estudiados.

Finalmente, se hacen estudios sobre el costo del aire comprimido para Cemex y se hacen evaluaciones económicas de las diferentes propuestas planteadas, para dejar un criterio más claro a los encargados de la planta de cara a decidir acoger o no el nuevo diseño y las diferentes oportunidades de conservación de energía propuestas.

Palabras clave: Aire comprimido, red principal, tuberías.

Abstract

A first world company is always kept in the market supporting investments and expanding its productivity efficiency, specifically for that reason Cemex plant Colorado, opens the door to an engineering project with the intention to innovate and compare the feasibility of replacing the pipe compressed air main pipe of aluminum

First, within this project the condition of the current main line is analyzed from an operational perspective, measuring the pressure drop of the different sections and determining the amount of leakage that presents.

Furthermore, a database of consumption of different devices connected to the compressed air network was built, with the intention to adjust the new design to the current operating context of Cemex and future expansions, a company with this magnitude is always casting its gaze to the future, as such anticipated future conditions and fundamental pillar of this design are consolidated.

Another point is that the size of the compressed air Cemex, requires any student of engineering to promote opportunities for energy conservation so within this project some proposals to improve systems studied are incorporated.

Finally, studies of the cost of compressed air to Cemex are made and economic evaluations of the various proposals put forward are made, to leave a clear criterion to those responsible for the plant in the decision to accept or not the new design and the different opportunities energy conservation proposals.

Keywords: Compressed air, main tubing, pipes

Introducción

Objetivo general

Diseñar la tubería de la red principal de aire comprimido de la planta Cemex Costa Rica, localizada en Colorado de Abangares.

Objetivos específicos

- Reducir el porcentaje de fugas en la red principal de aire comprimido.
- Modificar la red de distribución de la tubería principal de aire comprimido en donde se tracen rutas más eficientes para distribuir el aire comprimido a los diferentes procesos.
- Justificar, por medio de un estudio económico, la viabilidad y rentabilidad del diseño propuesto.
- Proponer oportunidades de conservación de la energía en el sistema de aire comprimido.

Metodología

Al ser un proyecto de diseño, la metodología que se aplica está basada en una línea de procedimientos progresivos; sin embargo, para no hacer un listado de actividades, el proyecto se subdivide en las siguientes etapas:

1. Inventario de equipo conectado a la red y requerimientos de funcionamiento
2. Evaluación de la condición de la tubería principal: En esta etapa se deberá hacer el estudio de la cantidad de fugas que presenta la tubería principal, así como medir la caída de presión que poseen los diferentes tramos.
3. Diseño de nueva tubería principal: En esta etapa se deberá realizar el diseño de la tubería principal, haciendo la selección de tuberías, accesorios, planos correspondientes y la cotización del proyecto.
4. Detección de oportunidades de conservación de la energía: La actividad deberá hacerse por medio de recorridos y estudios de consumo, a fin de determinar oportunidades de ahorro.
5. Estudio económico de proyecto: Es la etapa donde se deberá hacer un análisis del costo del aire comprimido para CEMEX y determinar cuánto dinero se desperdicia por concepto de fugas y caída de presión con la actual tubería principal; luego, se realizará un análisis para comparar la inversión de la nueva tubería y los beneficios que trae frente a conservar la tubería actual.

Definición del problema

Actualmente la empresa CEMEX, ubicada en Colorado, Costa Rica, cuenta con una red principal de aire comprimido de hierro negro que tiene orígenes en la década de los 80, lo cual es un gran indicativo de su longevidad.

Además, esto es acompañado por el inconveniente de que la red presenta un alto grado de corrosión, lo que ha llevado al personal de mantenimiento a involucrar parches para eliminar las fugas.

Sin embargo, el desconocimiento de la condición con que cuenta la red y las pérdidas que involucra (desperdicios por fugas, aumento de presión de trabajo, riesgo de paros no programados) impulsa al personal encargado de mantenimiento a buscar la mejora continua y a hacer un estudio de su red actual, así como a diseñar una red nueva en donde se promuevan mejores técnicas ingenieriles.

Bajo otro contexto, la empresa actualmente diversifica su producción y es exportadora del producto terminado a algunas naciones de Centroamérica, lo que ha venido acompañado de un crecimiento en la demanda de aire. Lo anterior ha hecho que la red actual presente elevadas velocidades de transporte de aire en algunos tramos, lo que hace que deba ser actualizada ante las demandas presentes y con una proyección al futuro.

Capítulo 1: Reseña de la empresa

Cemex es la compañía americana más grande del continente en producción de cemento. Dicha empresa inició operaciones en el país luego de comprar 95% de las acciones de CEMPA, en 1999.

La fábrica está ubicada en la provincia de Guanacaste, distrito Colorado del cantón de Abangares.

Esta planta obtuvo, en el 2003, las certificaciones ISO 9001 en cemento; en 2011, la certificación ISO 17025 y en 2012, la certificación ISO 14001.

Dentro de sus productos tiene:

- Venta de concretos:
 - Concreto convencional.
 - Concreto bombeable.
 - Concreto de baja permeabilidad.
 - Concreto de fraguado retardado.
 - Concreto de alta resistencia.
- Cementos:
 - UG.
 - Blanco.
 - Industrial.
- Morteros:
 - Repello grueso.
 - Mortero multiuso.
 - Concreto seco.
 - Cerámica *premium*.
 - Cerámica *plus*.
 - Cerámica estándar.
 - Repello proyectable.
 - Repello fino.

- Agregados.
- Infraestructura de pavimentos.

El Departamento de Mantenimiento de la planta Colorado está estructurado de la siguiente manera:

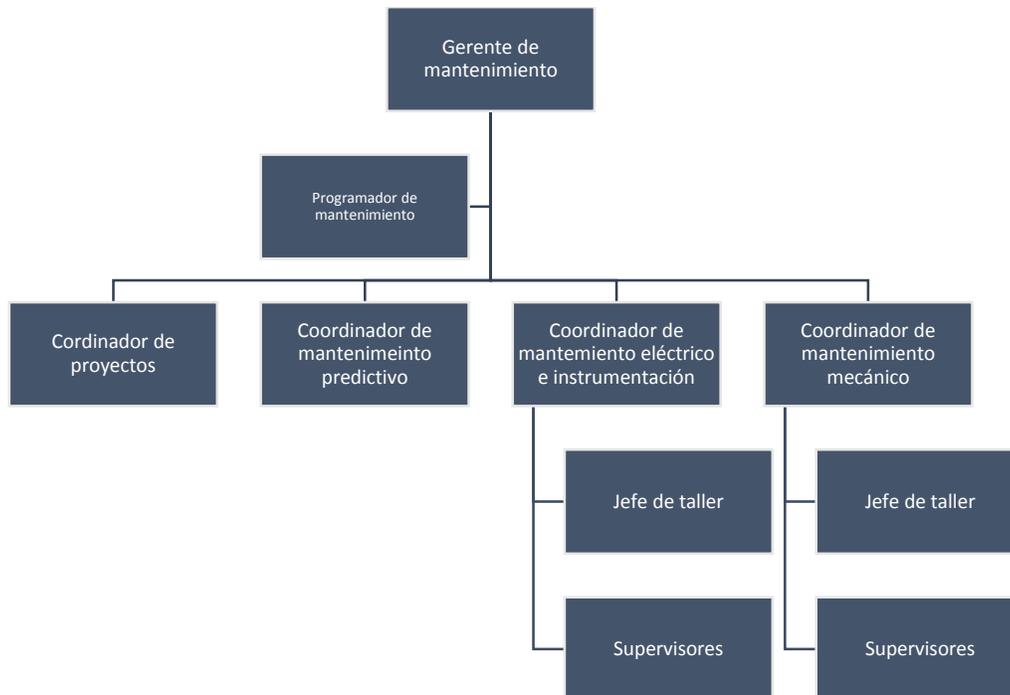


Figura 1. Estructura organizacional del Departamento de Mantenimiento.

Fuente: Cemex. (2014).

Finalmente la misión y los valores de la compañía son:

Misión:

“Satisfacer globalmente las necesidades de construcción de sus clientes y crear valor para sus accionistas, empleados y otras audiencias clave, consolidándose como la compañía de soluciones para la industria de la construcción más eficiente y rentable del mundo.” (Cemex, 2014).

Valores:

Colaboración.

Integridad.

Liderazgo. (Cemex, 2014).

Descripción del proceso

La fabricación de cemento tiene origen en la extracción de materia prima de las llamadas canteras, en dicha locación se dinamitan y se extraen los yacimientos de caliza que serán depositados en un quebrador de piedras primario. Este quebrador impulsa el material a una segunda etapa, por medio de la acción de la gravedad, ahí se vuelve a triturar a una fineza mayor y es transportada hacia un almacén de caliza.

A continuación, desde el almacén se envía material hacia las tolvas de extracción y dosificación, en dichas tolvas se inyectan en proporciones asignadas por el Departamento de Producción: mineral de hierro, caliza y arcilla, para ser enviados por medio de una cinta transportadora al molino de crudo, en donde se pulverizan, quedando en forma de polvo llamado harina de crudo.

Posteriormente, dicho material pasa a través de una bomba y es enviado hacia un par de silos de concreto para homogenizarse. Dentro de estos silos hay una serie de actuadores que permiten la inyección de aire producido por un sistema de ventilación que genera una onda turbulenta que mueve la masa de harina, permitiendo así su correspondiente homogenización.

Una vez que estos materiales son homogenizados, se depositan en la torre intercambiadora, cuya función es transferir calor al material; el material circula por medio de cinco ciclones (dichos ciclones tienen aspecto similar al de una tolva) que podríamos llamar etapas. Los gases se inyectan a estas tolvas de forma tangencial, lo que promueve el efecto ciclón en el material.

Conforme desciende por la torre, entra en contacto con gases más calientes provenientes del horno y del calcinador. En la tercera etapa hay una desviación que envía el material hacia el calcinador (alrededor de 80%) y, luego de circular por este, se deposita en la última etapa, entrando al horno. El horno es un enorme cilindro por donde el material es transportado hasta alcanzar la llama, bajo una temperatura o cercana o mayor a 1200°C.

Seguido de eso, el material es golpeado por un sistema de ventilación, lo que impregna un choque térmico, logrando así una estructura sólida de aspecto rocoso llamado *clinker*. Este material es mezclado con yeso, caliza y algún otro agregado en proporciones asignadas por laboratorio, para ser procesado por medio de un molino horizontal relleno de bolas de acero que es impulsado por un motor de 4000hp. A la salida del molino, es transportado hacia unos silos, en donde es distribuido a carga a granel y ensacado.

La descripción anterior corresponde a una explicación simple del proceso de fabricación de cemento (obsérvese el diagrama de flujo en los anexos); sin embargo, es importante anotar que hay zonas que sirven para aportar energía al horno y hay otro subproceso llamado premezclados.

La parte de molienda de *coke* es un sistema que consta de un almacén en donde los furgones depositan el material proveniente del extranjero. Dicho material es un residuo del proceso de refinación de petróleo, tiene aspecto rocoso de color negro; además, cuenta con un poder calorífico suficiente para usarlo como combustible del horno y del calcinador.

Seguidamente, el *coke* es depositado en una tolva, la cual descarga en una cinta transportadora ascendente llevando este material hacia un molino vertical, dicho molino deposita el material molido en dos silos (los cuales cuentan con un sistema de extracción de polvo). El material es dosificado por medio de una tolva dosificadora *pfister* de fabricación alemana, la cual se encarga de regular la cantidad de material que se debe enviar al quemador del horno y el calcinador, en el cual se consume un valor cercano al 80% del combustible.

Por otro lado, con el fin de mitigar el impacto y la contaminación ambiental, la planta impulsa el uso de combustibles alternos, dicha sección es una propuesta conservadora y admirable, ya que actualmente el porcentaje de aplicación de combustibles alternos satisface más del 20% del combustible requerido por el proceso.

Dentro de los combustibles alternos que utilizan hay aceites usados, aserrín, cascarilla de arroz, desechos de las residencias y oficinas (plástico y papel).

El proceso de combustibles alternos consiste en dos tolvas en las cuales se inyecta material para ser elevado hacia un sexto piso de la torre intercambiadora de gases, una vez allí es transmitido hacia el calcinador para imprimir calor al horno.

La sección de premezclados es un subproceso que tiene la función de fabricar concreto seco, el cual es dosificado según indique Producción, este proceso cuenta con todo un sistema desde la dosificación y mezclado del material, hasta el ensacado del producto terminado.

Capítulo 2: Marco teórico

El aire comprimido es uno de los grandes descubrimientos del ser humano, ya que es una forma de producir energía por medio del aire circundante, lo que lo hace una herramienta energética de amplia aplicación, por su facilidad de respuesta y transporte.

La transformación del aire circundante en aire comprimido se realiza por medio de un proceso mecánico del cual se desprenden muchas variables que a continuación se procederán a analizar.

¿Aire?

Podría definirse como un gas incoloro e insípido dentro de cuya configuración posee distintos gases, según se describe a continuación.

Tabla 1. *Composición del aire.*

Componente	Porcentaje en volumen
Nitrógeno	78,09
Oxígeno	20,95
Argón	0,93
Dióxido de carbono	0,03

Fuente: Royo. (1977).

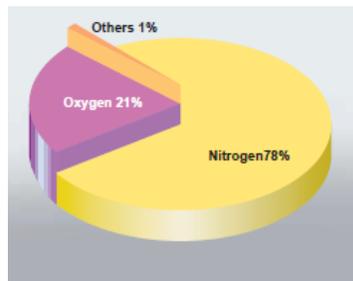


Figura 2. *Composición del aire.*

Fuente: Atlas Copco. (2010)

Lo anterior va acompañado de limitaciones, pues esas composiciones se conservan, según el Manual de Aire Comprimido (2010), a una altura de 25km a partir del nivel del mar, posterior a eso es sujeta a variaciones.

Un punto importante de señalar es que, dentro de los componentes que conforman al aire, el ser humano ocupa para vivir oxígeno y nitrógeno.

Conceptos generales

Para familiarizarse con los sistemas de aire comprimido, es conveniente conocer los siguientes conceptos.

Presión:

Puede definirse como la fuerza normal por unidad de área ejercida por un fluido; existen diferentes denominaciones de presión: absoluta, manométrica o efectiva, atmosférica y vacío. (Cengel, 2006).

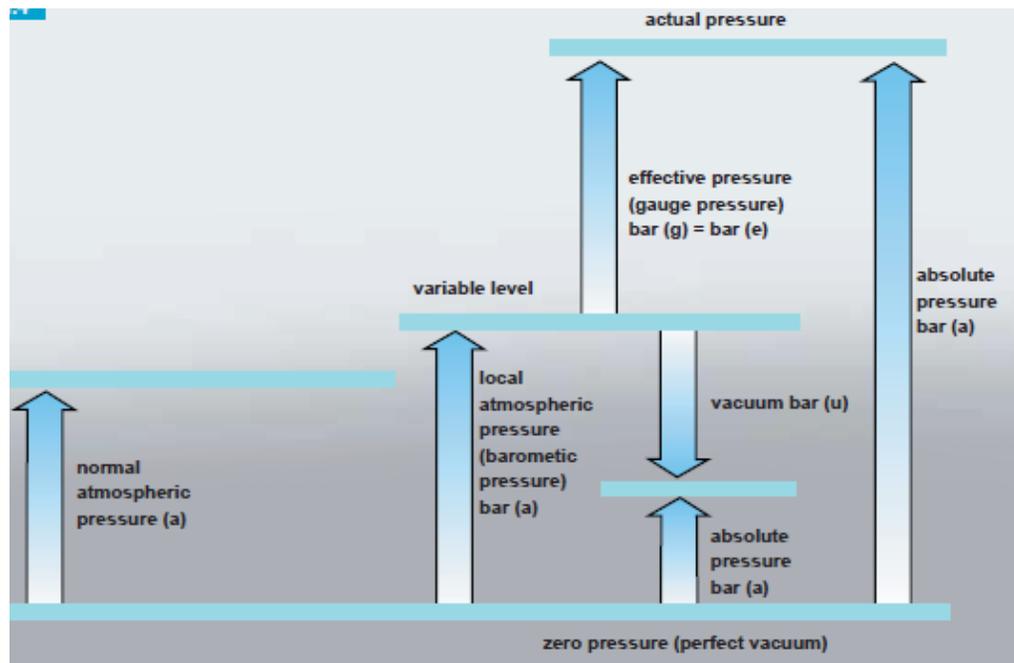


Figura 3. Ilustración de escalas de presión.

Fuente: Atlas Copco. (2010)

Presión atmosférica: es la presión a nivel del mar, es un indicador o valor fijo correspondiente a $10,13 \times 10^4$ Pa.

Presión atmosférica local o presión barométrica: es la presión ambiental en un lugar determinado, en función de la altitud con respecto al nivel del mar.

Presión de vacío: es la presión inferior a la presión barométrica, también llamada presión negativa.

Presión absoluta: es la presión real que se encuentra en una posición dada.

Presión manométrica: es también llamada presión efectiva y se define como la diferencia entre presión absoluta y presión atmosférica local. (Cengel, 2006).

Temperatura:

Es un término complejo; sin embargo, una definición apropiada es: la cantidad de energía cinética con que se mueven las moléculas.

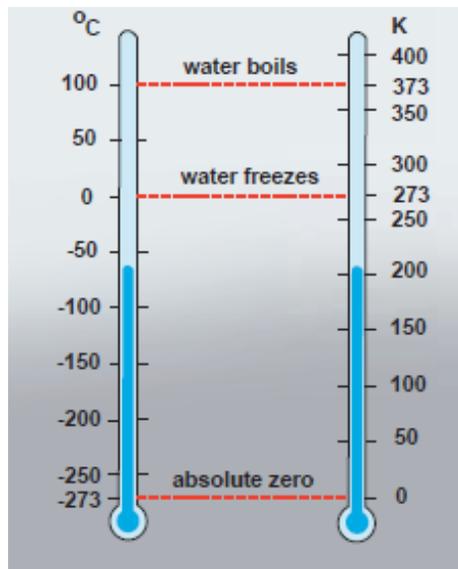


Figura 4. Escalas de temperatura.

Fuente: Atlas Copco, (2014).

Leyes de los gases

La **Ley de Boyle** establece que si la temperatura de los gases es constante (isotérmica), entonces, la razón de volumen están en función de la temperatura. La ecuación es la siguiente:

$$P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2$$

Donde:

P es presión y está dada en pascales y V es volumen, está dado en m³.

La **Ley de Charle's** establece que si la temperatura es constante (isotérmica), entonces el volumen varía en función de la temperatura:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

Donde:

V es volumen y está dado en m³ y T está dado en Kelvin (K).

Ley general de los gases es una combinación de las leyes descritas, en donde se involucra la constante individual de los gases:

$$\frac{PxV}{T} = R$$

Donde:

P es presión absoluta en Pascales, V es volumen específico en m³/kg, T es temperatura en Kelvin y R es la constante individual de los gases ideales

Aire libre Nm³/min:

Luego de haber analizado lo descrito, se puede inferir que el aire depende de las condiciones climáticas y geográficas; por lo tanto, es un reto de la ingeniería establecer un punto de referencia para los aparatos y demás artículos neumáticos con respecto al consumo que requiere. Por ejemplo, la cantidad de aire que puede suplir un compresor cercano a nivel del mar en una zona costera no será el mismo que podrá suministrar en una zona montañosa.

Por lo tanto, para contar con un sistema estándar, se maneja el concepto de aire libre, el cual no depende de estas condiciones sino que está anclado a la presión atmosférica y temperatura de 20°C con una humedad relativa de 36%:

$$Q = Q_1 \left(\frac{P + 101325Pa}{101325Pa} \right)$$

Donde:

Q_1 es el caudal a las condiciones del lugar y P , la presión de aire comprimido en pascales.

Compresores

Los compresores son los encargados de producir el aire comprimido, impulsados por motores eléctricos o de combustión.

Como se muestra en la figura siguiente, los compresores se clasifican en dinámicos y de desplazamiento. Los dinámicos se dividen en tres: radiales, axiales y eyector, mientras que los compresores de desplazamiento se dividen en dos grupos: los de pistón y los de rotor.

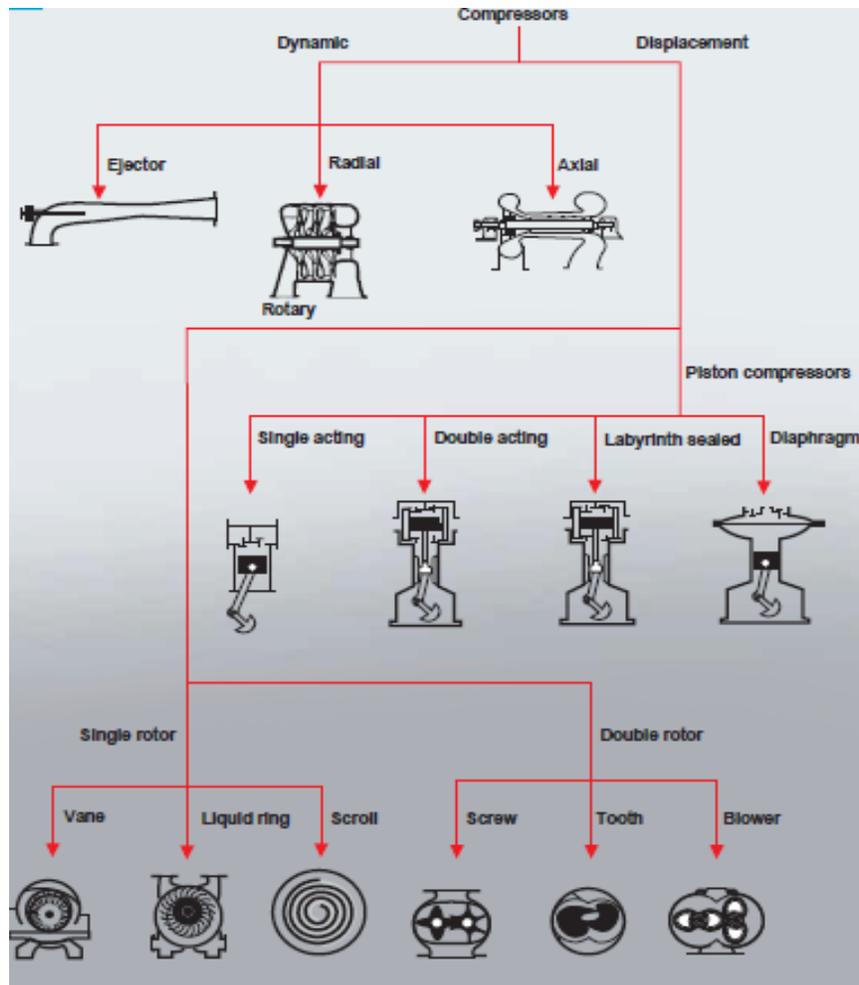


Figura 5. Clasificación de compresores.

Fuente: Atlas Copco (2014).

A continuación se hará un comentario y se ilustrarán algunos de los tipos de compresores mostrados en la Figura 9.

Compresor de pistón

En la figura siguiente se muestra un compresor de pistón en V, cuyo principio de funcionamiento radica en la compresión de las cámaras en las que se desliza el pistón.

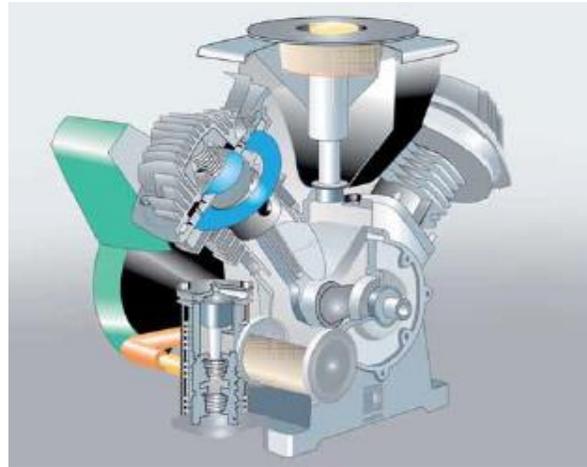


Figura 6. Compresor de pistón en V.

Fuente: Atlas Copco. (2014).

Compresor de tornillo

Es uno de los compresores de amplio uso industrial, cuyos orígenes datan de la década de los 30. Fueron creados por Alf Lysholm.

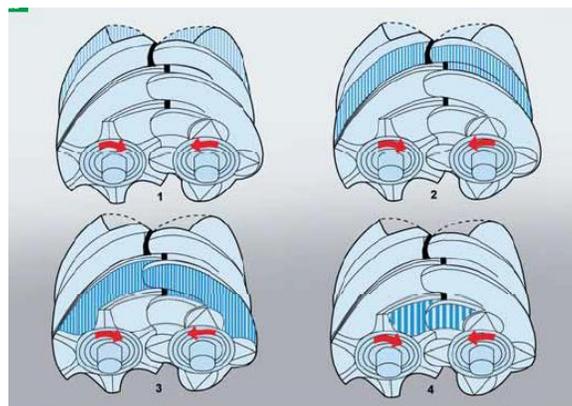


Figura 7. Diagrama de funcionamiento de compresor de tornillo.

Fuente: Atlas Copco (2010).

Como se puede apreciar en la Figura 7, que ilustra el funcionamiento del compresor de tornillo, éste toma el aire y lo va limitando conforme se desliza por los dientes del sinfín helicoidales.

Compresor tipo Roots

Son comúnmente conocidos como soplantes, su característica principal es que son de baja presión y su principal aplicación es impartir caudal.

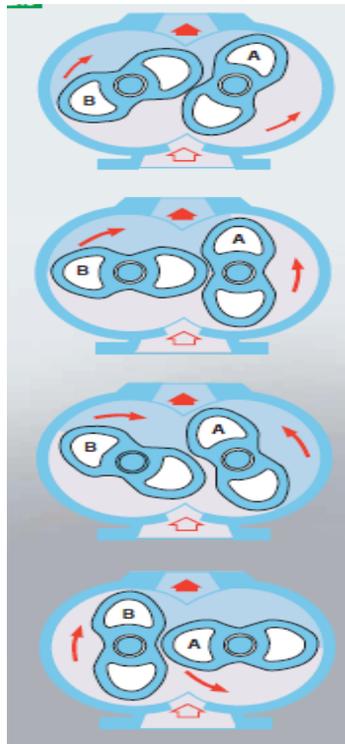


Figura 8. Compresor tipo roots.

Fuente: Atlas Copco. (2014).

Compresor de paletas

Dentro de sus cualidades está ser silenciosos, pero cuentan con una baja eficiencia, a la vez que poseen un alto costo de mantenimiento.

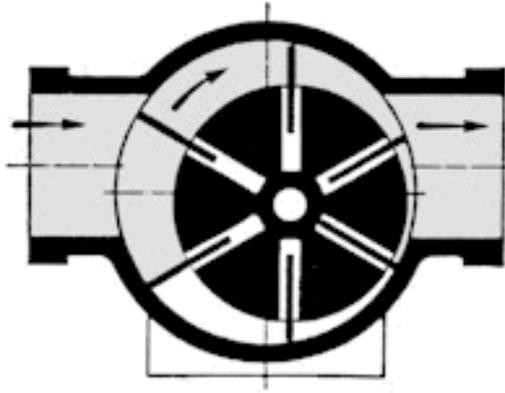


Figura 9. Compresor de paletas.

Fuente: Boge (2014).

Compresor centrífugo

Presenta las características de salida de aire uniforme, son libres de aceite sensibles a los cambios de carga.

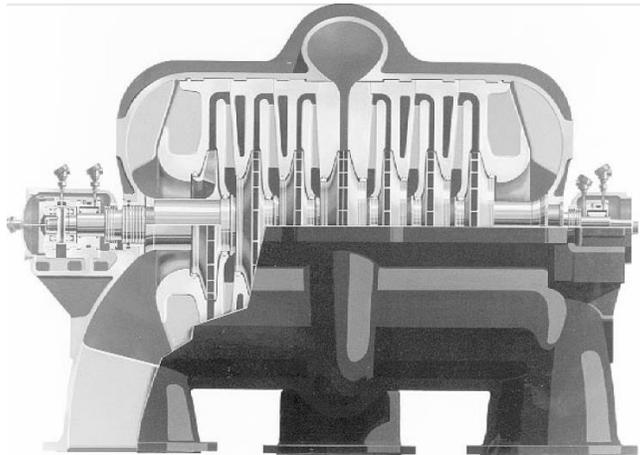


Figura 10. Compresor centrífugo.

Fuente: Hanlon (1976).

Compresor axial

Su aplicación es para flujos grandes y constantes de aire; su virtud es la libertad de aceite.

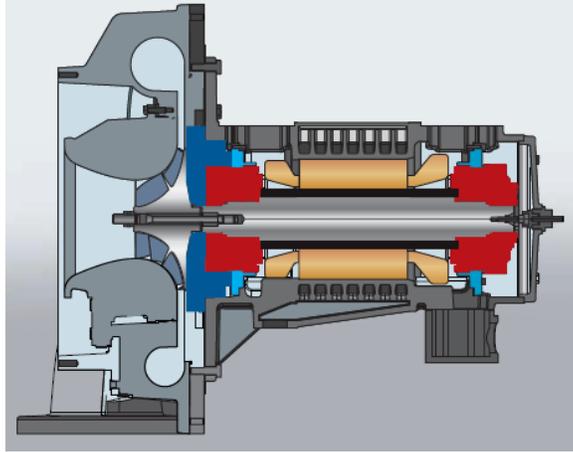


Figura 11. Compresor axial.

Fuente: Atlas Copco. (2014).

Humedad

Producto del proceso de compresión, el aire suma presión, disminuye su volumen y aumenta su temperatura. Este aumento de temperatura hace que pueda retener mayor cantidad de vapor de agua, sin embargo, a través del tiempo, el aire llega a alcanzar la temperatura ambiente en donde deberá perder temperatura y, por consiguiente, capacidad de retener vapor de agua.

Por otro lado, al disminuir la capacidad de retener agua, se genera condensación, ahora bien, la razón de evitar agua dentro del sistema de aire radica en que este es un fluido incompresible, aunado a esto, la humedad provoca aumento en la velocidad de corrosión dentro de las tuberías de hierro, así como en algunas herramientas; asimismo, podría traer consigo pérdidas de calidad de productos, reprocesos y demás problemas que impiden la productividad.

Lo anterior trae consigo una discusión y mucho análisis. A continuación se habla acerca de una de las formas para determinar la humedad.

Punto de rocío: es también llamado punto de condensación, se usa para determinar el límite al cual se producirá condensado¹; es decir, si la temperatura desciende de este punto se producirá agua.

Seguidamente, interesa comprender que el punto de rocío depende no sólo de la temperatura sino que también varía según la presión, según el Manual de Aire Comprimido (2010), el punto de rocío a 7bar de +2°C será equivalente a -23°C a presión atmosférica (la figura a continuación ilustra mejor lo anteriormente suscitado) (para ampliar acerca de cómo conseguir el punto de rocío según la presión de salida del compresor, consulte en los anexos del presente documento).

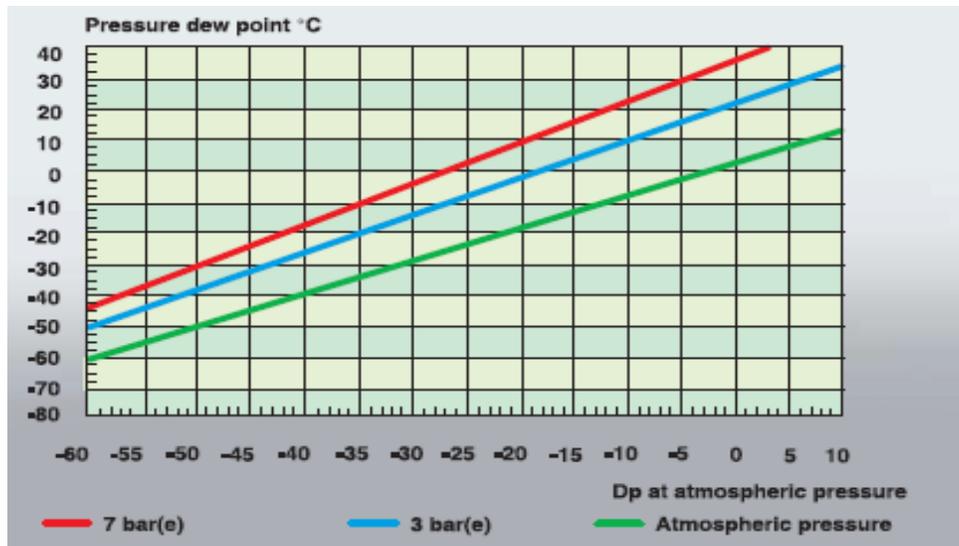


Figura 12. Relación de punto de rocío y presión.

Fuente: Atlas Copco. (2010).

Métodos para combatir la humedad

Para extraer la humedad del aire comprimido se utilizan los secadores, estos son dispositivos que se subdividen como se muestra en la figura a continuación:

¹ Cantidad de agua que se produce como resultado de enfriamiento.



Figura 13. Tipos de métodos de secado

Fuente: Garro Zavaleta. (2014).

De lo anterior también hay que añadir que, en la mayoría de las configuraciones, existe un postenfriador (*after coolers*, comúnmente llamados), la función de estos dispositivos es enfriar el aire proveniente del compresor para que éste entregue la mayor cantidad de humedad posible.

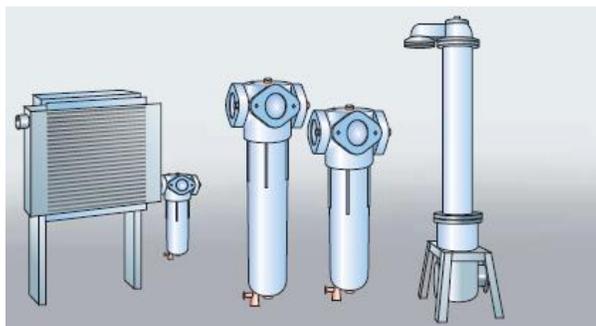


Figura 14. Postenfriadores

Fuente: Atlas Copco (2010).

Según el Manual de Aire Comprimido (2010), es probable disminuir cerca del 80% a 90% de la humedad del aire.

Secadores de refrigeración

Tienen dentro de su configuración un circuito de refrigeración cuya función es enfriar el aire y hacerlo perder humedad, su principal ventaja es que disminuyen en alto grado el punto de rocío.

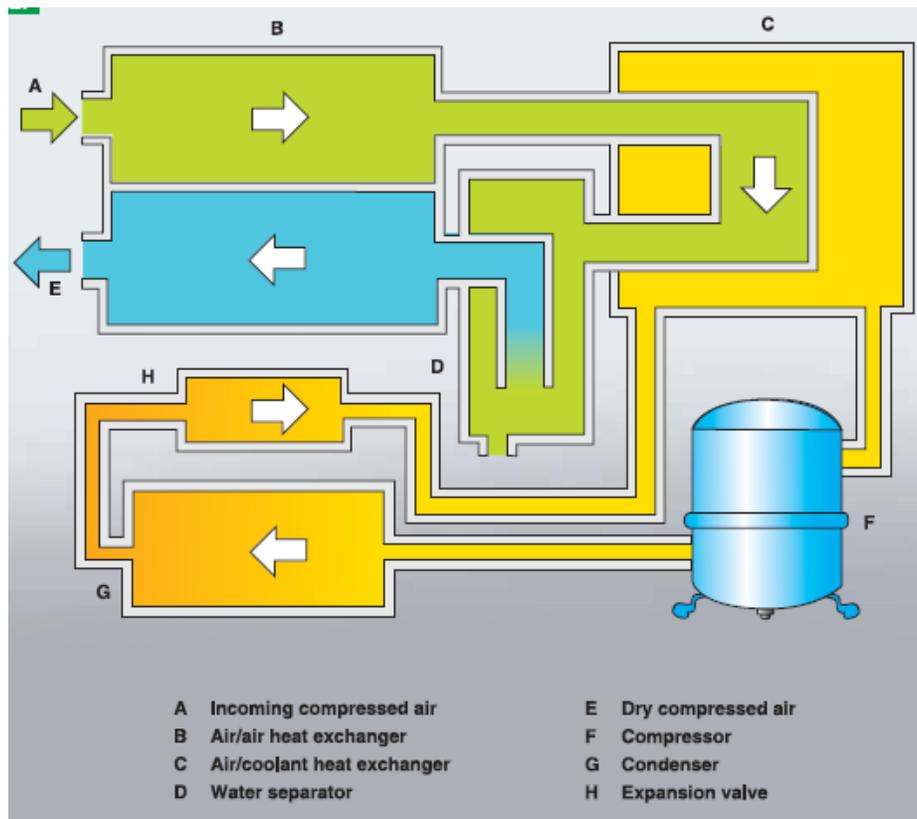


Figura 15. Circuito de secador de refrigeración

Fuente: Atlas Copco (2010).

Secado de sobrepresión:

El aire es sometido a una presión superior a la requerida por el sistema, lo que provoca que éste se refrigere y se desprenda la humedad; una vez sucedido este evento, se vuelve a decrecer su presión logrando así la deseada en los dispositivos.

Secado por absorción

Este tipo de secado se realiza por medio de una sustancia química que atrae la humedad, lo que le permite atraparla y, a la vez, se disuelve en ella.

Fig. 16
Principio de funcionamiento
del secador por adsorción

- 1 Aire comprimido seco
- 2 Contenedor
- 3 Sustancia salina
- 4 Salida del condensado
- 5 Aire (húmedo) proveniente del compresor
- 6 Depósito de condensado

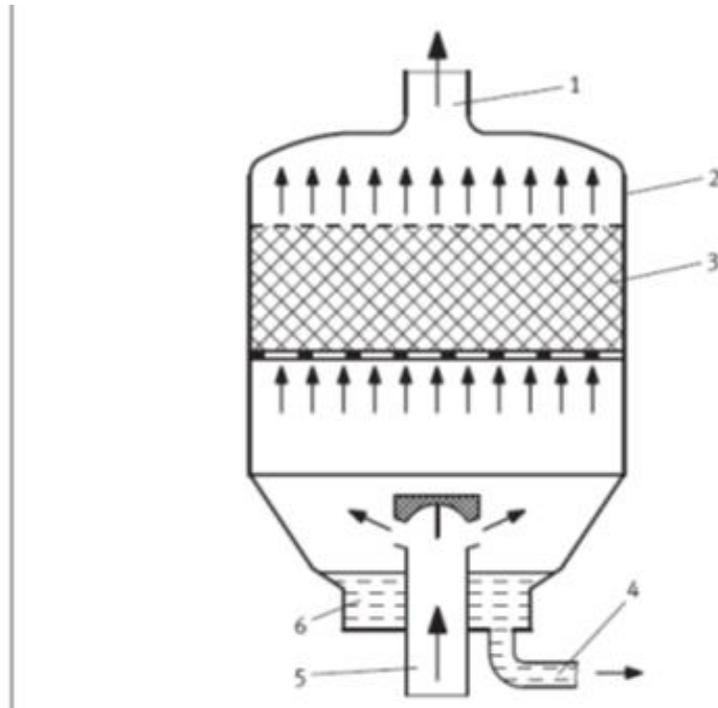


Figura 16. Secador por absorción

Fuente: Garro Zavaleta. (2014).

Secado por adsorción

La función que realiza es atrapar la humedad que se adhiere a su superficie dentro de ésta. La mayoría de los elementos de superficie usados son sílice, óxido de aluminio, carbón activo, etc.

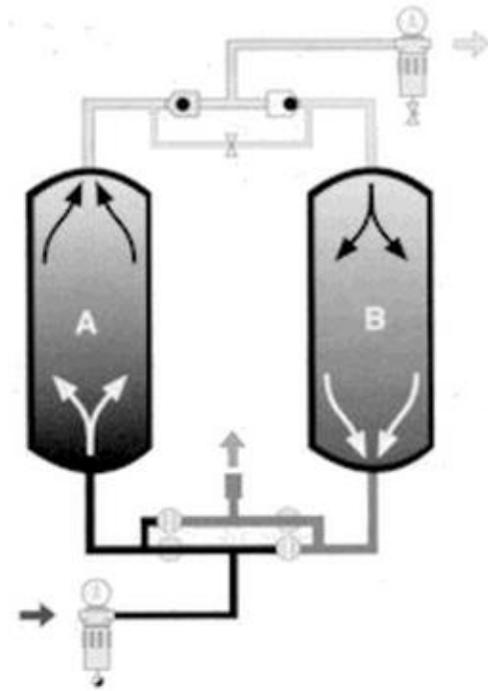


Figura 17. Secador por adsorción.

Fuente: Boge (2014).

Secador de membrana

Su principio de funcionamiento consiste en que el aire pasa a una velocidad superior en donde entra, atravesando una serie de orificios y desprendiéndose así su contenido de humedad.

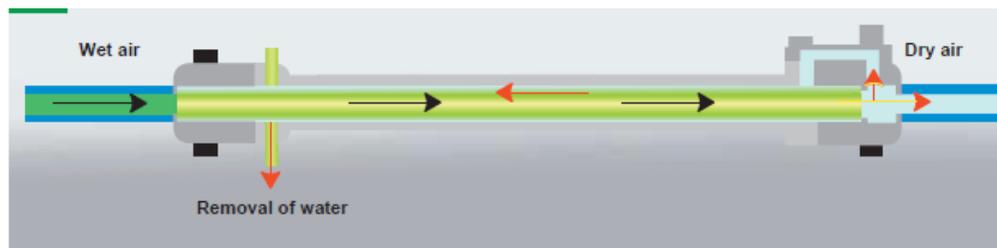


Figura 18. Secador por membrana

Fuente: Atlas Copco (2010).

Calidad del aire

Una vez conocido lo anterior y el fenómeno de la humedad que se da producto del aire comprimido, queda por estudiar el tratamiento que debe recibir el aire en función de la aplicación; la figura siguiente muestra los cuatro factores que es necesario extraer de un sistema de aire comprimido.

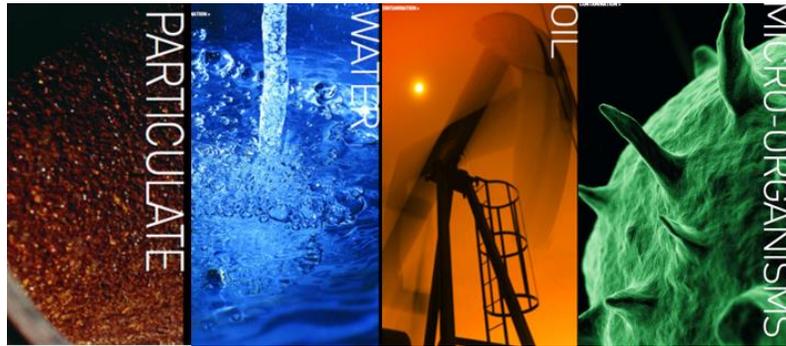


Figura 19. Elementos a extraer de un sistema de aire comprimido

Fuente: Parker, (2012).

¿Grados de calidad?

Para tener una mayor claridad sobre los sistemas de aire comprimido con respecto al tema de calidad, es necesario que dentro de este informe se mencione la normativa internacional que regula el grado de calidad del aire; esta norma es ISO 8573. Dentro de ésta hay una serie de normas que aplican en temas de tratamientos del aire, así como los contenidos de partículas, humedad, microorganismos y aceites permitidos.

La clasificación según el grado de calidad está en función de la aplicación e industria que utilice el aire, pues se habla de clase 1, cuando se trata de industria alimenticia, farmacéutica, cuartos limpios, etc., mientras que si se habla de clase 6, se trata de industria de la construcción, entre otras.

Lo anterior sirve de referencia e ilustración sobre los tipos de clases que utiliza la norma ISO 8573.

Tratamientos del aire

Anteriormente se conocieron las técnicas para extraer la humedad del aire, sin embargo, también se vio que la calidad del aire también vincula tres factores más: partículas, aceite y microorganismos.

Para alcanzar una pureza del aire se deben involucrar los filtros, que se analizan a continuación.

Filtro ciclónico:

El aire circula a través del filtro desprendiéndose en la parte inferior de las partículas; estos filtros tienen entre sus características una caída de presión² superior a 0,05 bar, una eficiencia³ de 95% y capacidad de filtración mayor a 50 µm.

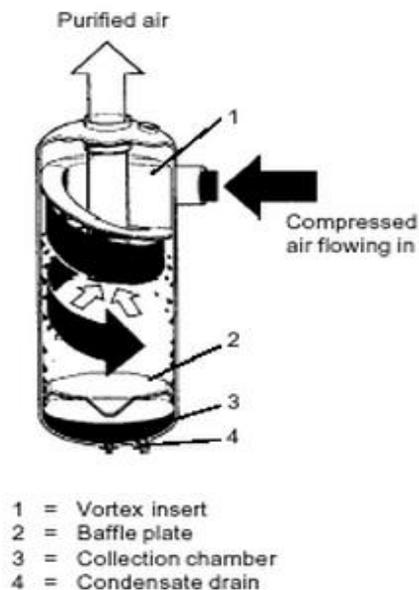


Fig. 5.23: Cyclone separator

Figura 20. Filtro ciclónico

Fuente: Boge. (2014).

² Caída de presión se refiere a la pérdida de presión cuando el aire circula a través del filtro.

³ Eficiencia es la capacidad de filtración. Se refiere a la razón de $100 - \left(\frac{\text{cantidad de partículas antes}}{\text{cantidad de partículas después}} \right) \times 100$

Pre-filtros:

Tienen la virtud de filtrar partículas hasta $3\mu\text{m}$, con una eficiencia de 99,99 y caídas de presión no mayores $0,03\text{ bar}$. Tienen la principal ventaja de ser reutilizables, ya que sus partes internas pueden reemplazarse.



Figura 21. Prefiltro Boge Seri V.

Fuente: Boge (2014).

Microfiltros:

Son usados cuando es requerido un alto nivel de calidad de aire, están conformados de una serie de fibras individuales que atrapan las partículas a tamaños no mayores de $0,01\ \mu\text{m}$, poseen una caída de presión mayor o igual a $0,1\text{ bar}$ y una eficiencia de 99,9999%.



Figura 22. Forma de filtrado de microfiltro

Fuente: Boge (2014).

Filtros de carbón activo

Son filtros capaces de retener tanto aceite como agua y disminuir su presencia hasta $0,0005 \text{ mg/m}^3$, dejando en evidencia su virtud; a su vez, pueden filtrar partículas no menores a $0,01 \text{ }\mu\text{m}$; habitualmente se tienen en conjunto con los microfiltros.

Por otro lado, en su mayoría, los elementos filtrantes de carbón tienen una vida de 1000 horas, por lo que deben sustituirse.

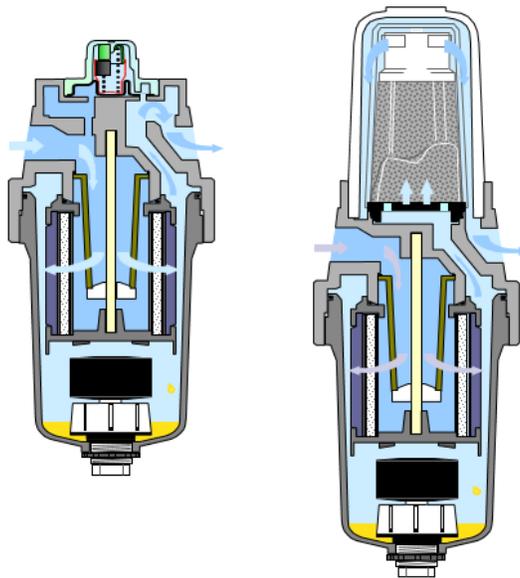


Figura 23. Filtro de carbón activo

Fuente: Garro Zavaleta. (2014).

Diseño de sistemas de aire comprimido

La presente sección de este marco teórico es una descripción de los parámetros y las consideraciones que forman parte del diseño de un sistema de aire comprimido.

Clasificación de tuberías

Tubería principal: es la tubería que va desde el depósito y distribuye la totalidad del caudal de aire.

Tubería secundaria: distribuye el aire desde la tubería principal hacia las áreas de trabajo.

Tubería de servicio: viaja desde la tubería secundaria hasta los equipos también conocidos como bajantes.

Tubería de interconexión: es la que conecta el equipo con el bajante.

Reglas de diseño

Regla #1: se admite una pérdida de presión no mayor a 2% desde la salida del compresor hasta el útil neumático; en redes grandes se permite 3%.

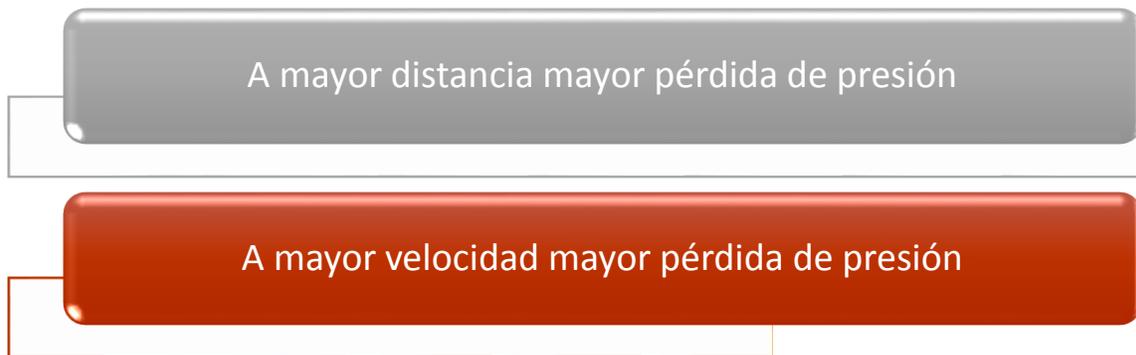


Figura 24. Factores que aumentan caída de presión

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Regla #2: se debe procurar respetar un límite de velocidad según el tipo de tubería. La siguiente tabla muestra una recomendación de velocidades:

Tabla 2. Velocidades recomendadas para diferentes tipos de tuberías.

Tipo de tubería	Velocidad (m/s)
Tubería principal	8
Tubería secundaria	10
Tubería de servicio	15
Tubería de interconexión	20-30

Fuente: Garro Zavaleta. (2014).

Regla # 3: las pérdidas por fugas no pueden ser mayores a 5% y en casos extremos, no superar el 10%.

Regla # 4: se debe considerar siempre el factor de ampliaciones, según Royo (1977), este es de 20%.

Cálculo de caudal de diseño (Qd)

Este es un punto importante dentro de la cadena de diseño de una red de aire comprimido, de modo que se deben seguir los siguientes pasos:



Figura 25. Ciclo para cálculo de caudal de diseño

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Lo anterior aplica para determinar el caudal de la tubería principal por seguir. Con las demás tuberías habría que aplicar el mismo principio, solo que se deben considerar únicamente los equipos que estén conectados a esa tubería.

En el caso de las tuberías de servicio, se debe garantizar que el caudal que llegue a éstas supla la necesidad del equipo instalado.

Factor de simultaneidad: este factor es un dato estadístico que se utiliza para determinar la probabilidad de que ocurran eventos de forma simultánea, hay varios métodos para determinarlo. La tabla siguiente muestra cómo, según la cantidad de equipos conectados, se determina este factor:

Tabla 3. Coeficiente de simultaneidad según cantidad de equipos instalados

Cantidad de unidades consumidoras	Factor de simultaneidad	Cantidad de unidades consumidoras	Factor de simultaneidad
1	1	9	0,73
2	0,94	10	0,71
3	0,89	11	0,69
4	0,86	12	0,68
5	0,83	13	0,67
6	0,80	14	0,66
7	0,77	15	0,65
8	0,75	100	0,20

Fuente: Garro Zavaleta. (2014).

Cálculo de caída de presión

La caída de presión de un sistema de aire comprimido es uno de los factores que deben de atraer la atención de cualquier ingeniero proyectista en vista de que su efecto provoca desperdicio de energía; por consiguiente desperdicio económico.

Hay muchas formas en las que se pierde la presión a través de un sistema de aire comprimido; que a su vez son imposibles de eliminar sin embargo existen variables de control que se pueden manejar para minimizar el efecto de ellas.

La fórmula siguiente ilustra el cálculo de la caída de presión

$$\Delta p = \frac{\beta x (Qd^2) x 15,2 x L}{Tx (D^5) x P}$$

Donde:

Δp : caída de presión (bar).

β : Índice de resistividad.

Qd: caudal de diseño (l/min).

L: longitud equivalente (m).

T: temperatura del aire (kelvin).

P: Presión absoluta (bar).

D: diámetro interior de tubería (mm).

El valor del índice de resistividad está tabulado y depende del flujo másico que circulará por la tubería, el flujo está expresado en términos de kg/h:

Tabla 4. Índice de resistividad

flujo	índice	flujo	índice	flujo	índice
5	2.14	110	1.43	350	1.21
10	2.03	120	1.41	400	1.18
15	1.92	130	1.40	500	1.15
20	1.85	140	1.38	600	1.12
25	1.78	150	1.36	700	1.09
30	1.74	160	1.35	800	1.07
35	1.70	170	1.34	900	1.05
40	1.66	180	1.33	1000	1.03
45	1.64	190	1.32	2000	0.94
50	1.61	200	1.31	3000	0.86
55	1.59	210	1.30	4000	0.84
60	1.56	220	1.29	5000	0.82
65	1.54	230	1.28	6000	0.80
70	1.53	240	1.27	7000	0.78
75	1.51	250	1.26	8000	0.76
80	1.50	260	1.25	9000	0.74
85	1.49	270	1.25	10000	0.73
90	1.48	280	1.24	15000	0.69
95	1.46	290	1.24	20000	0.67
100	1.45	300	1.23	25000	0.64

Fuente: Garro Zavaleta. (2014).

Para calcular la longitud equivalente, se deben sumar las longitudes equivalentes de los accesorios a la longitud real. Ello, porque para considerar la caída de presión de los accesorios, estos se transforman en una longitud imaginaria que sirve para determinar su impacto en la caída de presión. Existen tablas para encontrar estas equivalencias. A continuación se muestra una:

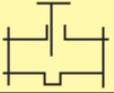
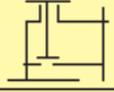
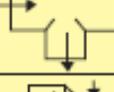
Equivalent length in meters												
Component		Inner pipe diameter in mm (d)										
		25	40	50	80	100	125	200	250	300	400	
Ball valve (full flow)		0.3 5	0.5 8	0.6 10	1.0 16	1.3 20	1.6 25	1.9 30	2.6 40	3.2 50	3.9 60	5.2 80
Diaphragm valve fully open		1.5	2.5	3.0	4.5	6	8	10	-	-	-	-
Angle valve fully open		4	6	7	12	15	18	22	30	36	-	-
Poppet valve		7.5	12	15	24	30	38	45	60	-	-	-
Flap check valve		2.0	3.2	4.0	6.4	8.0	10	12	16	20	24	32
Elbow R = 2d		0.3	0.5	0.6	1.0	1.2	1.5	1.8	2.4	3.0	3.6	4.8
Elbow R = d		0.4	0.6	0.8	1.3	1.6	2.0	2.4	3.2	4.0	4.8	6.4
90° angle		1.5	2.4	3.0	4.5	6.0	7.5	9	12	15	18	24
Tee through-flow		0.3	0.4	1.0	1.6	2.0	2.5	3	4	5	6	8
Tee side-flow		1.5	2.4	3.0	4.8	6.0	7.5	9	12	15	18	24
Reducing nipple		0.5	0.7	1.0	2.0	2.5	3.1	3.6	4.8	6.0	7.2	9.6

Figura 26. Longitud equivalente de accesorios.

Fuente: Atlas Copco (2010).

Cálculo y selección de tuberías

De la ecuación 5 es posible determinar el diámetro interno de la tubería, sin embargo hay otras técnicas que agilizan el cálculo, para el caso de tuberías de hierro negro es posible el uso de nomogramas.

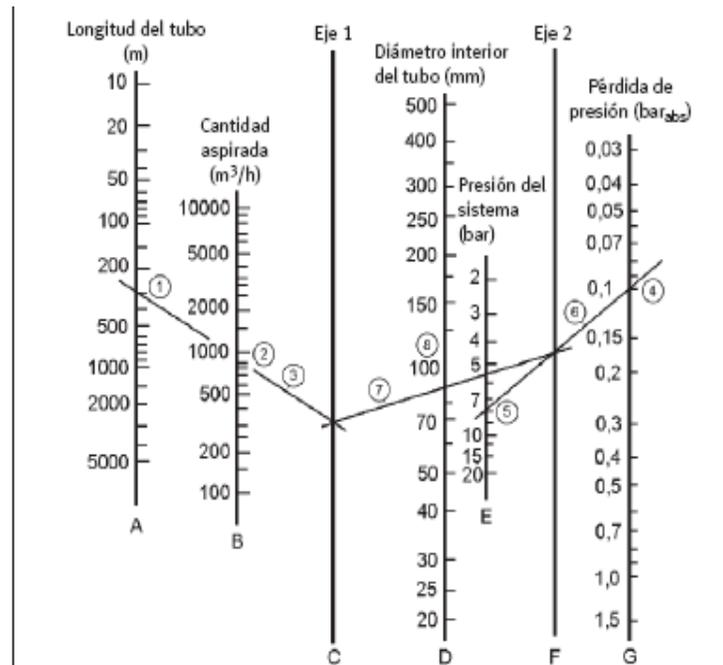


Figura 27. Nomograma de cálculo de tuberías

Fuente: Garro Zavaleta. (2014).

El uso de este nomograma sigue el siguiente procedimiento:

1. Marque la longitud equivalente de la instalación en la línea A.
2. Marque un punto con el caudal de aire comprimido sobre línea B.
3. Trace una línea hasta cruzar con el eje 1 (línea C).
4. Establezca una caída de presión y marque este punto (sobre línea G).
5. Marque un punto con la presión de operación de su sistema (línea E).
6. Trace una línea que una los puntos marcados en el paso 4 y 5.
7. Trace una línea que una los puntos de intersección entre los ejes 1 y 2.
8. El punto donde se cruce esta línea con la línea de diámetros será el valor del diámetro a seleccionar (línea D).

Para tuberías de aluminio también existen tablas de selección. El fabricante (Parker, 2012) da unas tablas para seleccionar el diámetro de las tuberías:

Caudal			Longitud										Compresor (Kw)
			164ft	328ft	492ft	984ft	1640ft	2460ft	3280ft	4265ft	5249ft	6561ft	
Nm ³ /h	NI/min	cfm	50m	100m	150m	300m	500m	750m	1000m	1300m	1600m	2000m	
10	167	6	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	25	25	25	1,5 - 7,5
30	500	18	16,5	16,5	16,5	25	25	25	25	25	25	40	
50	833	29	16,5	25	25	25	25	25	40	40	40	40	7,5 - 30
70	1167	41	25	25	25	25	40	40	40	40	40	40	
100	1667	59	25	25	25	40	40	40	40	40	40	63	
150	2500	88	25	40	40	40	40	40	40	63	63	63	
250	4167	147	40	40	40	40	63	63	63	63	63	63	
350	5833	206	40	40	40	63	63	63	63	63	63	76	30 - 75
500	8333	294	40	40	63	63	63	63	63	76	76	76	
750	12500	441	40	63	63	63	63	76	76	76	76	100	
1000	16667	589	63	63	63	63	63	76	76	100	100	100	75 - 315
1250	20833	736	63	63	63	63	63	100	100	100	100	100	
1500	25000	883	63	63	63	76	76	100	100	100	100	100*	
1750	29167	1030	63	63	76	76	76	100	100	100	100*	100*	
2000	33333	1177	63	76	76	76	100	100	100	100*	100*	100*	
2500	41667	1471	63	76	76	76	100	100*	100*	100*	100*	100*	
3000	50000	1766	76	76	76	100	100	100*	100*	100*	100*	100*	> 315
3500	58333	2060	76	76	100	100	100*	100*	100*	100*	100*	100*	
4000	66667	2354	76	100	100	100	100*	100*	100*	100*	100*	100*	
4500	75000	2649	76	100	100	100*	100*	100*	100*	100*	100*	100*	
5000	83333	2943	76	100	100	100*	100*	100*	100*	100*	100*	100*	
5500	91667	3237	100	100	100	100*	100*	100*	100*	100*	100*	100*	
6000	100000	3531	100	100	100*	100*	100*	100*	100*	100*	100*	100*	

* Pérdidas de carga >5 %

Figura 28. Selección de tuberías de aluminio

Fuente: Parker. (2012).

La selección de diámetro se hace a partir de la distancia por recorrer y el caudal por manejar. A partir de estos valores de entrada se escoge el diámetro recomendado por el fabricante. Por ejemplo, en la figura de ilustración, nótese que para un caudal de 250 Nm³/h y una distancia de 300 m, el diámetro recomendado es de 40 mm.

La longitud que se debe usar para proceder a usar estas tablas es la equivalente a la suma de la distancia por recorrer más la suma del total de accesorios presentes dentro de la red.

Ahorro en sistemas de aire comprimido

Un mundo de competencias y de luchas de mercado hace a cualquier industria mejorar su productividad, que podría definirse como la razón de: cantidad de recursos producidos entre el costo de su producción. Lo anterior trae a colación que es necesario disminuir costos del aire comprimido para generar mayor productividad a la planta.

¿Qué y cómo medir?

Cada de presión

Anteriormente se vio que es necesario considerar en el diseño la caída de presión; sin embargo, algunas veces las demandas crecen y se van conectando equipos nuevos a las redes, lo que incide en un aumento en la caída de presión, si dentro del diseño no se consideró una ampliación.

Asimismo, las tuberías de hierro van degradando su calidad conforme transcurren los años, esta pérdida de calidad implica un aumento de rugosidad del material y, por consiguiente, genera un aumento de la caída de presión, también los filtros dañados imprimen efecto en la caída de presión; por lo tanto, debe mantenerlos en buenas condiciones.

¿Cómo medir la caída de presión?

Hay distintos métodos, según Norgren (2009); sin embargo, el más simple y quizá el más confiable, ya que no involucra errores de cálculos, sino solo los de apreciación y los de precisión de los equipos, es el siguiente: medir la presión del depósito y posteriormente, la presión en el tramo más lejano de la tubería que se desea medir, para encontrar un diferencial de presión.

Con el valor del diferencial de presión se obtiene la pérdida de presión que equivale a ese trayecto de tubería; la importancia de lo anterior es que sirve para comparar la caída de presión recomendada contra la presente.

La caída de presión trae consigo que sea necesario aumentar la presión de operación de los compresores, con la finalidad de elevar la presión de la red para así alimentar la demanda de presión del usuario final.

Comúnmente se dice que el aumento en la presión está estrictamente relacionado con el consumo de energía y esto tiene una razón demostrable, ya que al aumentarse la presión, se deberá efectuar un mayor trabajo por parte del compresor. Como este trabajo es tomado de la red eléctrica, entonces, será conveniente que el compresor consuma más.

Según el Manual de Aire Comprimido (2010), un **aumento de 1 bar** en la presión se convierte en un **incremento de 8%** en la energía eléctrica.

Fugas

Dentro de un sistema presurizado, el control de fugas se vuelve una necesidad en vista de que una fuga provoca disminución en el volumen y, por consiguiente, demanda de aire.

Al ser el aire comprimido incoloro, hay veces en que las fugas ligeras o pequeñas no son visibles ni audibles; por lo tanto, algunas veces se dejan de lado, ya que no se ven ni se escuchan.

¿Cuánto cuesta una fuga?

Existen tablas en donde, según el diámetro del orificio y la presión a la que está la red, se determina el consumo de aire de dicha fuga, ahora bien ese valor de consumo tiene un costo y es el valor que cuesta la energía, la inversión y el mantenimiento para generar ese caudal de fugas.

La tabla siguiente muestra la forma en que se determina el caudal de fugas, según la presión de operación y el diámetro del orificio.

Tamaño del Orificio (agujero) (mm)	litros/seg – ANR (dm ³ /s)				
	2 bar	4 bar	6 bar	7 bar	8 bar
0,2	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06
0,3	0,04	0,05	0,10	0,11	0,12
0,5	0,11	0,19	0,26	0,30	0,39
1,0	0,45	0,73	1,05	1,20	1,35
1,5	1,02	1,70	2,37	2,69	3,05
2,0	1,81	3,05	4,20	4,80	5,40
3,0	4,00	6,77	9,46	10,81	12,16
4,0	7,27	12,04	16,82	19,16	21,67
5,0	11,35	18,83	26,32	30,00	33,82
6,0	16,34	27,16	37,82	43,32	48,65
8,0	29,16	48,15	67,30	76,90	86,50
10,0	43,32	75,30	105,10	120,10	135,10
15,0	102,10	169,90	236,60	269,90	304,00

Figura 29. Caudal de fuga según la presión y diámetro del orificio

Fuente: Norgren (2009).

Para agujeros totalmente redondos, este factor debe multiplicarse por 0,97, mientras que para orificios irregulares, multiplicarlo por 0,65.

La siguiente figura del fabricante Atlas Copco muestra una estimación de demanda energética con respecto al diámetro del orificio.

Hole diameter		Output flow at 7 bar working pressure	Power requirement for the compressor
Size	mm	l/s	kW
	1	1,2	0,4
	3	11,1	4,0
	5	31	10,8
	10	124	43

Figura 30. Estimación de gasto de energía según orificio de fuga.

Fuente: Atlas Copco. (2010).

Capítulo 3: Inventario de equipo conectado a la red y requerimientos de funcionamiento

La base del diseño es conocer qué usuarios y aplicaciones tendrá, por lo tanto, ésta es la primera etapa en el desarrollo del proyecto, en donde se busca conocer los equipos conectados a la red y las diferentes aplicaciones que tienen dentro del proceso productivo.

El proceso de inventario es una de las etapas más laboriosas dentro del desarrollo del proyecto, ya que es conveniente determinar el consumo de los diferentes equipos conectados a la red.

Los tipos de equipos con que cuenta la planta son los que se listan a continuación:

- Actuadores de varias magnitudes.
- Filtros colectores de polvo (filtros de mangas).
- Engrasadoras.
- Acoples
- Máquinas de ensacado.
- Sistemas de enfriamiento de bombas.
- Cañones.
- Vibradores neumáticos.
- Bombas de diafragma.
- Cañas para enfriamiento y otras aplicaciones.
- Quemadores.
- Estaciones de servicio o limpieza.
- Actuadores de válvulas de mariposa.
- Actuadores de válvulas de apertura y cierre.
- Roto básculas.
- Válvulas alveolares.
- Flautas para limpieza de sacos.

- Aerodeslizadores.

En primer lugar, se buscó información en las bases de datos que tiene la planta. Esta fue de gran ayuda para conseguir los requerimientos de algunos de los equipos conectados a la red; sin embargo, también fue importante dar recorridos por las distintas zonas de la planta para determinar la totalidad de equipos en la red, ya que la base de datos no está actualizada.

Los equipos conectados a la red en su mayoría demandan una presión no menor a 6 bar, pero algunos, como actuadores de uso aislado, requieren tres bar, por lo que es conveniente manejar una presión de red superior a seis bar que supla la demanda.

Por otro lado, para conseguir los consumos de los actuadores, fue necesario recurrir al uso de ecuaciones (ver Apéndice 1. Forma de cálculo). El consumo de las estaciones de servicio fue conseguido gracias a la medición de caudal por medio de un flujómetro; asimismo, el consumo de las flautas de la limpieza de saco y las diferentes cañas.

En el caso de los filtros de mangas, se recurrió a una ecuación para conseguir su consumo, además se utilizaron datos del informe de Quirós (2008). En el caso del filtro REDECAM, no fue necesario, pues la información del fabricante brinda su valor de consumo.

Similar pasa con los sistemas de engrase, rotobásculas, válvulas, quemador bombas de diafragma y demás equipos cuya información en la oficina técnica de Cemex.

La tabla siguiente muestra cómo está distribuida la planta según las distintas áreas de producción. Este inventario se hace respetando la distribución de la planta y su respectiva codificación, con el objetivo de dejar una base de datos actualizada:

Tabla 5. Distribución de la planta según áreas y su respectiva codificación.

Código de distribución	Área
<u>GFH 110</u>	Premezclados
<u>GFH 221</u>	Molienda de crudo molino Allis Chalmers
<u>GFH 222</u>	Molienda de crudo recuperación de crudo
<u>GFH 223</u>	Molienda de crudo envío a silos
<u>GFH 250</u>	Homo homogenización
<u>GFH 300</u>	Cocción alimentación a intercambiador
<u>GFH 301</u>	Cocción intercambiador
<u>GFH 302</u>	Cocción torre intercambiadora
<u>GFH 303</u>	Cocción horno Allis Chalmers
<u>GFH 608</u>	Sistema de quemado
<u>GFH 612</u>	
<u>GFH 304</u>	Sistema de enfriamiento
<u>GFH 370</u>	
<u>GFH 604</u>	Molienda de coque
<u>GFH 607</u>	
<u>GFH 608</u>	Combustibles alternos
<u>GFH898</u>	
<u>GFH 420</u>	<i>Clinker</i> y yeso extracción y transporte a tolvas
<u>GFH 431</u>	Molienda de cemento dosificación
<u>GFH 432</u>	Molino de cemento molino Allis Chalmers
<u>GFH 433</u>	Molienda de cemento transporte de cemento
<u>GFH 500</u>	Expedición, almacenamiento y distribución
<u>GFH 502</u>	Carga camión
<u>GFH 503</u>	
<u>GFH 501</u>	Carga granel

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Siguiendo con el proceso de inventario y conservando la división de la planta, se procedió a determinar el caudal requerido por los equipos instalados en cada área; es importante aclarar que las tablas siguientes muestran el valor de caudal unitario de cada equipo, es decir, su consumo real o necesario para operar.

En segundo orden, los nombres utilizados para los equipos corresponden mayoritariamente al de fábrica o a sus atributos físicos, estos nombres en su mayoría son tomados de la base de datos y los restantes se proponen o se toman de la información del proyecto de graduación de Quirós (2008).

Por otra parte, con respecto al tema de calidad, la calidad del aire requerida por los equipos es clase seis, los equipos que requieren clase tres son el filtro mangas Redecam y el filtro FLS Smith (los cuales tienen tratamiento de aire especial).

Finalmente, se muestra un conjunto de tablas con las características de operación de los equipos instalados en las diferentes áreas productivas:

Tabla 6. Equipos conectados a GFH 110.

Equipo	Cantidad	Caudal unitario requerido (Nm ³ /min)	Presión requerida (bar)
Empacadora mortero (Stone 787)	2,00	0,85	6,00
Pistón con carrera de 150 mm y 60 mm diámetro	1,00	0,01	6,00
Pistón con carrera de 200 mm y 100 mm diámetro	2,00	0,04	6,00
Filtro de mangas grande (Manifold: 6 1/2" diámetro x 113")	1,00	1,95	5,00-6,90
Filtro de mangas pequeño azul sobre silo (Manifold: 5,5" x 36")	1,00	0,47	5,00-6,90
Filtro de mangas trituradora secundaria (Manifold: 6,5" diámetro x 49")	1,00	0,85	5,00-6,00
Válvulas de servicio ocasional de 1/2"	5,00	2,83	3,00

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Tabla 7. Equipos conectados a GFH 221.

Equipo	Cantidad	Caudal unitario requerido (Nm ³ /min)	Presión requerida (bar)
Ventilador de molino de crudo	5,0000	2,8330	4,0000
Cañones XHV BB4 20-30	3,0000	2,2670	5,0000-7,0000
Válvulas de servicio	3,0000	2,6800	4,0000
Pistón 2 efecto 70x200	3,0000	0,0015	6,0000
Pistón 2 efecto 150x600	1,0000	0,0510	6,0000

Fuente: Oficina técnica y Quirós. (2008).

Tabla 8. Equipos conectados a GFH 222.

Equipo	Cantidad	Caudal requerido unitario (Nm ³ /min)	Presión requerida (bar)
Filtro de mangas REDECAM	1,00	2,33	3,50
Ventilador de filtro REDECAM	1,00	4,25	3,00-6,00
Tolva metálica # 1	1,00	Fuera de servicio	
Compuerta pantalón motorizada	1,00	Fuera de servicio	

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Tabla 9. Equipo conectado a GFH 223.

Equipo	Cantidad	Caudal requerido unitario (Nm ³ /min)	Presión requerida (bar)
Compuerta pantalón	1,00	0,08	6,00
Bomba Fuller 1	1,00	2,13	3,00
Bomba Fuller 2			3,00
Estación de servicio	1,00	2,83	2,75

Fuente: Oficina técnica y Quirós. (2008)

Tabla 10. Equipos conectados a GFH 250.

Equipo	Cantidad	Caudal requerido unitario (Nm³/min)	Presión requerida (bar)
Estación de servicio	4,000	2,680	3,000-7,000
Filtro mangas #1	1,000	0,954	6,000-,8000
Filtro Mangas #2	1,000	0,954	6,000-8,000
Aero y componentes de silos 1 y 2	1,000	0,850	6,000-7,000
Distribuidores de silos tipo <i>fuller</i>	1,000	0,025	6,000-7,000
<i>Bray valve serie 30</i>	42,000	0,170	3,500
<i>Bray actuador serie 90-63</i>	8,000	0,200	3,500
<i>8" butterfly valver serie 30 Bray</i>	9,000	0,300	3,500

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Tabla 11. Equipos conectados a GFH 300.

Equipo	Cantidad	Caudal requerido unitario (Nm³/min)	Presión requerida (bar)
Aero deslizado y componentes	1,000	0,004	6,000
Roto bascula harina de crudo	1,000	1,000	5,000-7,000
Filtro de mangas <i>pulse jet</i>	1,000	0,206	6,000
Aerodeslizadores	1,000	0,006	6,000
Filtro de mangas	1,000	0,206	6,000
Pistón con carrera de 300 mm y 100 mm diámetro	2,000	0,034	5,000-7,000
Válvulas de servicio ocasional 1/2"	4,000	2,830	3,000

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Tabla 12. Equipos conectados a GFH 301.

Equipo	Cantidad	Caudal requerido unitario (Nm ³ /min)	Presión requerida (bar)
Pistón con carrera de 150 mm y 60 mm diámetro	1,000	0,010	6,000-7,000
Pistón con carrera de 170 mm y 100 mm diámetro	3,000	0,020	6,000-7,000
Filtro Manga <i>Fuller</i> (Manifold: 50" x 4.5" diámetro)	1,000	0,740	6,000-7,000
Válvulas de servicio ocasional 1/2"	11,000	2,830	6,000-7,000
Ventilador torre 1/2"	1,000	4,250	6,000-7,000
Quemador del calcinador 2 x 7,6 mm orificios	2,000	1,210	6,000-7,000
Bomba de agua #1	1,000	17,000	6,000-8,000
Bomba de agua #2			

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Tabla 13. Equipo conectado a GFH 302.

Equipo	Cantidad	Caudal requerido unitario (Nm ³ /min)	Presión requerida (bar)
Cañones XHV BB4-20-30	55,000	2,267	5,000-7,000
Cañones XHV BB4-12-28	4,000	2,267	5,000-7,000
Cañones Airchoc AC2 HT	0,000	2,267	5,000-7,000
Estación de servicio	11,000	3,700	3,000-7,000
Cañas	3,000	2,125	3,000-7,000
Válvula guillotina	1,000	0,011	5,000-8,000
Actuador carrera 50mm diámetro 40mm	3,000	0,006	5,000-7,000
Pistón con carrera de 150 mm y 60 mm diámetro	1,000	0,004	5,000-7,000
Calcinador tipo tubular <i>fuller</i>	3,000	1,208	6,000

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Tabla 14. Equipo conectado a GFH 303.

Equipo	Cantidad	Caudal requerido unitario (Nm ³ /min)	Presión requerida (bar)
Horno Allis Chalmers (estaciones de servicio)	3,00	2,68	3,00-7,00
Engrase	1,00	0,29	2,00
Acople neumático	1,00	0,10	6,00

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Tabla 15. Equipo conectado a GFH 608.

Equipo	Cantidad	Caudal requerido unitario (Nm ³ /min)	Presión requerida (bar)
General de combustibles alternos	1,00	2,83	5,00-7,00

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Tabla 16. Equipo conectado a GFH 304.

Equipo	Cantidad	Caudal requerido unitario (Nm ³ /min)	Presión requerida (bar)
Engrase centralizado	1,0000	0,2900	3,0000
Válvula evacuación de finos	1,0000	0,0500	5,0000-7,0000
Filtro enfriador FLS Smith	1,0000	0,8400	5,000-7,000
Pistón con carrera de 200 mm y 70 mm diámetro	10,0000	0,0006	6,0000
Pistón con carrera de 650 mm y 200 mm diámetro	1,0000	0,2124	6,0000
1 Válvulas de servicio ocasional 1/2"	1,0000	2,8300	6,0000

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Tabla 17. Equipo conectado a GFH 370.

Equipo	Cantidad	Caudal requerido unitario (Nm ³ /min)	Presión requerida (bar)
Pistón diámetro 40mm; carrera 400	2,0000	0,0004	6,0000
Pistón diámetro 30mm; carrera 200	1,0000	0,0001	6,0000
Filtro nave <i>clinker</i> 64mangas	1,0000	0,8789	6,0000
Filtro sobre silo <i>clinker</i>	1,0000	0,7368	6,0000

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Tabla 18. Equipo conectado a GFH 604.

Equipo	Cantidad	Caudal requerido unitario (Nm ³ /min)	Presión requerida (bar)
Válvula neumática salida 3	1,0000	0,0004	6,0000
Válvula neumática pretolva3	1,0000	0,0004	6,0000
Roto bascula pfister #3	1,0000	0,5000	6,0000

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Tabla 19. Equipo conectado a GFH 605.

Equipo	Cantidad	Caudal requerido unitario (Nm ³ /min)	Presión requerida (bar)
Compuerta doble	1,000	0,010	6,000
Compuerta neumática de entrada	1,000	0,000	6,000
Filtro de mangas principal	1,000	6,293	5,000-7,000
Filtro de mangas tolva de 95 ton	2,000	2,972	5,000-7,000
Válvula neumática de salida proveedor	1,000	0,006	6,000
Válvula alveolar salida weschle	1,000	0,740	6,000
Pre tolva N1 alimentación calcinador	1,000	0,533	6,000
Válvula neumática salida <i>pfister</i>	1,000	0,006	6,000
Válvula alveolar salida	1,000	0,740	6,000
Flauta <i>coke</i>	1,000	1,417	6,000
Pre tolva N2 alimentación horno <i>pfister</i>	1000	0,533	6,000

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Tabla 20. Equipo conectado a GFH 420.

Equipo	Cantidad	Caudal requerido unitario (Nm ³ /min)	Presión requerida (bar)
Filtro de mangas 120 5,25x11	1,000	1,0320	5,000-8,000
Tolva pantalón	1,000	0,000	6,000
Filtro de mangas 288 5,25x11	1,000	1,858	6,0000

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Tabla 21. Equipo conectado a GFH 431.

Tolva de	Equipo	Cantidad	Caudal requerido unitario (Nm ³ /min)	Presión requerida (bar)
Yeso	Cañón Martin XHV 12-18	2,00	2,27	5,00-7,00
	Vibrador neumático navco	1,00	0,99	5,00-7,00
Agregados	Cañón Martin XHV 12-18	1,00	2,27	5,00-7,00
	Cañón Martin XHV 20-30	4,00	2,27	5,00-7,00
	Vibrador neumático navco	1,00	0,99	5,00-7,00
Caliza	Cañón Martin XHV 20-30	1,00	2,27	5,00-7,00

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Tabla 22. Equipo conectado a GFH 432.

Equipo	Cantidad	Caudal requerido unitario (Nm ³ /min)	Presión requerida (bar)
Molino Allis Chalmers	7,000	2,830	3,000-6, 000
Engrase piñón corona	1,000	0,285	6,000
Filtro auxiliar de mangas	1,000	1,372	6,000
Filtro <i>plenum pulse</i> 1280 mangas5x1	1,000	4,096	6,000

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Tabla 23. Equipo conectado a GFH 433.

Equipo	Cantidad	Caudal requerido unitario (Nm ³ /min)	Presión requerida (bar)
Bomba <i>fuller</i>	2,000	2,830	2,000-4,000

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Tabla 24. Equipo conectado a GFH 500.

Equipo	Cantidad	Caudal requerido unitario (Nm ³ /min)	Presión requerida (bar)
Filtro mangas 96 6,25x1,,	1,000	1,843	5,000-7,000
Filtro mangas sobre silos 72mangas	1,000	1,843	5,000-7,000

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Tabla 25. Equipo conectado a GFH 502.

Equipo	Cantidad	Caudal requerido unitario (Nm ³ /min)	Presión requerida (bar)
Máquina ensacadora	1,000	1,584	6,000
Limpia sacos	1,000	7,083	4,000
Desviadora de sacos	1,000	0,001	6,000
Filtro de mangas	1,000	0,445	6,000

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Tabla 26. Equipo conectado a GFH 503.

Equipo	Cantidad	Caudal requerido unitario (Nm³/min)	Presión requerida (bar)
Máquina ensacadora 2	1,0000	1,5840	6,0000
Desviadora de sacos	1,0000	0,0007	6,0000
Filtro de mangas N2 128 mangas	1,0000	0,2060	6,0000-7,0000
Desviador de sacos N2	1,0000	0,0007	6,0000
Desviador de sacos N3	1,0000	0,0007	6,0000

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Tabla 27. Equipo conectado a GFH 501.

Equipo	Cantidad	Caudal requerido unitario (Nm³/min)	Presión requerida (bar)
Pistón dia 30 stroke 600	4,0000	0,0005	6,0000
Pistón dia 30 stroke 300	2,0000	0,0001	6,0000
Filtro 48 mangas 6,25x110,25	1,0000	0,2060	6,0000-7,0000

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Capítulo 4: Evaluación de la condición de la tubería principal

La red de aire comprimido posee distintos tipos de diámetros de tuberías y conexiones; sin embargo, para el presente proyecto se procedió a analizar la principal con el objetivo de conseguir:

- El valor de la caída de presión.
- La cantidad de fugas que presenta.

Caída de presión

Para conseguir el valor de la caída de presión, se realizó el siguiente procedimiento experimental:

- Pedir a sala que se pusiera en operación a plena carga los compresores que suplen la demanda del sistema.
- Medir con la ayuda de un manómetro la presión en distintos puntos:
 - a. Acumuladores.
 - b. Salida de los acumuladores, directamente.
 - c. Tramos varios del recorrido de la red.
 - d. Punto más distante de la red.
- Comparar el valor de la presión en los acumuladores con la presión en los distintos puntos de operación

Fugas

Para determinar la cantidad de fugas presentes en la red principal, se acogió el uso de agua jabonosa y también un detector ultrasónico, para así descartar cualquier clase de dudas concernientes a la presencia o no de fugas; el principal enfoque para determinarlas se dio en las uniones, mas esto no quiere decir que se dejó de lado la totalidad del recorrido.

Resultados de detección de fugas

Como se describió en el párrafo anterior, se hizo un recorrido general a la tubería principal inspeccionando cada tramo, con el objetivo de conseguir la cantidad de fugas con que cuenta la red principal.

La técnica de ultrasonido se complementó con el agua jabonosa en las uniones y algunos tramos en los que se tenía duda en cuanto a presencia de fugas, con el objetivo de dar una mayor veracidad a los datos determinados.

En la figura adjunta se puede apreciar la aplicación del detector ultrasónico, en una junta soldada, es importante que se aprecien las medidas de seguridad y el grado de complejidad de la operación mostrada.



Figura 31. Detección de fugas en unión soldada con ultrasonido

Fuente: Tomada por el autor. (2014).

A continuación se muestra la aplicación de agua jabonosa a la misma junta, con el objeto de comprobar la técnica de ultrasonido.



Figura 32. Aplicación de agua jabonosa a unión soldada

Fuente: Tomada por el autor

El resultado de las técnicas de inspección mostradas fue que la tubería principal, si bien en la mayoría de su trazado presenta corrosión, presenta ausencia de fugas.

Las fugas que se contabilizan están localizadas en las válvulas de compuerta a la salida del acumulador de la sala # 2 de compresores y en la válvula de compuerta de llegada a la parte de cemento.

Para una presión de operación de seis bar; asumida conservadoramente para la estimación del caudal de estas fugas, con un orificio no mayor de cuatro mm de diámetro, se determina un caudal de fugas según la Figura 33 de $0,3689 \text{ Nm}^3/\text{min}$ por cada orificio, respectivamente, sumando un total de $0,7378 \text{ Nm}^3/\text{min}$.

Resultados de muestreo de caída de presión

A continuación se muestra una tabla en donde se exponen las mediciones tomadas en diferentes puntos así como en el punto más distante de la sala de compresores el cual claramente presenta la mayor caída de presión⁴.

Tabla 28. Mediciones de caída de presión.

Punto	Presión manométrica (bar)
Acumulador junto a crudo	(6,90 +/- 0,05)
Acumulador junto a nave clinker	(6,60 +/- 0,05)
Frente a enfriador	(6,80 +/- 0,05)
Toma localizada junto a tolva yeso	(6,60 +/- 0,05)
Acumulador en silo de cemento	(6,60 +/- 0,05)

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Un punto importante dentro de lo que ilustra la tabla anterior es que la caída de presión entre los compresores y el acumulador de la sala # 2⁵ es elevada, situación que alerta sobre un exceso de caída de presión, en vista de que la de operación de los compresores no es menor a 6,8 bar.

Continuando con la descripción de las caídas de presión, se puede apreciar que desde la sala de compresores #1 hasta el punto más alejado, es de 5,7%, valor que está por encima de lo recomendado por Royo (1977), el cual indica que para redes grandes, la caída de presión permisible es de 3%.

⁴ Mayor caída de presión de la tubería principal

⁵ Sala de compresores #2, contiguo a nave de Clinker (ver planos).

Capítulo 5: Diseño de la nueva tubería principal

Consideraciones iniciales

El recorrido de la red de aire comprimido comprende un trazado superior a 1 km de tuberías⁶. La principal abarca casi la totalidad de la planta, con una longitud total de más de 500 m. Esta, inicialmente, comprendía una única tubería y un solo cuarto de compresores; sin embargo, debido al crecimiento que ha experimentado la planta, se insertó una nueva de sala de compresores instalada a una distancia considerable.

Con la instalación de esta nueva sala, los ingenieros responsables agregaron dos tuberías paralelas (en un tramo de la ruta principal), usadas como principales, que a su vez conectan ambas salas de compresores en dos puntos de convergencia, esto, con el propósito de mitigar la caída de presión de los puntos más alejados.

La red de aire comprimido se maneja por medio de cinco compresores distribuidos en las dos salas mencionadas, la capacidad de generación de este grupo de compresores se muestra en la tabla a continuación:

Tabla 29. Compresores disponibles.

Marca	Potencia (kW)	Tipo	Capacidad Nm ³ /min	Ubicación
Sullair	223,80	TS 32s 300	43,53	Cuarto # 2
Sullair	223,80	TS 32s 300	43,53	Cuarto # 2
Sullair	111,90	LS 20 150	17,7	Cuarto # 2
Sullair	298,40	TS32S 400	55,58	Cuarto # 1
Kaeser	335,70	FSD 450	52,41	Cuarto # 1

Fuente: Oficina técnica Cemex. (2014).

Por otro lado, en la planta se tiene programado construir una nueva línea de molienda de cemento, dicha construcción hace que este proyecto se oriente hacia

⁶ Tubería: principal, secundaria y de servicio.

el futuro y se proponga mover los compresores de la sala #2, para que sean repartidos así:

- a) Enviar un compresor Sullair TS 32S 300 hacia la sala de compresores #1.
- b) Los otros dos compresores enviarlos hacia una nueva sala (por la parte de molienda de cemento).

Lo anterior, con el objetivo de abastecer la demanda de aire desde el cuarto de compresores #1, mientras que si la capacidad de aire producida desde esta sala no satisface en un determinado momento, producto de la expansión o la convergencia de múltiples eventos, los compresores de la nueva sala ubicada en cemento entrarían a trabajar y suplirían el aire demandado por la parte de cemento, brindando así estabilidad al servicio de aire requerido por la planta.

Bajo otro contexto, se acoge diseñar dos propuestas, la razón de las presentes propuestas es evaluar los costos de instalación que determinarán finalmente cuál de es la más eficiente.

A continuación se muestra un boceto y descripción de las propuestas planteadas:

- **Propuesta # 1:** Diseñar una red principal de aire con una única tubería que atraviese la totalidad de la planta y desemboque en el acumulador contiguo al almacén de Clinker; después, llevar una tubería que comunique la sala de compresores #2.

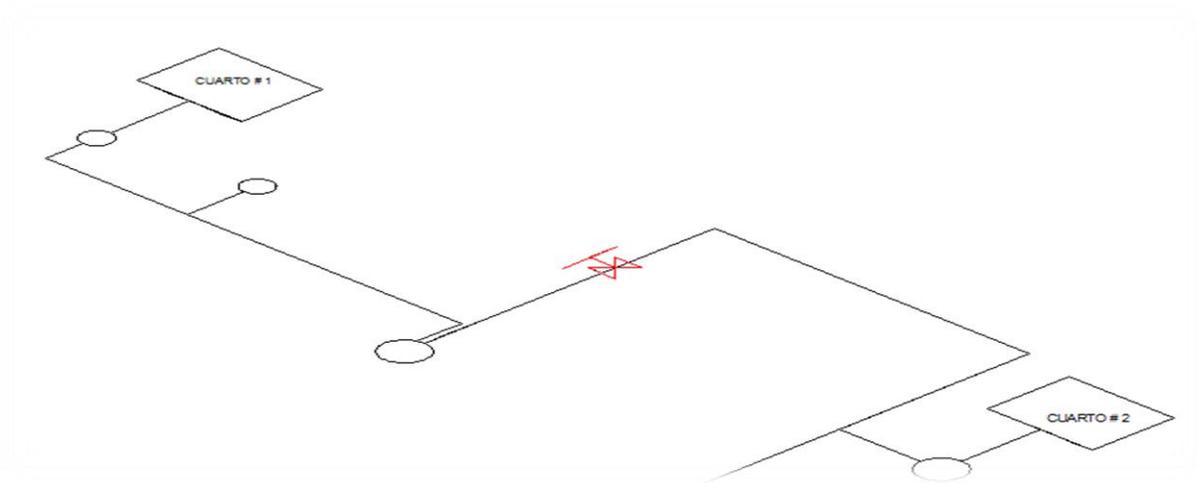


Figura 33. Propuesta de diseño # 1.

Fuente: Elaboración propia. (2014).

- **Propuesta # 2:** Diseñar una red con dos tuberías paralelas desde la sala de compresores #1 hasta el acumulador junto al almacén de Clinker.

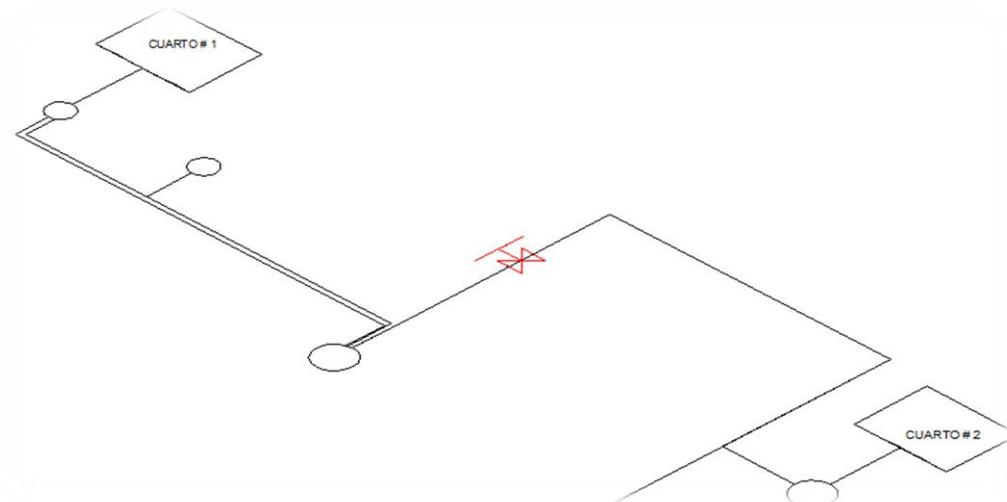


Figura 34. Propuesta de diseño # 2.

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Caudal de diseño para la red de aire comprimido:

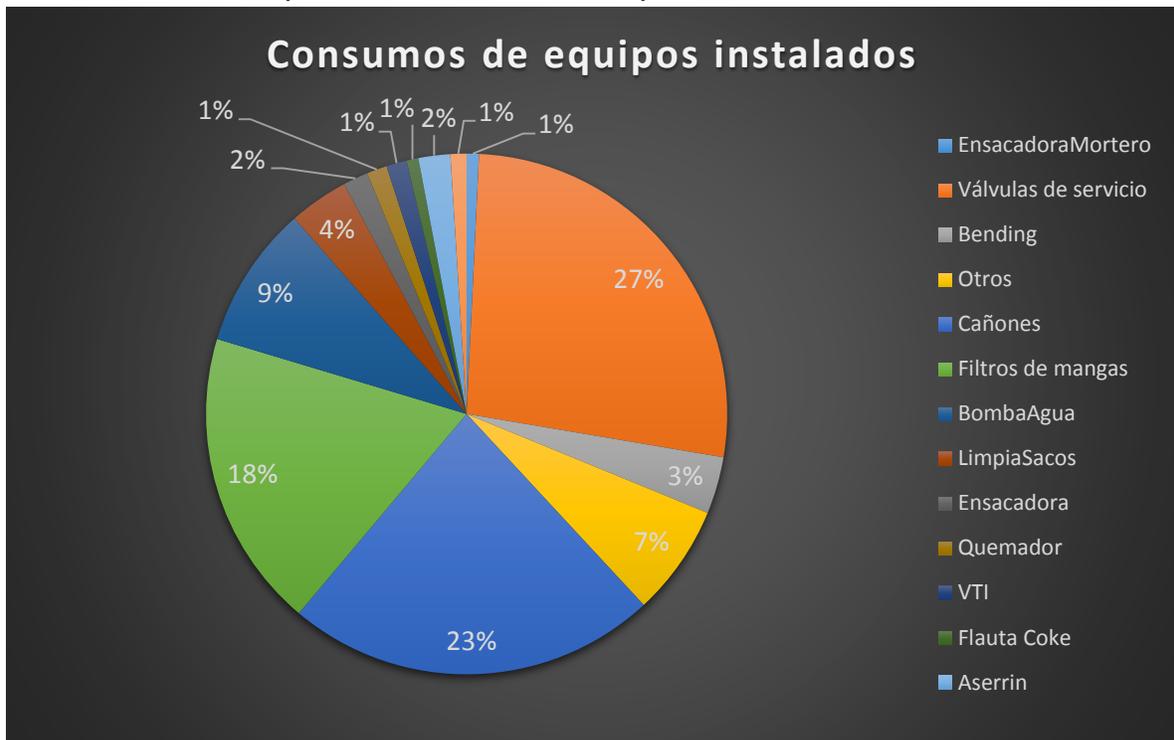


Figura 35. Caudal de diseño de equipos conectados.

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Según la investigación realizada a los equipos conectados a la red, se procedió a determinar el caudal de diseño requerido; para ello, se analiza el evento ilustrado en la Figura 35, en donde se aprecia que si se consideran las estaciones de servicio como una máquina, el valor total del caudal de diseño estará supeditado a una magnitud elevada.

Ahora bien, considerando la planta globalmente, agrupando equipos y dando valores de simultaneidad a los respectivos grupos, se consigue un valor de caudal de diseño global de 215,14 Nm³/min, sin contemplar factor de fugas ni ampliaciones. La propuesta es ubicar dos salas de compresores y que la sala #1, si las circunstancias lo permiten, abastezca la planta o que la sala # 2 supla la necesidad de la parte de cemento y envase de forma aislada; por lo anterior, se propone lo que se explica a continuación.

Considerar un caudal de diseño que comprenda todas las áreas exceptuando la parte de molienda de cemento, envase y carga a camión, con ello se determina un caudal de diseño de la tubería que atraviesa desde la sala de compresores #1 hasta llegar frente al almacén de Clinker⁷.

Para calcular este caudal de diseño, se consideró globalmente el equipo conectado en este tramo de la red. Se agruparon equipos según la condición de operación y el consumo requerido, para así determinar los coeficientes de simultaneidad para cada grupo; el valor del caudal determinado es de 130,43 Nm³/min, dejando de lado el factor de ampliaciones y fugas; una vez que se consideran dichos factores, el caudal de diseño es de 152,80 Nm³/min.

Sin embargo como se describió, se propone movilizar un compresor Sullair TS 32 de 300 caballos hacia una sala y centralizar la producción, dicha movilización implica que el caudal de diseño de un tramo considerable se amplíe a la capacidad máxima de los tres compresores que estarán dentro del cuarto número 1.

Por lo tanto, debido a que los compresores que se encapsularan en el cuarto #1 tienen la capacidad de producir 156,69 Nm³/min, se acoge este caudal para el diseño de dicho tramo. En cuanto a los restantes tramos, se fue restando el caudal necesario que consumen las diferentes derivaciones de la tubería principal, aplicando los factores de fugas y ampliaciones.

Por último, desde Clinker hasta la parte de cemento, se considera el caudal requerido por la parte de cemento, alcanzando así un valor de caudal de diseño de 35 Nm³/min.

⁷ Ver planos.

Selección de diámetros

Inicialmente, la planta no tiene planos de las tuberías de aire comprimido, por lo que una de las tareas de mayor consumo de tiempo fue determinar medidas y analizar detalles del recorrido que se plantea y así dar marcha al diseño de la nueva tubería.

Para el diseño propuesto, se decidió utilizar la ecuación cinco y así calcular el diámetro de diseño, además se aplicó el uso de nomogramas y *software* de selección de tuberías del fabricante Parker. Asimismo, se propone en los apéndices una demostración para comprobar la efectividad de los datos brindados por el *software*.

Propuesta # 1

Como se aprecia en la Tabla 30, los diámetros seleccionados para el recorrido de la tubería principal son desde 152 mm hasta los 76 mm, en el caso de la de hierro, lo importante del diseño que se promueve es que se consigue una caída de presión en el punto más alejado de la tubería principal de 0,14 bar, valor que porcentualmente a una presión de operación de siete bar equivale a 2,14% de caída de presión.

Tabla 30. Selección de diámetros de tubería principal.

Tramo	Caudal de diseño (Nm ³ /min)	Longitud real (m)	Longitud equivalente accesorios (m)	Diámetro teórico (mm)	Diámetro real (mm)	β	ΔP (bar)
A-B	156,69	54,00	3,60	147,42	152,00	0,75	0,02
B-C	145,59	15,70	15,00	126,50	152,00	0,76	0,04
C-D	134,39	12,00	8,00	112,72	152,00	0,78	0,02
D-E	59,64	30,00	5,00	93,34	152,00	0,85	0,01
E-F	54,44	104,38	8,00	113,96	152,00	0,86	0,02
F-G	35,00	263,00	4,80	115,13	152,00	0,95	0,02
G-H	25,00	47,00	12,00	73,79	100,00	1,03	0,02

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Por otro lado, con el uso de nomogramas y el *software*, se llega al mismo valor, lo que comprueba el cálculo realizado; nótese las figuras siguientes en donde se muestra la forma de selección por medio de nomogramas.

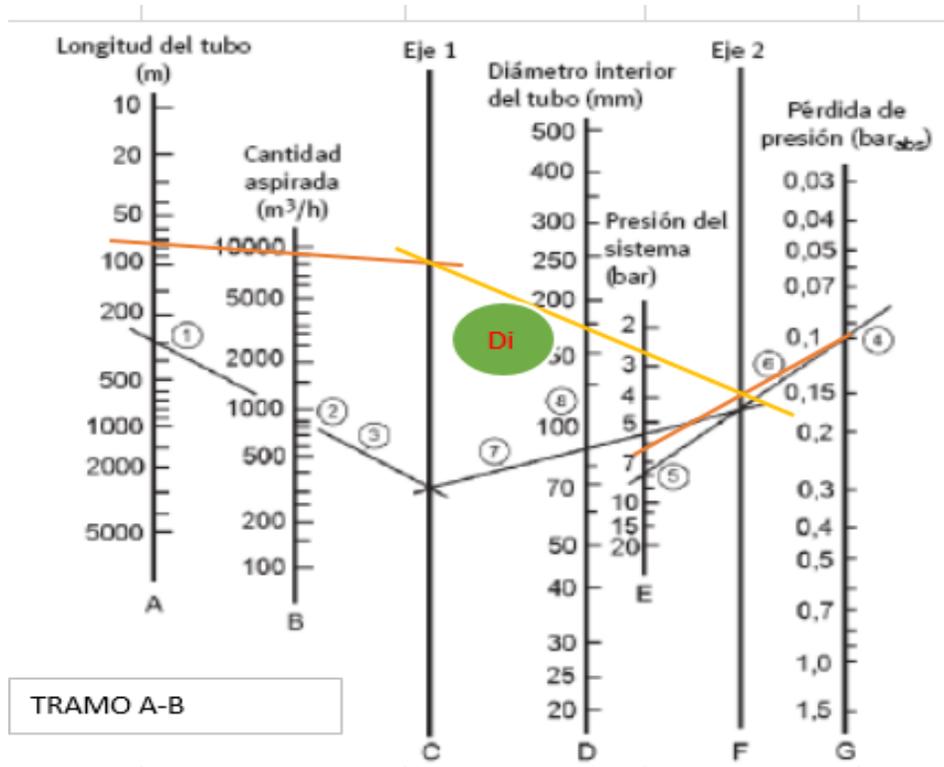


Figura 36. Selección de diámetro de tramo A-B por nomograma.

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Por otra parte, en el diseño con tubería de aluminio usando el *software*, se llega a los datos mostrados en las figuras a continuación (los restantes tramos calculados mediante el *software*, se pueden consultar en los apéndices).

A su vez, vale destacar que la suma del total de caída de presión de este conjunto propuesto equivale a 0,18 bar, que porcentualmente es igual a 2,57%.

Fecha 02/10/2014

Nombre del proyecto PG José Miguel Bonilla Gutiérrez

Datos del proyecto

Gas	Aire comprimido
Presión	7 bar(g)
Caudal	156.89 Nm ³ /Min
Longitud	57.6 m
Red	Línea recta
Diámetro Transair®	168 mm
Velocidad del gas	16.2 m/s



Pérdida de carga

Tubo Transair®  0.06 bar(g)

Figura 37. Calculo de diámetro con software de fabricante para tramo A-B

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Tabla 31. Resumen de diámetros escogidos con tubería de aluminio

Tramo	Caudal de diseño (Nm ³ /min)	Diámetro <i>transair</i> (mm)	Longitud eq accesorios (m)	ΔP (bar)
A-B	156,69	150,00	57,60	0,06
B-C	145,59	150,00	30,70	0,03
C-D	134,39	150,00	20,00	0,02
D-E	59,64	150,00	35,00	0,01
E-F	54,44	150,00	112,38	0,02
F-G	35,00	150,00	267,80	0,02
G-H	25,00	100,00	59,00	0,02
			TOTAL	0,18

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Propuesta # 2

Según la evaluación desarrollada con las fórmulas se consigue lo siguiente:

Tabla 32. Resumen de selección de diámetros propuesta # 2.

Tramo	Caudal de diseño (Nm ³ /min)	Longitud (m)	Leq accesorios(m)	Diámetro teórico (mm)	Diámetro real (mm)	β	ΔP (bar)
A-B	78,35	54,00	3,60	114,07	152,00	0,75	0,02
B-C	72,80	15,70	24,00	103,05	152,00	0,76	0,01
C-D	67,19	12,00	17,00	93,95	100,00	0,78	0,07
D-E	29,82	30,00	14,00	75,61	100,00	0,85	0,02
E-F	27,22	104,38	8,00	88,18	100,00	0,86	0,05
F-G	35,00	263,00	14,80	115,97	152,00	0,95	0,03
G-H	25,00	35,00	12,00	90,66	100,00	1,03	0,02

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Con tubería de hierro si se disminuyen los diámetros se alcanzaría una caída de presión de 3% valor muy ajustado a la recomendación de (Royo, 1977).

Fecha 02/10/2014

Nombre del proyecto PG José Miguel Bonilla Gutiérrez

Datos del proyecto

Gas	Aire comprimido
Presión	7 bar(g)
Caudal	78.35 Nm ³ /Min
Longitud	57.6 m
Red	Línea recta
Diámetro Transair®	100 mm
Velocidad del gas	22.3 m/s



Pérdida de carga

Tubo Transair®  0.20 bar(g)

Figura 38. Selección de diámetros con propuesta #2.

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Comparación de propuestas:

La propuesta #1 aventaja a la #2 porque se consigue un coste de instalación menor, ya que en el caso de la segunda, a fin de lograr valores de caída de presión permisibles según las reglas de diseño, hay que utilizar al menos el diámetro de una de las tuberías paralelas igual al diámetro de la propuesta # 1.

Ahora bien, si se compara la razón de caída de presión, se nota que la opción #2 es una alternativa que no vendría a superar la efectividad de la alternativa #1, por lo que se opta por no darle más importancia al diseño de la segunda propuesta.

Por último, la virtud de la propuesta #2 está en que si en algún momento se quisiera dar una expansión futura, no habría inconveniente en instaurar una tubería paralela que sufrague la necesidad futura.

Diseños adicionales

Seguidamente, como se conoce el caudal requerido por las diferentes áreas, dentro del presente proyecto, se propone diseñar algunas tuberías secundarias y de servicio, las cuales se muestran a continuación:

Tubería de torre nueva

Esta lleva el aire comprimido a través de los distintos pisos de los ciclones de la torre intercambiadora; a esta tubería están conectados los cañones de la torre y los actuadores necesarios para el proceso de operación. También tiene llaves conectadas que se utilizan para labores de mantenimiento en paros programados, asimismo, tienen procesos de limpieza con aire.

Tabla 33. Diseño de tubería de torre.

Tramo	Caudal de diseño (Nm ³ /min)	Longitud equivalente (m)	Diámetro teórico (mm)	Diámetro real (mm)	β	ΔP (bar)
T1-T2	33,05	22,00	66,53	76,00	0,95	0,05
T2-T3	29,18	15,25	62,93	76,00	0,92	0,04
T3-T4	18,15	24,00	57,81	76,00	1,05	0,03
T4-T5	15,46	17,75	51,29	76,00	1,06	0,01

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Fecha 04/10/2014

Nombre del proyecto PG José Miguel Bonilla Gutiérrez

Datos del proyecto

Gas	Aire comprimido
Presión	7 bar(g)
Caudal	29.18 Nm ³ /Min
Longitud	15.25 m
Red	Línea recta
Diámetro Transair®	76 mm
Velocidad del gas	15.0 m/s



Pérdida de carga

Tubo Transair®  0.04 bar(g)

Figura 39. Diseño de tubería para tramo T2-T3

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Tramo desde válvula de compuerta hasta acumuladores frente a VTI

Este trayecto es una tubería secundaria que conecta la tubería principal con dos acumuladores y sirve de paso para las tuberías de servicio hacia torre.

Tabla 34. Diseño de tramo que comunica dos acumuladores frente a VTI

Tramo	Caudal de diseño (Nm ³ /min)	Longitud (m)	Diámetro teórico (mm)	Diámetro Real (mm)	β	ΔP (bar)
1'-2'	67,48	4,00	65,67	76,00	0,85	0,05
3'-4'	47,08	13,00	72,76	76,00	0,92	0,08

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Selección de accesorios

La tubería de aluminio Transair es diseñada para soportar una temperatura máxima ambiental de 60°C, valor que debe ser considerado, ya que dentro del proceso existen zonas de convección extrema.

Según lo anterior, en el recorrido de la tubería principal se procedió a hacer una inspección con un termómetro láser para valorar la condición térmica que sufre el puente de tuberías actual y, así, determinar la temperatura que alcanza la red de tuberías cercana al horno.

De lo anterior se consigue un diferencial de temperaturas que sirve para determinar el efecto de dilatación y contracción que sufrirá la red; la fórmula utilizada es la dada por el fabricante de tuberías (obsérvese en los apéndices el procedimiento de cálculo).

Finalmente, se hace un comentario acerca de los diferentes accesorios que se contemplan en el diseño nuevo y la razón de por qué se consideran.

Derivaciones

Para prevenir una futura expansión, se acoge instalar seis salidas a 100mm, por lo que será necesario insertar en la ruta de la tubería principal, accesorios T con reducción, las restantes salidas serán diseñadas con salidas a 50mm, ya que son vitales para las tuberías con que cuenta el presente proyecto.

Soportes

La cantidad de soportes necesarios están en función de la totalidad de tubería por instalar; por cada tubo que se compre deben instalarse dos, al principio y al final.

Codos

Será necesario instalar dentro del recorrido de la tubería principal dos codos de 45° y algunos otros de 90° para cambio de dirección.

Juntas de expansión

Debido al efecto térmico, es conveniente instalar juntas de expansión en el recorrido de la tubería para prevenir solturas o deformaciones, la totalidad de juntas por instalar son 16, a nivel espacial se decide colocarlas cada cinco tubos.

Uniones

Por cada codo, cada pareja de tubo y brida es necesario instaurar el *kit* de uniones.

Bridas

Considerando que se deben instalar juntas de expansión y que la unión de tuberías con los tanques de almacenamiento es por bridas, se deberán instalar; asimismo, como la propuesta es mutar aluminio con hierro, compete usarlas.

Válvulas

Dentro del diseño se promueve instalar tres válvulas de compuerta para impedir el paso de aire o habilitarlo, la escogencia de dónde instalarlas se hace para que la red opere con solo la sala de compresores 1, si las condiciones lo permiten, por lo que se apaga el suministro de la sala 2 y se da paso al aire proveniente de la 1.

Bajantes

La mayoría de las salidas hacia las tuberías secundarias son menores o iguales a 50mm, por lo que se propone instalar aparte de las salidas ya establecidas, bajantes extra con miras hacia el futuro.

Dentro de estos mismos bajantes, antes de algunas juntas de expansión, se propone colocar purgas de aire.

Resumen

Por último, para construir la tubería principal, se necesitarán los siguientes materiales, a partir de la propuesta #1.

Tabla 35. Lista de materiales necesarios para tubería principal.

Diámetro (mm)	T	Codo 90°	Codo 45°	Junta expansión	Válvula compuerta	Tubos	soportes	Derivaciones 50 (mm)	Derivaciones a 38 (mm)
152,00	6,00	5,00	5,00	14,00	3,00	80,00	160,00	7,00	22,00
100,00	2,00	5,00	2,00	2,00	2,00	9,00	18,00	4,00	8,00

Fuente: Elaboración propia. (2014).

En el caso de la tubería que comunica la torre, existe el inconveniente de que la Transair no está capacitada para este contexto operacional, ya que el nivel de temperatura en algunos tramos asciende los 373,15 K.

Asimismo, durante el desarrollo del presente proyecto, ya en un periodo muy avanzado, se recibió visita de un proveedor de la planta Cemex que vende tubería de aluminio del fabricante Equofluids, dicha tubería presenta una capacidad de soportar más temperatura, puntualmente 373,15 K. Esta capacidad está por encima de la del fabricante Parker, sin embargo, debido a la condición térmica tan severa de algunos tramos a nivel general, se descarta el material aluminio para este trayecto de tuberías.

Capítulo 6: Oportunidades de conservación de la energía (OCE)

Dentro de un sistema de aire comprimido con la potencia que se dispone en Cemex, es casi una obligación buscar oportunidades de mejora que impulsen el ahorro energético y, por consiguiente, monetario; por lo tanto, se proponen las siguientes modificaciones e ideas de mejora.

1. Modificación de sistema de enfriamiento de virola del horno y chumaceras.

En primer lugar, para describir esta OCE, se debe explicar por qué se utilizan las cañas de aire: para proteger la virola de problemas de deformación térmica. La función de las cañas es aplicar un golpe de aire que acelera el enfriamiento, el uso de estas no es constante, sino que depende de si la temperatura exterior de la virola alcanza 623,15 K.

Seguidamente, como las cañas son manufacturadas artesanalmente, el valor de aire que consumen una vez que entran en operación es desconocido por lo que, mediante un flujómetro, se midió su consumo cuyo resultado es 4,25 Nm³/min, dicho consumo es elevado, ya que algunas veces se multiplica por cuatro cañas.

Por otro lado, se tienen sensores de temperatura colocados en las chumaceras de los macizos del horno y en algunos ventiladores, con la intención de que brinden alerta de elevación de temperatura y, así, impedir que la temperatura en las chumaceras supere 363,15 K. Si esta alcanza este límite se abre llave a las mangueras de enfriamiento; el consumo de cada manguera se midió, sin embargo, está sujeto a restricciones, ya que la regulación depende del porcentaje de apertura de la válvula de bola.

Para las mediciones realizadas se solicitó ayuda al encargado del sistema para que abriera las válvulas a la condición que habitualmente operan, dando como consumo requerido 2,83 Nm³/min.

Ahora bien, estimar cuánto aire se gasta por este concepto se vuelve complejo, sin embargo, durante el proceso de desarrollo de este proyecto se dio seguimiento a los sistemas de enfriamiento y se determinaron equipos que los utilizan de forma permanente. A continuación se muestra una foto de las mangueras mencionadas:



Figura 40. Operación de mangueras de enfriamiento.

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Por lo anterior, se propone sustituir el sistema de cañas y mangueras por otro moderno llamado cuchillas de aire, cuya función es reducir el consumo de aire y brindar una mayor eficiencia en el enfriamiento. Con esta sustitución se logra saber cuánto caudal estará consumiendo cada cuchilla de aire, también se aumenta el rendimiento del enfriamiento y se pueden alcanzar reducciones de consumo del orden de 43%. Obsérvese la Tabla 36 mostrada a continuación, en donde se muestra el cálculo hecho para los equipos que están con enfriamiento de forma perpetua.

Asimismo, se muestra una fotografía del equipo propuesto, de la tabla que se muestra se puede determinar que con solo instalar este sistema en los equipos de uso perpetuo, se logran ahorros diarios de energía de 334,94 kWh. Obsérvese que conservadoramente, el porcentaje de ahorro es inferior al propuesto en el párrafo anterior.

Tabla 36. Cálculo de ahorros al modificar el sistema nuevo.

Equipo	Numero mangueras	Caudal con mangueras (Nm ³ /min)	Caudal con Cuchillas (Nm ³ /min)	Ahorro (Nm ³ /min)	Ahorro energético (kWh/día)
VTI	3,00	4,25	2,94	1,31	200,98
Enfriador	2,00	2,83	1,96	0,87	133,99
Total		7,08	4,90	2,18	334,97

Fuente: Elaboración propia. (2014).



Figura 41. Sistema moderno de cuchillas de aire.

Fuente: Exair. (2014).

2. Potenciar la detección de fugas

Debido a la operación de la planta, la mayoría de las fugas de aire son difíciles de determinar, principalmente las localizadas en el sector de la torre intercambiadora, por lo que se propone capacitar al personal para realizar rutinas de inspección con ayuda de un detector ultrasónico en un plazo semanal. Asimismo, se propone que el personal de producción haga inspecciones autónomas, con la finalidad de potenciar la detección de fugas.

La capacitación que se propone debe ser orientada al campo en donde se expongan las virtudes de la técnica de ultrasonido. También se diseña una hoja en donde el mecánico de turno pueda dar las cualidades de la fuga determinada y la localización.

El ahorro que se puede conseguir con esta OCE es elevado, ya que luego de una inspección realizada para detectar fugas sólo en el sector de la torre, se determinó un caudal superior a $4 \text{ Nm}^3/\text{min}$, equivalentes a $613,69 \text{ kWh/día}$.



Figura 42. Fugas detectadas en la torre con detector ultrasónico

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Capítulo 7: Estudio económico

Costo del aire comprimido para Cemex

En primer lugar, para hacer un estudio económico se debe saber que está sucediendo con la red de aire comprimido actual.

Desde la perspectiva operativa, cuando se abre una válvula para limpieza, estación de servicio o cuando se conecta una flauta de aire para enfriamiento, dicha acción repercute ampliamente en la producción de aire.

Por lo anterior, según muchos autores, el costo de aire comprimido oscila en alrededor de 70% en energía y el porcentaje restante es repartido en la inversión y mantenimiento, bajo este contexto se propone hacer un análisis del valor del aire dividido en estos costos, para determinar cómo está distribuido el costo del aire comprimido para CEMEX.

Costo de energía

Primeramente, como en el cuarto de control se puede observar la corriente consumida por los compresores Sullair, se decide hacer un muestreo en días de diferentes semanas a los datos de corriente, para hacer un análisis estadístico y calcular un valor ponderado de corriente de operación y tiempo de operación.

La ecuación que se usa para determinar el consumo de potencia trifásica es:

$$P = \frac{\sqrt{3} * V * I * fp}{n}$$

Donde:

P es potencia en vatios.

V: Voltaje (V).

I: Corriente (A).

fp: Factor de potencia.

η : eficiencia.

A continuación, con la intención de ejemplificar, se muestra la curva de corrientes de donde se extraen los valores de la tabla de un muestreo diario realizado a los compresores para determinar el consumo demandado.

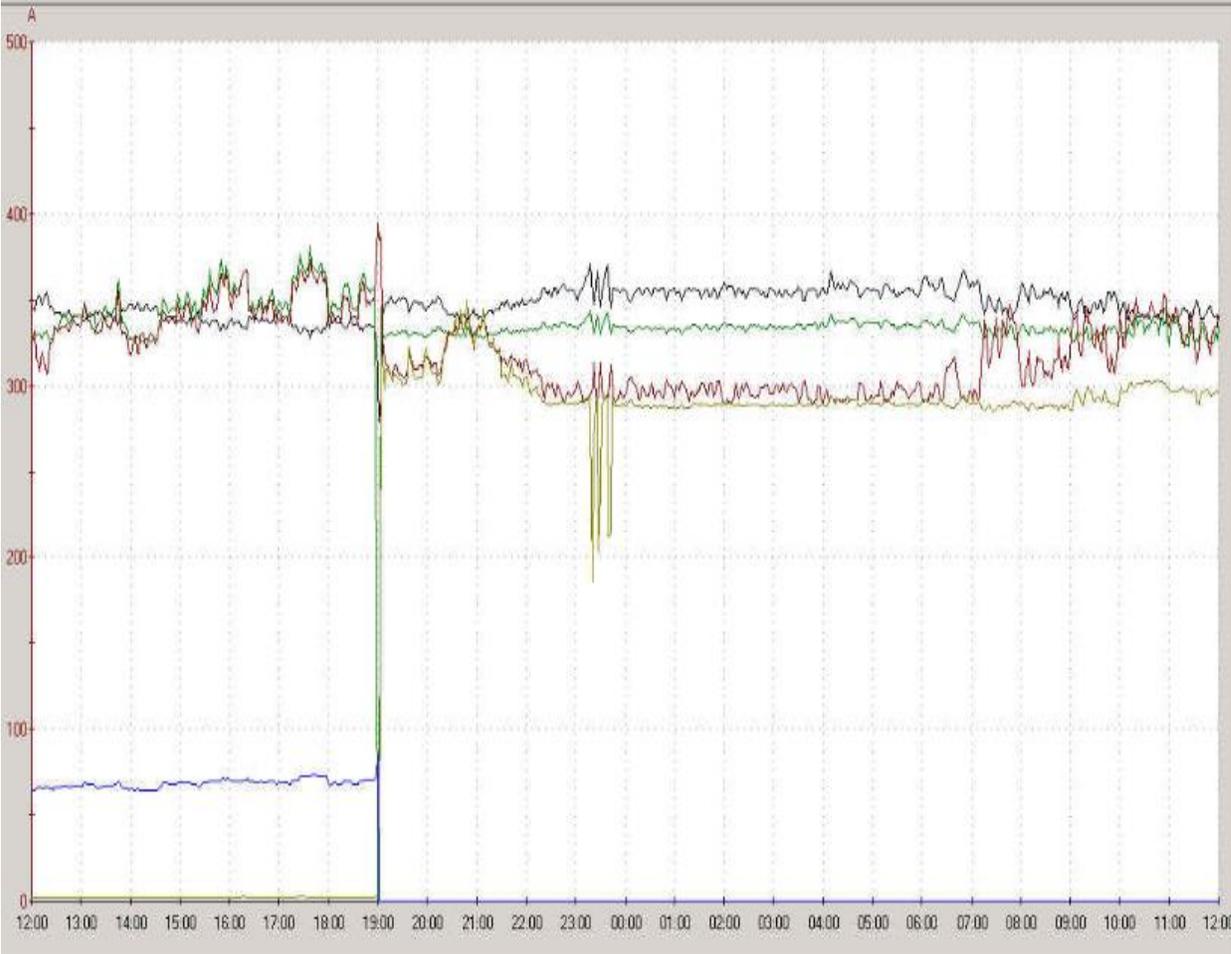


Figura 43. Muestreo de corrientes realizado 6/10/2014.

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Ahora se presenta la tabla que resume la curva mostrada, de donde es posible conseguir el valor de corriente que demandan los compresores en tiempo real:

Tabla 37. Muestreo horario realizado 6/10/2014.

Hora	Sullair TS 32 300 #1 I(A)	Sullair TS 32 300 #2 I(A)	Sullair TS 32 150 #3 I(A)	Sullair TS 32 400 #4 I(A)
12:00	325	0	60	325
13:00	350	0	60	350
14:00	300	0	60	325
15:00	350	0	60	350
16:00	350	0	60	360
17:00	312	0	60	350
18:00	340	0	60	320
19:00	390	300	60	0
20:00	325	300	0	325
21:00	325	350	0	325
22:00	325	298	0	325
23:00	310	200	0	320
00:00	300	200	0	320
01:00	305	298	0	320
02:00	300	298	0	320
03:00	300	298	0	320
04:00	296	298	0	310
05:00	300	298	0	310
06:00	300	298	0	320
07:00	300	298	0	320
08:00	300	288	0	320
09:00	325	300	0	320
10:00	320	300	0	320
11:00	355	298	0	320
12:00	350	300	0	320

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Gráficamente, la tabla anterior ilustra dónde es más claro apreciar el tiempo y corriente de operación de los compresores para este día, del gráfico se nota que los compresores no están consumiendo la totalidad de potencia y, por ende, no están entregando sus valores nominales; además, se logra apreciar que es posible mantener en marcha la red apagando un compresor Sullair TS 32 300.

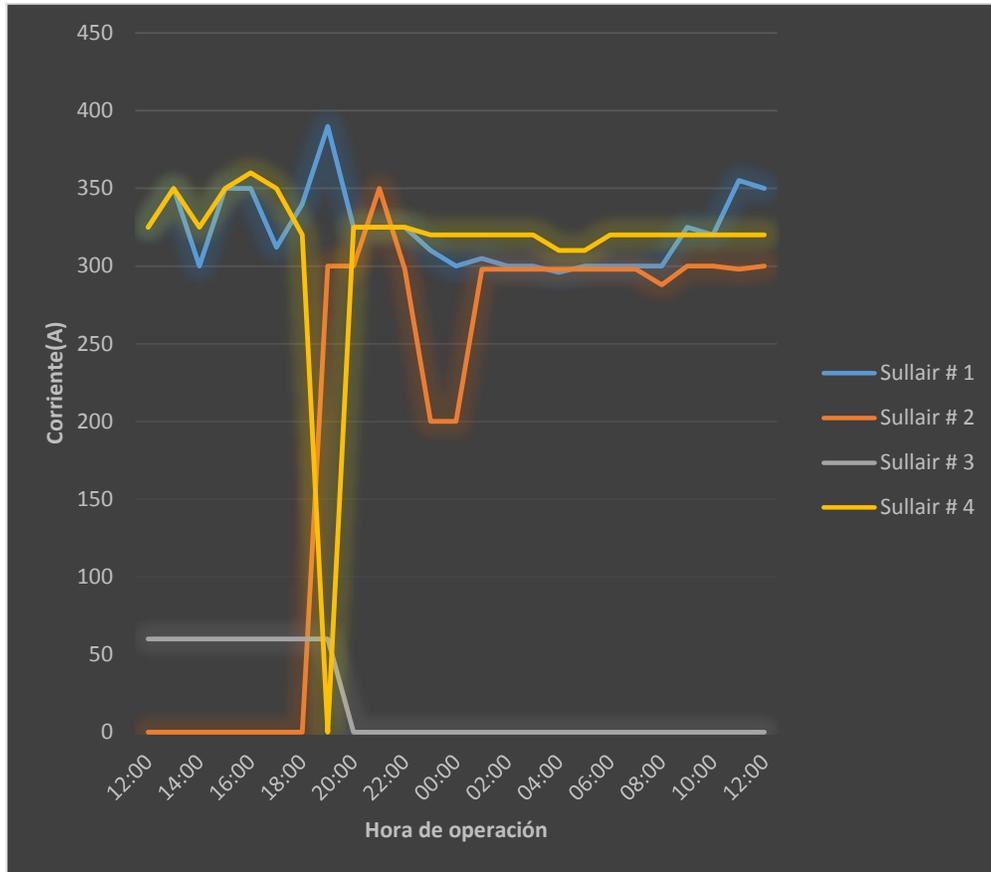


Figura 44. Gráfico de operación diaria.

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Por otro lado, según la cantidad de muestras realizadas a cada compresor, se decide calcular, por medio de una distribución de frecuencias, la media aritmética, el porcentaje de operación y la desviación estándar a cada compresor.

Las siguientes tablas muestran el tratamiento estadístico que se hace a cada compresor, para determinar la potencia consumida.

Tabla 38. Distribución de frecuencias de compresor Sullair # 1.

Límite inferior (A)	Límite superior (A)	Marca de Clase (Xk)	Frecuencia absoluta (Xi)	Frecuencia acumulada	Frecuencia Relativa porcentual	Xi*Xk	(Xk-Xp)^2*Xi
0	56	28	7	7	7	196	509402
57	113	85	0	7	0	0	0
114	170	142	0	7	0	0	0
171	227	199	0	7	0	0	0
228	284	256	0	7	0	0	0
285	341	313	86	93	85	26918	19968
342	398	370	8	101	8	2960	41746
Porcentaje Activo			93	Media Aritmética (Xp)		298 A	
				Desviación estándar		σ_p	75 A

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Sobre la distribución de frecuencias, el compresor posee una corriente promedio de operación de 298 A, además, presenta un porcentaje de ocupación de 93%.

A continuación se presenta la distribución de frecuencias del compresor Sullair #2 con potencia nominal de 223,8 kW, de la cual se puede inferir que 22% de las veces está activo y que la media de corriente es de 79 A, pero la desviación de esta media es muy alta; sin embargo, se decide proseguir con este método ingeniado para conseguir el valor del consumo energético.

Tabla 39. Distribución de frecuencias de compresor Sullair # 2.

Límite inferior (A)	Límite superior (A)	Marca de Clase (Xk)	Frecuencia absoluta (Xi)	Frecuencia acumulada	Frecuencia Relativa porcentual	Xi*Xk	(Xk-Xp)^2*Xi
0	50	25	79	79	78	1975	230617
51	101	76	0	79	78	0	0
102	152	127	0	79	78	0	0
153	203	178	2	81	80	356	19590
204	254	229	0	81	80	0	0
255	305	280	19	100	99	5320	767392
306	356	331	1	101	100	331	63489
Porcentaje Activo			22	Media Aritmética (Xp)		79 A	
				Desviación estándar		σ_p	103 A

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Continuando, se presenta la distribución de frecuencias de un tercer compresor con capacidad de 111,9 kW. La información brindada por la tabla siguiente es que el compresor está 88% del tiempo fuera de operación y que cuando entró en operación, funcionó muy por debajo de su capacidad nominal, cuya media aritmética es de 18 A con una desviación estándar de 26 A.

Tabla 40. Distribución de frecuencias compresor Sullair #3.

Límite inferior (A)	Límite superior (A)	Marca de Clase (Xk)	Frecuencia absoluta (Xi)	Frecuencia acumulada	Frecuencia Relativa porcentual	$X_i \cdot X_k$	$(X_k - X_p)^2 \cdot X_i$
0	18	9	89	89	88	795	7148
19	37	28	0	89	88	0	0
38	56	47	0	89	88	0	0
57	74	66	8	97	96	524	18133
75	93	84	0	97	96	0	0
94	112	103	0	97	96	0	0
113	131	122	4	101	100	488	43415
Porcentaje Activo			12	Media Aritmética (Xp)		18 A	
				Desviación estándar		σ_p	26 A

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Finalmente, se procedió a construir la distribución de frecuencias para el compresor Sullair #4 de 298,4 kW. Se puede notar que está operando 99% del tiempo y su corriente de operación es de 352 A con una desviación estándar de 50 A.

Tabla 41. Distribución de frecuencias compresor Sullair # 4.

Límite inferior (A)	Límite superior (A)	Marca de Clase (Xk)	Frecuencia absoluta (Xi)	Frecuencia acumulada	Frecuencia Acumulada porcentual	Xi*Xk	(Xk-Xp)^2*Xi
0	54	27	1	1	1	27	105950
55	110	82	0	1	1	0	0
111	165	138	0	1	1	0	0
166	220	193	0	1	1	0	0
221	275	248	0	1	1	0	0
276	331	304	22	23	23	6553	64747
332	386	359	50	73	72	17606	0
380	433	406	28	101	100	11379	82406
Porcentaje Activo			99	Media Aritmética (Xp)		352 A	
				Desviación estándar		σ_p	50 A

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Por otro lado, en el caso del compresor Kaeser de 335,7 kW, se sabe que éste opera todo el tiempo en su condición nominal, por lo que para razones del análisis energético, se considera a plena carga; a la vez, se acoge que trabaja 24 horas al día.

Ahora bien, en el caso de los compresores Sullair #1, #2, #3, dentro de la sala en la que están, tienen un postenfriador cuya función es enfriar el aceite y también el aire de salida del compresor, dichos intercambiadores son impulsados por motores de 11,19 kW con voltaje de operación de 460 V, un factor de potencia de 0,86 y una eficiencia del rango de 96%.

La operación de estos intercambiadores está ligada a la de los compresores Sullair #1 y #2, por lo tanto, el valor de los consumos kWh se hace a partir del rango de operación de éstos.

A continuación se presenta una tabla donde se muestran los datos eléctricos de los dispositivos instalados:

Tabla 42. Datos eléctricos de compresores instalados

EQUIPO	Voltaje nominal (V)	Corriente a plena carga (A)	Factor de potencia	Potencia (kW)	η	Factor de Servicio
Sullair TS 32 300 #1	460,00	326,62	0,86	223,80	95,20%	1,15
Sullair TS 32 300 #2	460,00	326,62	0,86	223,80	96,00%	1,15
Sullair LS 20 150 #3	460,00	163,31	0,86	111,90	96,40%	1,15
Sullair TS32 400 #4	460,00	435,49	0,86	298,40	96,00%	1,15
Kaeser FSD 450	460,00	489,93	0,82	335,70	96,20%	1,15
Postenfriador	460,00	16,33	0,86	11,19	96,00%	1,15
Postenfriador	460,00	16,33	0,86	11,19	95,00%	1,15

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Recapitulando: a partir de las distribuciones de frecuencias de cada equipo, se determina la corriente de operación promedio, por lo que se aplica para calcular la potencia consumida, sustituyendo los valores listados en la Tabla 42, excepto el de corriente, en donde se utiliza el valor de la media aritmética.

Además, para calcular el valor de los kWh, se sabe que la planta opera 24 horas y del tratamiento estadístico se determinó qué porcentaje del tiempo entran a funcionar los compresores, por lo que se decide multiplicar el valor del porcentaje determinado por las 24 horas de operación, con esto se consigue el valor de kWh de cada equipo y el global.

Tabla 43. Calculo de potencia consumida por los compresores.

EQUIPO	Voltaje nominal (V)	Corriente de operación(A)	Factor de potencia	Potencia (kW)	Horas/día	kWh/día
Sullair TS 32 300 #1	460,00	297,76	0,86	214,31	22,34	5038,99
Sullair TS 32 300 #2	460,00	79,03	0,86	56,41	5,23	310,40
Sullair LS 20 150 #3	460,00	17,89	0,86	12,72	2,85	38,17
Sullair TS32 400 #4	460,00	352,13	0,86	251,33	23,76	6286,50
Kaeser FSD 450	460,00	489,93	0,82	332,73	24,00	8405,80
Postenfriador	460,00	16,33	0,86	11,19	22,34	263,10
Postenfriador	460,00	16,33	0,86	11,19	5,23	61,58

Fuente: Elaboración propia. (2014).

El costo de la energía para Cemex, según la proyección del ingeniero a cargo de la red eléctrica para el próximo año es 0,0778 USD/kWh, usando este valor para determinar el costo económico.

Al aplicar la ecuación siguiente, se alcanza el valor del costo de la energía por hora del sistema de aire comprimido de cada compresor:

$$\text{Costo} \left(\frac{\text{USD}}{\text{hora}} \right) = \text{Energía consumida} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{día}} \right) * \text{costo energía} \left(\frac{\text{USD}}{\text{kWh}} \right) * \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}}$$

Tabla 44. Costo económico de la energía por hora.

EQUIPO	Costo energético del aire por hora (USD/h)
Sullair TS 32 300 #1	16,33 USD
Sullair TS 32 300 #2	1,01 USD
Sullair LS 20 150 #3	0,12 USD
Sullair TS32 400 #4	20,38 USD
Kaeser FSD 450	27,25 USD
Postenfriador	0,85 USD
Postenfriador	0,20 USD
TOTAL	66,14 USD

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Lo anterior es más visible en el gráfico siguiente, en donde se puede apreciar porcentualmente la influencia en la facturación eléctrica de los diferentes compresores con que cuenta la red, nótese que los compresores que más área abarcan son el Kaeser, el Sullair #1 y Sullair #4:

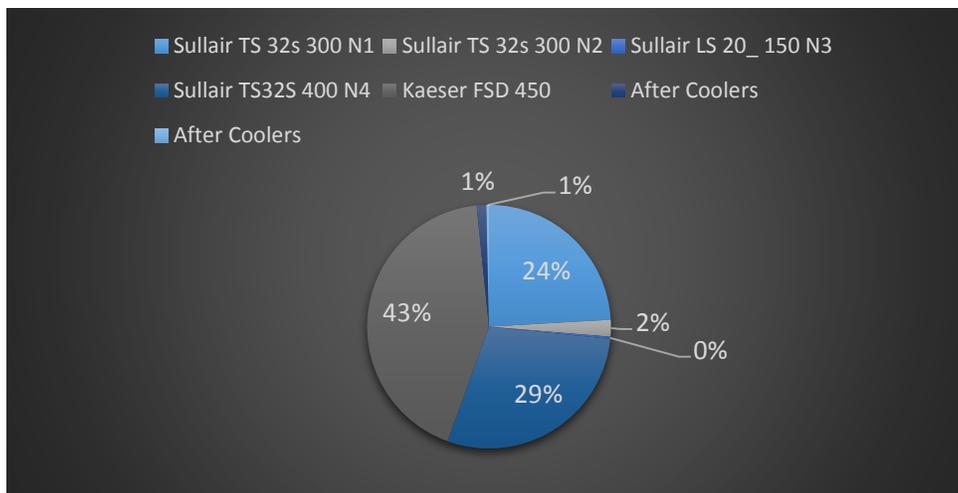


Figura 45. Gráfico de distribución de costos de energía.

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Costo de mantenimiento

La compañía Cemex, dentro de sus estrategias empresariales, utiliza un *software* para realizar las distintas labores administrativas y de operación, la migración hacia este *software* en el 2011 hizo que se perdieran datos de mantenimiento; sin embargo, hay información muy importante desde esta fecha, especialmente de los historiales por costos de mantenimiento.

Continuando, dentro de las labores de mantenimiento que se les hacen a los compresores están:

- Análisis de vibraciones.
- Análisis de aceites.
- Termografía.
- Alineamientos.
- Cambios de filtros de aire y aceite.
- Limpieza de filtros.
- Reposición de aceite.
- Cambio de *kit* de elementos de válvula espiral (en el caso de los compresores Sullair).
- Cambio de artículos eléctricos (sensores y sistema de control).

Aunado a lo anterior, dentro de las labores de mantenimiento, se tienen rutinas de inspecciones semanales; éstas comprenden la totalidad de la red de aire comprimido, en donde se busca determinar fugas, filtros y lubricadores dañados, etc.

Para establecer el valor del costo de mantenimiento, se usó la información en la base de datos de Cemex y, según el tiempo que se tiene registrado, conseguir un valor de tendencia para aterrizar este valor a uno económico por cada hora de operación.

La fórmula siguiente describe la manera en que se determina el costo de mantenimiento:

$$\text{Costo de MTO} \left(\frac{\text{USD}}{\text{h}} \right) = \frac{\text{Costo de mantenimiento registrado(USD)}}{\text{Plazo anual registrado(años)}} \times \frac{1 \text{ año}}{12 \text{ meses}} \times \frac{1 \text{ mes}}{30 \text{ días}} \times \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}}$$

Por último, se expone a continuación una tabla que muestra el valor del costo de mantenimiento por hora de los distintos compresores instalados.

Tabla 45. Gastos de mantenimiento por hora.

Equipo	Costo por hora
Sullair TS 32 300 #1	0,66 USD
Sullair TS 32 300 #2	0,84 USD
Sullair LS 20 150 #3	0,42 USD
Sullair TS32 400 #4	1,05 USD
Kaeser FSD 450	3,08 USD
TOTAL	6,05 USD

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Seguidamente, se muestra un gráfico que sirve para interpretar visualmente el contenido de la tabla anterior, en dicho gráfico nótese que el compresor que genera mantenimiento más costoso es el Kaeser FSD 450.

A modo de análisis, en el presente año al compresor Sullair N 3 no se le han hecho labores de mantenimiento, solamente las de inspección; sin embargo, como se cuenta con un estudio integral de las labores de mantenimiento en aras de manejar una tendencia de costos, se toma en cuenta y se aplica la ecuación.

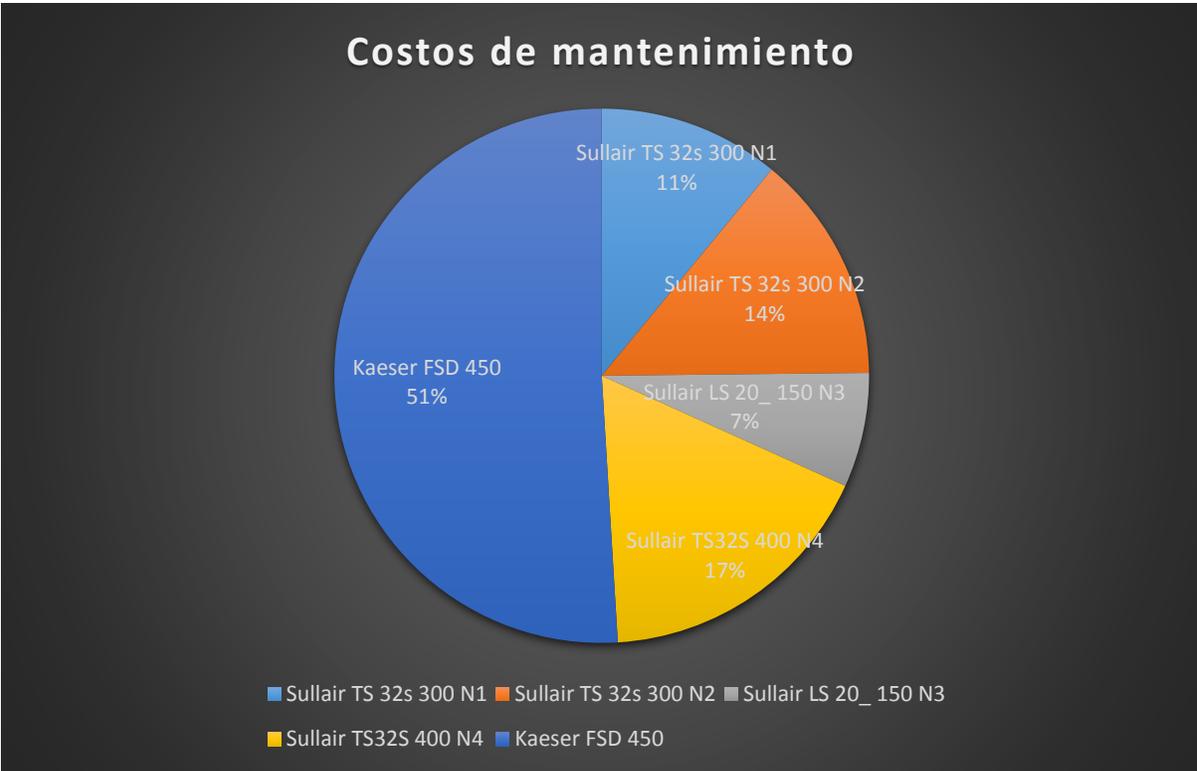


Figura 46. Gráfico de costos de mantenimiento.

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Costo de inversión

Es el tercer argumento que genera gravamen al costo del aire comprimido y no es más que la cantidad de dinero gastada para la adquisición de los compresores. Si bien los compresores, se analizan como una única máquina es importante que se mencione en el presente documento que también se tiene equipo extra instalado para la generación de aire. Dicho equipo es utilizado para dar calidad de aire (filtros) y también para enfriar el aceite que circula por los compresores de tornillo.

Por lo tanto los equipos a la hora de adquirirlos mayoritariamente se compran con el postenfriador; en el caso de Cemex los equipos fueron comprados con dichas unidades extra, las cuales igualmente cumplen la misión de promover la eficiencia en la generación de aire.

A continuación se muestra una tabla con el costo de compra de los equipos instalados:

Tabla 46. Costo inicial de compresores instalados.

Compresor	Costo de compra (USD)	Fecha compra	Horas
Sullair TS 32 300 #1	180 000,00 USD	25/12/1997	118000
Sullair TS 32 300 #2	180 000,00 USD	29/03/2000	35651
Sullair LS 20 150 #3	90 000,00 USD	17/02/2003	41219
Sullair TS32 400 #4	240 000,00 USD	17/12/2005	66856
Kaeser FSD 450	197 999,00 USD	12/12/2012	14634

Fuente: Oficina Técnica de Cemex. (2014).

Para calcular el costo de inversión, se determina la depreciación lineal de cada equipo. Esta es cuánto dinero cuesta el equipo a través de su vida útil.

Ahora bien, para calcular el valor de la depreciación lineal, se debe usar la ecuación mostrada a continuación:

$$DL = \frac{\text{Costo Inicial} - \text{Valor de descarte}}{\text{Vida útil}}$$

Donde: DL: es depreciación lineal.

Costo inicial: es el valor de compra del equipo.

Valor de descarte: valor que establecen las compañías para deshacerse de un activo.

Vida útil: es la cantidad de tiempo que se espera que el equipo brinde rendimiento.

La aplicación de esta ecuación para las condiciones de Cemex trae a colación que el valor de descarte en Cemex es cero, por lo que se usa el equipo hasta su máximo nivel.

En el caso de la vida útil, por investigaciones realizadas, se determinó que Sullair para los tipos de compresores en cuestión, ofrece garantía de diez años, por lo que se acoge como valor de vida 12 años.

Por otro lado, para los compresores que ya han llegado a este límite, se decide considerarlos y usar como valor de vida útil la cantidad de años de servicio actual.

Finalmente, la tabla siguiente muestra el valor de la depreciación de los equipos instalados:

Tabla 47. Costo de inversión por hora.

Equipo	Costo por hora
Sullair TS 32 300 N1	1,21 USD
Sullair TS 32 300 N2	1,71 USD
Sullair LS 20 150 N3	0,86 USD
Sullair TS32 400 N4	2,28 USD
Kaeser FSD 450	1,88 USD
TOTAL	7,94 USD

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Costo total de aire producido

Primeramente, ahora que se conocen los costos parciales se procede a sumar el total de costos del aire comprimido, éste se expone en la tabla siguiente; asimismo, se presenta un gráfico que muestra la distribución porcentual de los costos del sistema de aire comprimido actual para Cemex.

Por otro lado, de la información de los costos porcentuales de operación, se puede inferir que en la energía existe un gran potencial de ahorro de costos del aire.

Tabla 48. Costos de aire comprimido.

	Total	Mantenimiento	Inversión	Energía
Costo Aire diario	1 923,42 USD	145,29 USD	190,65 USD	1 587,47 USD
Costo Aire mensual	57 702,53 USD	4 358,76 USD	5 719,57 USD	47 624,20 USD
Coste Aire Anual	651 777,49 USD	53 031,59 USD	69 588,15 USD	529 157,74 USD

Fuente: Elaboración propia. (2014).

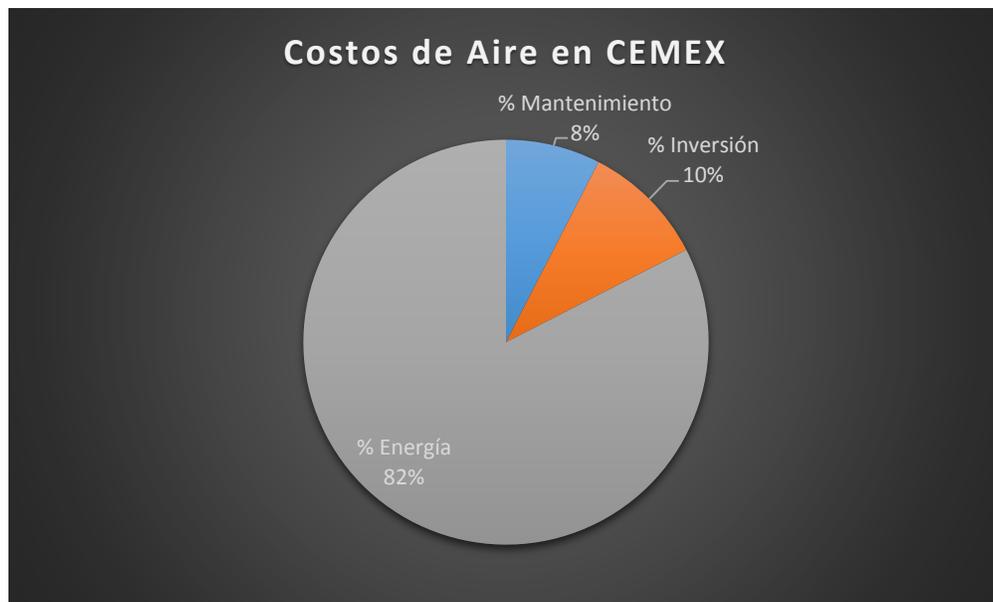


Figura 47. Distribución de costos de aire comprimido en Cemex Colorado.

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Luego de conocer el costo del aire, es conveniente que se aterrice a la razón de precio por unidad de volumen ($\frac{USD}{Nm^3}$), para lograrlo debe estimarse el caudal suministrado por los compresores y compararlo con los costos.

Nótese que se habla de estimación porque el tratamiento de esta razón es muy teórico, debido a la carencia de equipos de medición para dar un valor real de la condición que se discutirá a continuación.

En primer lugar, se debe mencionar que el compresor Sullair TS 32 300 #1 presenta horas de operación por encima del valor nominal, lo que indica que está para *overhaul*, esta razón hace desconfiar de la capacidad de generación de este compresor; sin embargo, por limitaciones para comprobar lo que se menciona, corresponde asumir que sí genera la totalidad de aire.

Seguidamente, por el tipo de regulación que presentan los compresores Sullair, se debe hacer un cálculo de cuánto caudal están produciendo, ello sigue el siguiente procedimiento:

1. Determinar dos puntos del gráfico de la curva de rendimiento de la válvula espiral.

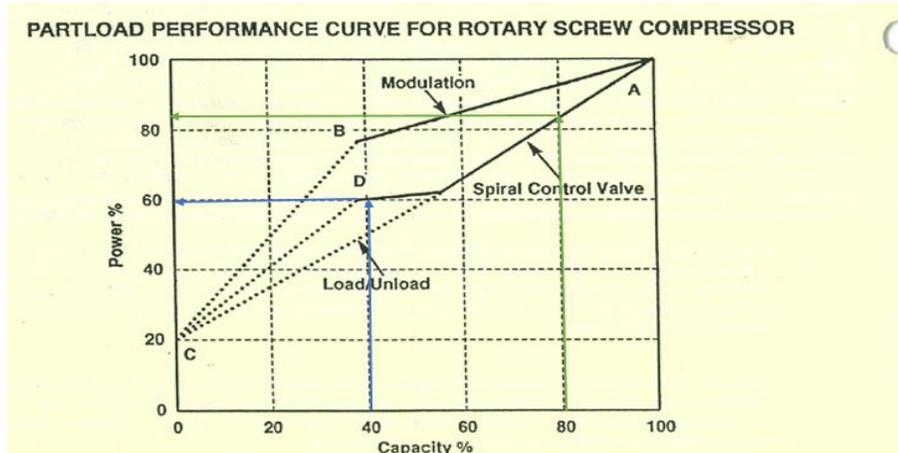


Figura 48. Cálculo de puntos para control de válvula espiral.

Fuente: Oficina técnica de Cemex. (2014).

2. Determinar el porcentaje de energía consumida para cada compresor, dado por la razón de: energía de operación entre energía nominal.
3. Multiplicar el valor de porcentaje de carga a la capacidad de producción de aire de cada compresor.
4. Sumar el total del caudal de aire producido

La tabla siguiente muestra los valores usados y el valor final de la capacidad de generación de aire de los compresores:

Tabla 49. Calculo de aire entregado según energía consumida.

Equipo	Aire Teórico (Nm ³ /min)	%Energía Consumida	% Capacidad	Aire Entregado (Nm ³ /min)
Sullair TS 32 300 #1	43,53	96,00	94,00	41,07
Sullair TS 32 300 #2	43,53	25,00	0,03	0,12
Sullair LS 20 150 #3	17,70	11,00	18,00	3,22
Sullair TS32 400 #4	55,58	84,00	79,00	43,89
Kaeser FSD 450	52,41	100,00	10,00	52,41

Fuente: Elaboración propia. (2014).

5. Dividir el valor del costo total del aire entre el caudal producido y dar un valor expresado en términos de USD/Nm³:

$$COSTO AIRE = \frac{1923,42 \frac{USD}{día}}{140,71 \left(\frac{Nm^3}{min}\right) \times \frac{60 min}{1 h} \times \frac{24 h}{día}} = 0,00949 \frac{USD}{Nm^3}$$

Costo de la tubería principal actual

Según lo analizado anteriormente se determinó que la caída de presión en un tramo considerable es de 0,4 bar a una presión de operación de 6,9 bar lo que es equivalente a 5,78%, por lo que conviene revisar el costo de esta caída de presión, ya que su influencia es que se opere a una presión de trabajo superior a la requerida por los útiles.

La figura siguiente es dada por el manual de Atlas Copco en donde se señala que si hay un exceso de presión de 0,5 bar se aumenta 4% la potencia de consumo.

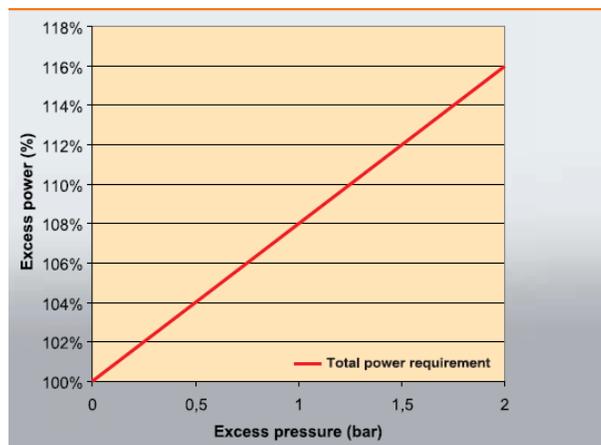


Figura 49. Costo de aumento de presión.

Fuente: Atlas Copco. (2010).

Ahora bien, para adaptar este dato al contexto operativo de Cemex, se debe analizar con cuidado, ya que como se explicó en la parte de costo energético, los compresores Sullair son regulados por el control de válvula espiral, entonces, lo mostrado en la Figura 48 no aplica en su totalidad. Sin embargo, de las curvas de rendimiento de los compresores se extrae la información mostrada en la figura siguiente.

Se puede notar que los compresores Sullair se ven afectados por un incremento en la presión de operación, por lo tanto, para calcular el costo de esta elevación se decide determinar qué porcentaje de potencia se reduce si se cambia la presión de trabajo de 6,9 bar a 6,6 bar, utilizando la curva de rendimiento a valores nominales.

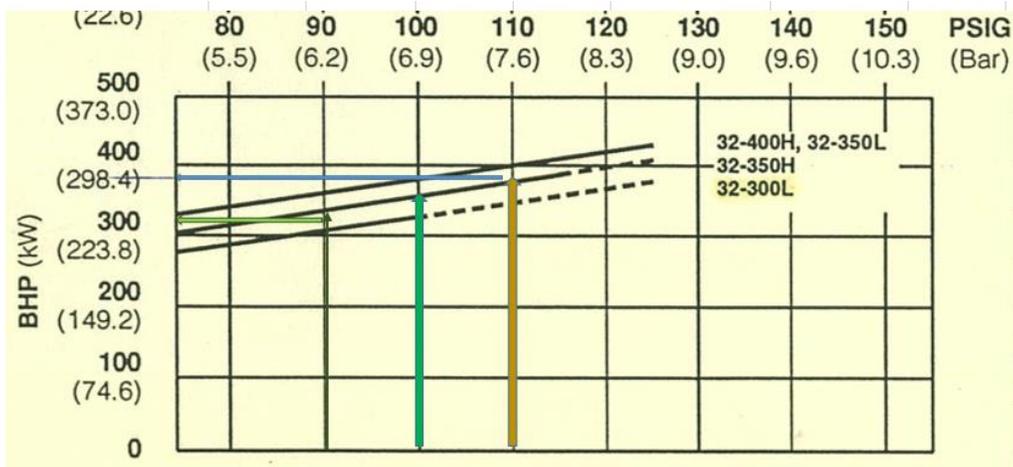


Figura 50. Consumo de energía en función de la presión de trabajo.

Fuente: Sullair. (1994).

El procedimiento para calcular el porcentaje de ahorro es el siguiente:

1. De la gráfica, extraer dos puntos tanto en las abscisas como en las ordenadas.

Tabla 50. Puntos para la interpolación.

Potencia(kW)	Presión(bar)
223,8	6,2
236,5	6,9

Fuente: Propia

2. Determinar por medio de la ecuación de interpolación lineal, el valor de potencia a una presión de trabajo de 6,6 bar, lo siguiente muestra los datos ingresados a la ecuación.

$$y = 223,8 + (6,6 - 6,2) \left(\frac{236,5 - 223,8}{6,9 - 6,2} \right) = 231,1 \text{ kW}$$

3. Calcular el porcentaje que se ahorra, si se cambia de 6,9 bar a 6,6 bar (obsérvese la ecuación aplicada):

$$\%Ahorro = \left(1 - \frac{231,1}{236,5} \right) * 100$$

Finalmente, se llega a un valor porcentual de ahorro de energía equivalente a 2,28% por lo que este será el valor porcentual que idealmente se puede aprovechar, si se disminuye la presión de operación en 0,4 bar que actualmente debe tener extra para que la presión requerida de los útiles sea alcanzada, producto de la caída de presión determinada.

Por otro lado, en el caso del compresor Kaeser FSD 450, no fue posible desarrollar este análisis tan puntual, ya que el representante del fabricante a nivel nacional no dejó en la fábrica esta información, se solicitó al fabricante directamente y tampoco fue posible obtenerla en el transcurso del desarrollo del presente proyecto, por lo que a nivel general y conservadoramente, se decide acoger un valor porcentual de 2%, este, apoyado en el cálculo realizado y por la información general de (Compressed air manual) dada en la Figura 49.

Seguidamente, se discute más por qué se decide conservadoramente acoger un valor de dos por ciento, la asunción se debe a que la regulación actual del sistema no está automatizada, sino que se deja el control directamente al sistema válvula espiral y carga descarga para los compresores Sullair y Kaeser, respectivamente.

En segundo lugar, la situación descrita hace casi imposible manejar una línea constante de presión; sin embargo, brindar rangos de operación sí es posible, así que como valor promedio de operación se establece 6,6 bar, dando como máximo 6,7 bar y como mínimo, 6,5 bar. Estos, finalmente, serán los rangos a los que deberá funcionar la red de aire. Lo anterior se describe en el muestreo realizado a la presión de trabajo el día 9/10/14.

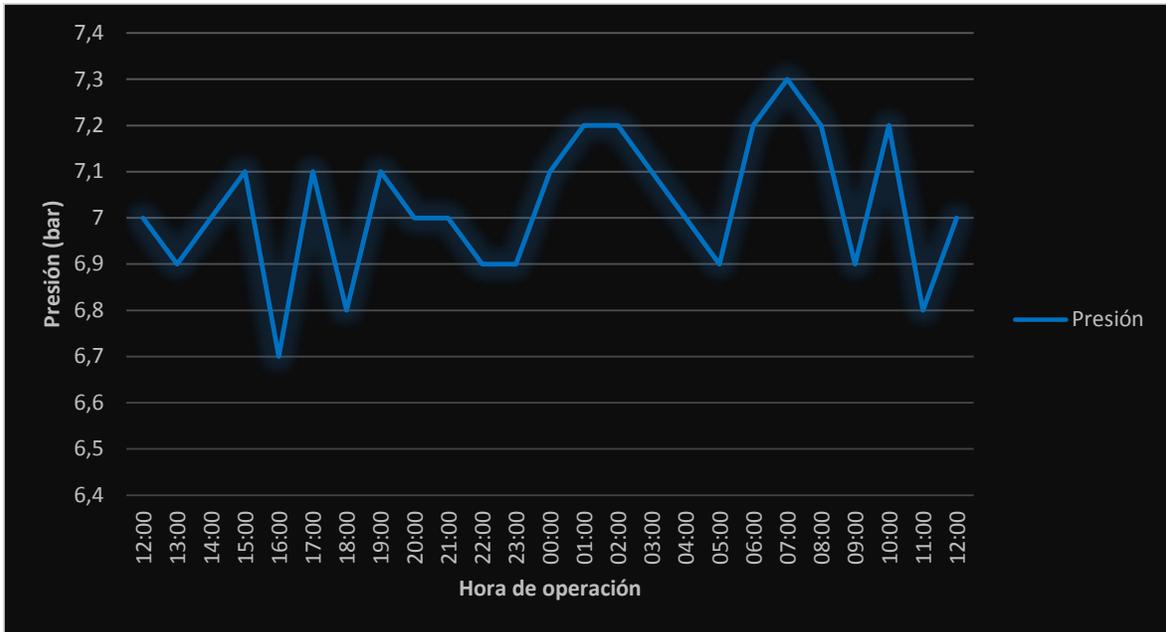


Figura 51. Gráfico de presión de operación día 9/10/14.

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Recapitulando, como se sabe que la presión no se puede establecer de forma lineal, se determina el valor de ahorro de energía en 2%, de forma conservadora, dicha reducción equivale a lo que se muestra en la siguiente tabla; además se considera la parte ambiental, según datos del Instituto Meteorológico Nacional (2014), por cada kWh producido se emanan 0,13 kilogramos de dióxido de carbono. Se muestran las reducciones de contaminación:

Tabla 51. Ahorros por reducción de presión de operación.

Periodo	kWh	Dinero salvado	Kilogramos CO ₂
Diario	422,73	32,89 USD	55,00
Mensual	12 682,02	986,66 USD	1 648,70
Anual	120 056,43	9 340,39 USD	15 607,30

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Por otro lado, según la detección de fugas realizada se determinó un caudal de fugas de manera conservadora de 0,7378 Nm³/min, dichas fugas están a 24 horas

los siete días de la semana, ya que no se pueden corregir hasta que suceda un paro de planta. Como el valor determinado por cada Nm³ es de 0,00949 USD, realizando la conversión como se muestra a continuación, se determina el valor de la fuga:

$$\text{Precio de fuga} = 0,7378 \frac{\text{Nm}^3}{\text{min}} \times \frac{60\text{min}}{1\text{h}} \times 0,00949 \frac{\text{USD}}{\text{Nm}^3} \times \frac{24\text{h}}{\text{dia}} = 10,20 \frac{\text{USD}}{\text{dia}}$$

A continuación, la Tabla 52 es un resumen del valor de estas fugas determinadas:

Tabla 52. Resumen de costos de fuga determinados.

Costo/día	10,09 USD
Costo/mes	302,57 USD
Costo Anual	3 361,84 USD

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Bajo otro contexto, dentro del presente proyecto se consideró necesario que se haga una medición de espesores de las tuberías de aire para determinar la degradación que tiene la tubería, sin embargo por la limitante del recurso no fue posible en el tiempo que hay para desarrollar el proyecto. Además el riesgo que eventualmente puede provocar esto, es que se genere un paro de operación en la parte de molienda y entrega de material, que podría decirse que es la parte más crítica de la planta ya que es donde literalmente se generan las ganancias, en la siguiente figura se muestra un tramo de la tubería con un escamado superficial severo.



Figura 52. Tramo de la tubería con síntomas claros de corrosión.

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Por último, como se desconoce el valor de la degradación, no se considera dentro del costo de esta tubería actual el riesgo de producción; esto no quiere decir que no esté en riesgo, pero como no se tiene el argumento técnico, se descarta.

Aunado a lo anterior, también hay tramos que están en un aparente buen estado superficial, sin embargo, nuevamente se requerirá medir y determinar si están en buenas condiciones, en la figura siguiente se puede ver la condición:



Figura 53. Tramos de tubería con aparente buen estado.

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Por último el valor total de dinero desperdiciado de la red actual expone en la siguiente tabla:

Tabla 53. Costo total de red de aire actual.

Periodo	Fugas	Caída de presión	Total
Diario	10,20 USD	32,89 USD	43,09 USD
Mensual	306,00 USD	986,66 USD	1 292,66 USD
Anual	3 672,00 USD	9 340,39 USD	13 012,39 USD

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Estudio económico de las oportunidades de conservación de energía

Modificación del sistema de enfriamiento de la virola y de sistemas de enfriamiento.

El costo de implementar este sistema es equivalente al valor de las cuchillas, la cantidad de cuchillas necesarias es equivalente a la cantidad de mangueras, por lo tanto se deberán comprar 8 sistemas de cuchillas de aire, asimismo se propone comprar 4 cuchillas más para colocarlas en el sistema de enfriamiento de la virola.

La figura siguiente muestra la medición del caudal de aire que suplen estas mangueras.



Figura 54. Medición de consumo de aire de mangueras de enfriamiento y estaciones de servicio.

Fuente: Elaboración propia. (2014).

A continuación se muestra el dinero que se consigue ahorrar al instalar este sistema para enfriamiento:

Tabla 54. Ahorro de modificación de sistema de enfriamiento.

Ahorro diario	29,80 USD
Ahorro mensual	894,00 USD
Ahorro anual	10.429,98 USD

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Ahora bien, la inversión de cada cuchilla tiene un valor de 399,00 USD, es posible reducir dos mangueras por cada sistema de cuchillas; sin embargo, como se describió, como se plantea una sustitución 1 a 1, el valor total de este sistema será de 4 788,00 USD.

El cálculo del retorno simple es:

$$PRS = \frac{4\,788,00 \text{ USD}}{29,8 \frac{\text{USD}}{\text{dia}}} = 161 \text{ dias}$$

Estudio financiero de potenciar sistema de detección de fugas

La inversión en esta OCE es variable, ya que depende de los problemas que se tope el inspector; sin embargo, la mayoría de las veces reparar una fuga es equivalente a cortar un trozo de manguera y volver a unir. Por lo tanto, para darle números a esto se acoge como importe el costo de cinco horas de trabajo semanales de un mecánico, valor convertido a mensual equivale a 65,20 USD.

Ahora bien, en inspecciones hechas durante el desarrollo del proyecto, se determinó un total de fugas de un valor no menor a 4 Nm³/min; sin embargo, de forma conservadora para este cálculo, se acoge un caudal de ahorro de 1 Nm³/min, como las fugas son a 24 horas durante todos los días el costo de este ahorro se representa en la tabla siguiente:

Tabla 55. Ahorro de dinero por potenciar detección de fugas.

Ahorro diario	13,88 USD
Ahorro mensual	416,49 USD
Ahorro Anual	4 997,91 USD

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Por último, el valor del periodo de retorno de esta OCE da menos de 6 días, pero como el deterioro de los sistemas es progresivo, se considera estrictamente el ahorro producido si se le da un correcto seguimiento a esta OCE.

Estudio económico del nuevo diseño.

Primeramente, se debe indicar que dentro de la compañía existe una área dedicada a proyectos, en esta manejan los costos de construcción de obra gris; por lo tanto, se recurre al encargado para comentarle acerca de la propuesta de construir una nueva sala de compresores, producto de esta reunión se adquiere el valor tazado de 550 USD por cada metro cuadrado construcción; ahora bien, por las dimensiones de los compresores y la disponibilidad del terreno, se propone construir una sala cuadrada que mida 10 m de lado, es decir, un área de 100 m², dando un valor de construcción de 55 000,00 USD.

Por otro lado, en lo que respecta a materiales, se hicieron cotizaciones a dos proveedores, para efectos de este análisis se considera la primera propuesta recibida. El valor de materiales (válvulas, uniones, tubos, codos, bajantes) es de 114 722,24 USD.

El costo de instalación se define un porcentaje corporativo de 20% del valor de los materiales, por tanto, se maneja un coste de 22 944,45 USD; además de esto, se considera el valor de las juntas de expansión, las cuales equivalen a 9 058,00 USD.

Finalmente, en la siguiente tabla se muestran el costo del proyecto y los diferentes costos de cada acción para desarrollarlo. Es importante notar que se agrega un valor adicional para imprevistos con la finalidad de cubrir necesidades que eventualmente pudieron ser omitidas.

Tabla 56. Costos del nuevo diseño.

Costo	Valor
Materiales	114 722,24 USD
Instalación	22 944,45 USD
Juntas de expansión	9 058,00 USD
Cuarto Compresores	55 000,00 USD
Imprevistos	25 000,00 USD
TOTAL	226 724,69 USD

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Seguidamente, como se conocen los costos del proyecto y de la tubería actual, se procede a analizar cómo justificar el nuevo proyecto; se piensa inicialmente en un estudio de reemplazo, pero se decide no hacerlo porque con el análisis del periodo de retorno de la inversión, se conoce el plazo que debe esperarse para que el proyecto retorne la inversión.

Finalmente, se calcula el valor del periodo de retorno simple dando un valor 17 años, este indicador si bien no toma en cuenta la inflación y el porcentaje de interés, establece un buen parámetro para conocer qué plazo se debe esperar para pagar este proyecto; por otro lado, haciendo hincapié de que no se consideró el análisis de espesores que en realidad podría describir, sí existe riesgo de paros no programados que generaría un costo adicional a la tubería actual; por consiguiente, modificaría el valor del periodo de retorno calculado.

Conclusiones

- Se diseñó la tubería principal de aire comprimido de la planta Cemex, Colorado.
- Fue posible modificar la ruta actual donde se concibe un diseño con técnicas ingenieriles apegadas a la realidad de Cemex, pues se promovieron rutas rectas reduciendo las curvas y reducciones de diámetro que aumentan la eficiencia de la red propuesta.
- Se logró reducir la cantidad de fugas con el nuevo diseño propuesto en 0,7378 Nm³/min.
- No fue posible justificar la rentabilidad del proyecto, ya que la decisión de cuán rentable es depende de los lineamientos mundiales de la compañía, sin embargo, por medio de un estudio económico, se determinó que el periodo de retorno simple de la inversión es de 17 años, omitiendo el riesgo de paros no programados y la disminución de la confiabilidad.
- Se propusieron oportunidades de ahorro energético que contribuyen al aumento de productividad de la planta Cemex Colorado, generando ahorros anuales de 15 427, 89 USD.

Recomendaciones

Es conveniente que la empresa realice un estudio de espesores a la tubería principal para que determine finalmente cuáles tramos verdaderamente exponen los altos niveles de confiabilidad y disponibilidad que maneja la planta.

Desde la perspectiva operativa, la tubería se comporta en condiciones admisibles, la caída de presión del tramo crítico se puede remediar sustituyendo este sector, cuya inversión no deja de ser despreciable, pues corresponde a un trayecto superior al 55 por ciento del diseño propuesto.

La sustitución del sistema de enfriamiento es importante acogerla; sin embargo, conviene probar la efectividad que se propone, aunando a esto debe hacerse un estudio de causa raíz, para descubrir el origen del recalentamiento de algunos rodamientos y corregirlo a la brevedad, ya que su enfriamiento genera costos superiores a 24000 USD anuales.

Por otra parte, implementar la OCE para potenciar la detección de fugas con el uso de ultrasonido debe llevar una capacitación del personal en donde se concientice sobre las bondades de esta técnica y se motive para que se dé una correcta aplicación, a la vez que se les enseñe cómo utilizar la hoja de rutina de inspección diseñada.

Finalmente, si se decidiera conservar la tubería actual, sería necesario implementar un sistema de protección contra la corrosión aplicando pintura ojalá con un asesoramiento por parte de los expertos, en donde se reciban recomendaciones según el tipo de atmosfera al que está expuesta esta tubería; además, es importante hacer algún tipo de rotulación para diferenciar las tuberías con el respectivo código de colores, ya que actualmente están exentas de esto.

Bibliografía

- Alonso, J. S. (2010). *Informe de práctica de especialidad*. Cartago: ITCR.
- Boge. (1 de setiembre, 2014). *Guide book compressed air*. Obtenido de <http://www.drucklufttechnik.de/english/>
- CAGI. (s.f.). *Compressed air Manual*. CAGI.
- Compressed air manual*. (s.f.). Wilrijk: Atlas Copco.
- Garro Zavaleta, A. (2014). *Aire Comprimido*. Cartago, Costa Rica.
- González, A. P. (2012). *Práctica de especialidad*. ITCR.
- Hanlon, P. C. (1976). *Compressor hanbook*. New York: McGRAW-HILL.
- Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica. (10 de octubre, 2014). *Factores de emisión de gases del efecto invernadero*. Obtenido de http://cglobal.imn.ac.cr/sites/default/files/documentos/factoresemision-gei-2014_1.pdf
- Kaeser. (3 de setiembre, 2014). *Kaeser*. Obtenido de: http://us.kaeser.com/Images/USFSD_FSDseriesScrewComps_01-2012-tcm9-306695.pdf
- Leland Blank, A. T. (1999). *Ingeniería económica*. Bogotá: McGraw Hill.
- Martin. (1 de Agosto de 2014). *Cañones martin XHV*. Obtenido de <http://www.martin-eng.com/sites/default/files/literature/M3404.pdf>
- Norgren. (2009). *La guía Norgren para el ahorro de energía en sistemas de aire comprimido*. Obtenido de: http://resources.norgren.com/document_resources/EN/es_z7132_EnergySaving.pdf
- Parker. (2012). High quality compressed air. *Dominck Hunter*.

- Parker. (2012). *Transair: Advanced Air Pipe Systems*. Parker Hannifin.
- Quirós, L. E. (2008). *Informe de práctica profesional*. Cartago: ITCR.
- Royo, E. C. (1977). *Teoría y cálculo de instalaciones de aire comprimido*.
Barcelona: Gustavo Gili, SA.
- Sullair. (10 de setiembre, 2014). *Catálogo de compresores estacionarios a tornillo*.
Obtenido de: <http://www.sullairargentina.com/wp-content/uploads/2010/05/Listado-de-Compresores-de-aire-Estacionarios.pdf>
- Sullair. (7 de octubre, 2014). *Sullair*. Obtenido de:
http://www.sullairinfo.com/Downloads/LIT_Two-Stage_TS01EN.pdf
- Yunus, C. (2006). *Mecánica de fluidos fundamentos y aplicaciones*. Distrito Federal: McGraw Hill.

Anexos

La figura siguiente muestra cómo calcular el punto de rocío a la salida del compresor, esto depende de la humedad relativa de la zona donde se está ubicado, la temperatura de ingreso del aire al compresor y la presión de operación del compresor.

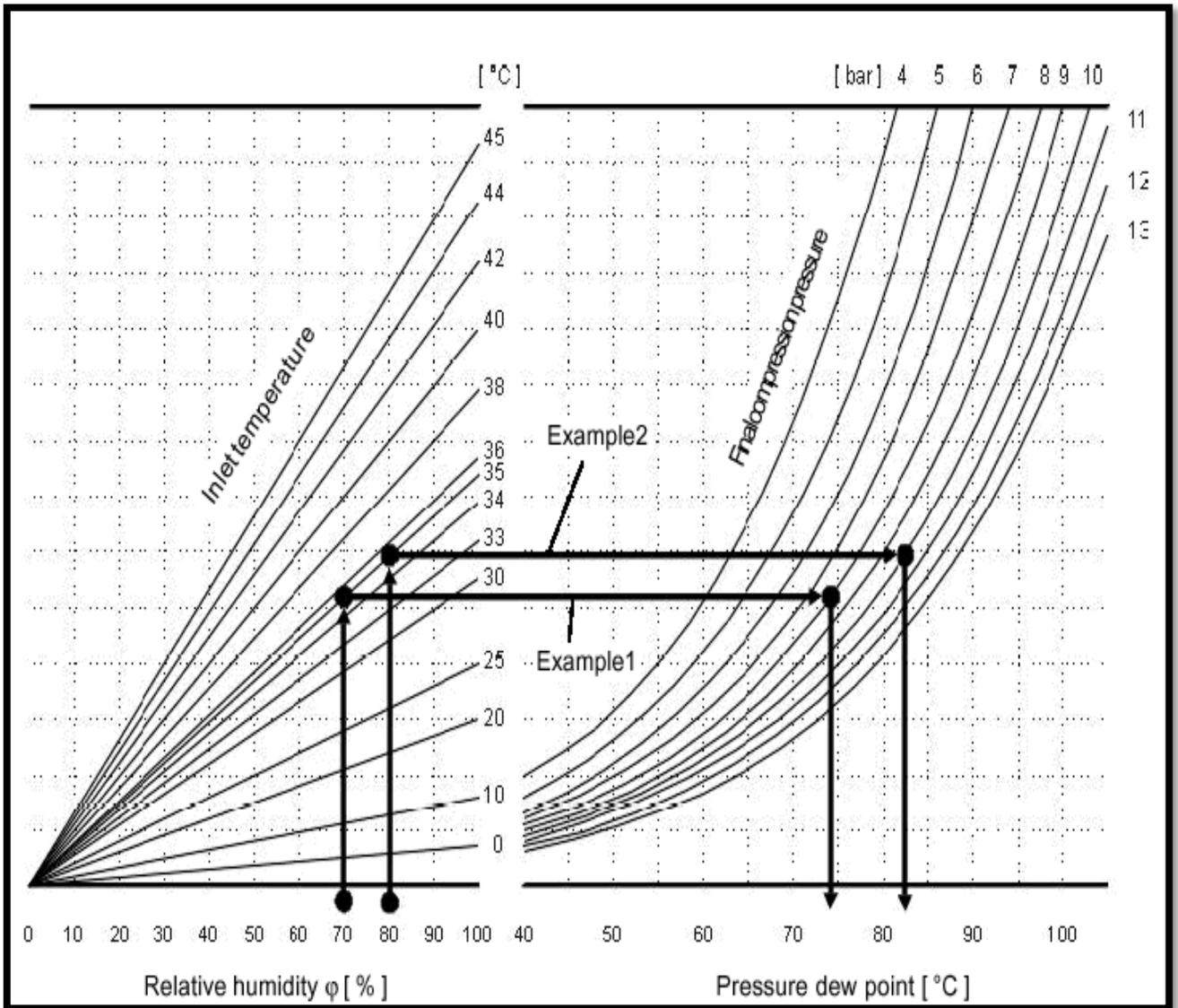


Figura 55. Cálculo de punto de rocío de un compresor.

Fuente: Boge (2014).

Sistema de bombeo envirocare, cumple la función de bombear el aire directamente hasta la torre intercambiadora de calor, la figura siguiente es una vista superior de la configuración del sistema de bombeo actual.

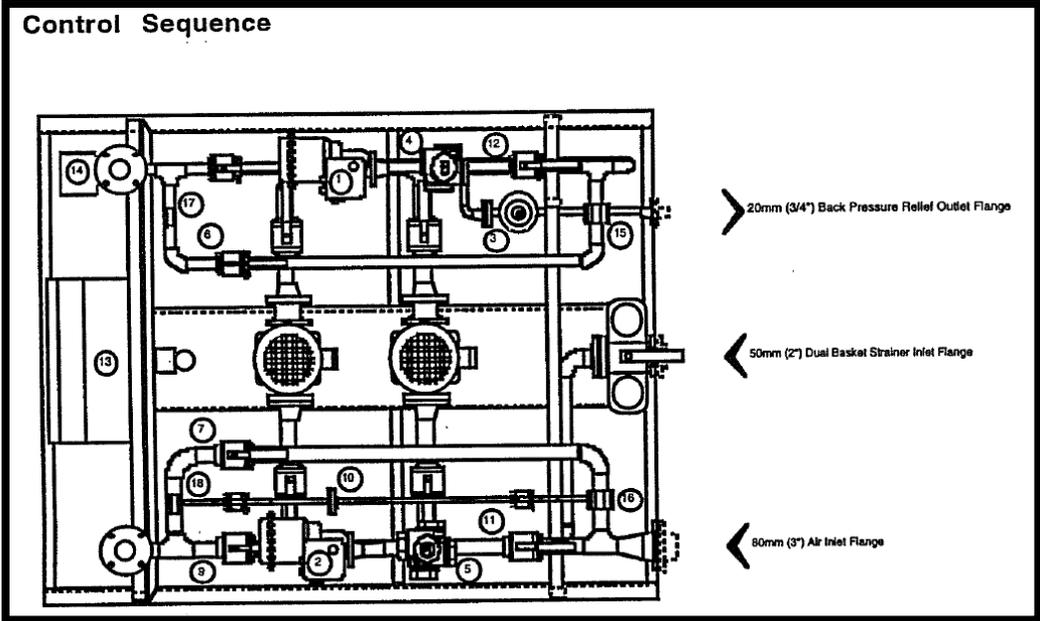


Figura 56. Bomba de torre envirocare.

Fuente: Oficina Técnica Cemex. (2014).

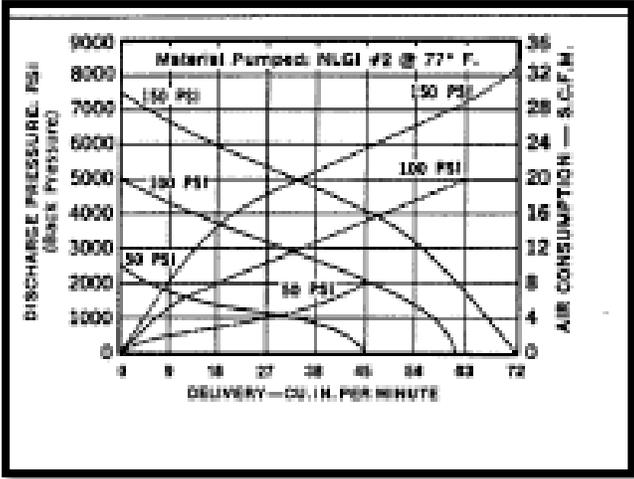


Figura 57. Curva de operación de bombas Farval.

Fuente: Oficina Técnica Cemex. (2014).

Farval™
pneumatic barrel pumps
"standard duty" (50:1 ratio)

Bulletin 1001

Farval

features:

- wear resistant air motor reduces friction and wear.
- abrasion resistant air piston minimizes friction and wear.
- hard chrome plated trip rod minimizes packing wear.
- self seating and self cleaning air valve assures air motor reliability.
- double toggle trip mechanism prevents binding or stalling.
- straight line exhaust with large orifice provides high pump efficiency and minimizes icing.
- top quality shock-resistant packing prevents leakage.
- micro-lapped high pressure cylinder and piston minimizes friction and wear.
- self-cleaning and self-aligning foot valve prevents clogging.
- dynamic primer assures prime.
- follower tube vent return eliminates extra fittings and hose.



Figura 58. Tipo de bomba de lubricación existente.

Fuente: Oficina Técnica Cemex. (2014).

- a) Plataforma puerta de visita:
 - Filtros 9MWC-10; C-15; C-20 y C-25 TG-77.055 a
 - Filtro 9MW-60 TG-77.056 a

- b) Barandillas techo:
 - Filtros 9MWC-10; C-15; C-20 y C-25 TG-77.057
 - Filtro 9MW-60 TG-77.058

- c) Estructura soporte standard:
 - Todos los modelos TG-77.050 a

Conexiones a las bocas de entrada y salida

Los conductos de entrada y salida deben estar sostenidos independientemente. El cuerpo del filtro no ha sido diseñado para sostenerlos. Todas las conexiones deberán ser estancas. Las bridas utilizadas al conectar los conductos deberán ser del mismo tamaño que las que existen en la unidad.

Conexiones de aire

Se precisa un suministro de aire limpio y seco a presión (aproximadamente 7 Kgs/cm²., ya que las válvulas de aire tienen un régimen máximo de 8,7 Kgs/cm²). La línea para suministro de aire comprimido que se conecta al depósito de 5 pulgadas de diámetro, deberá estar libre y limpia de polvo, suciedad, cascarillas y restos de soldadura, cuando

Figura 59. Foto de ficha técnica de filtros de mangas.

Fuente: Oficina Técnica Cemex. (2014).

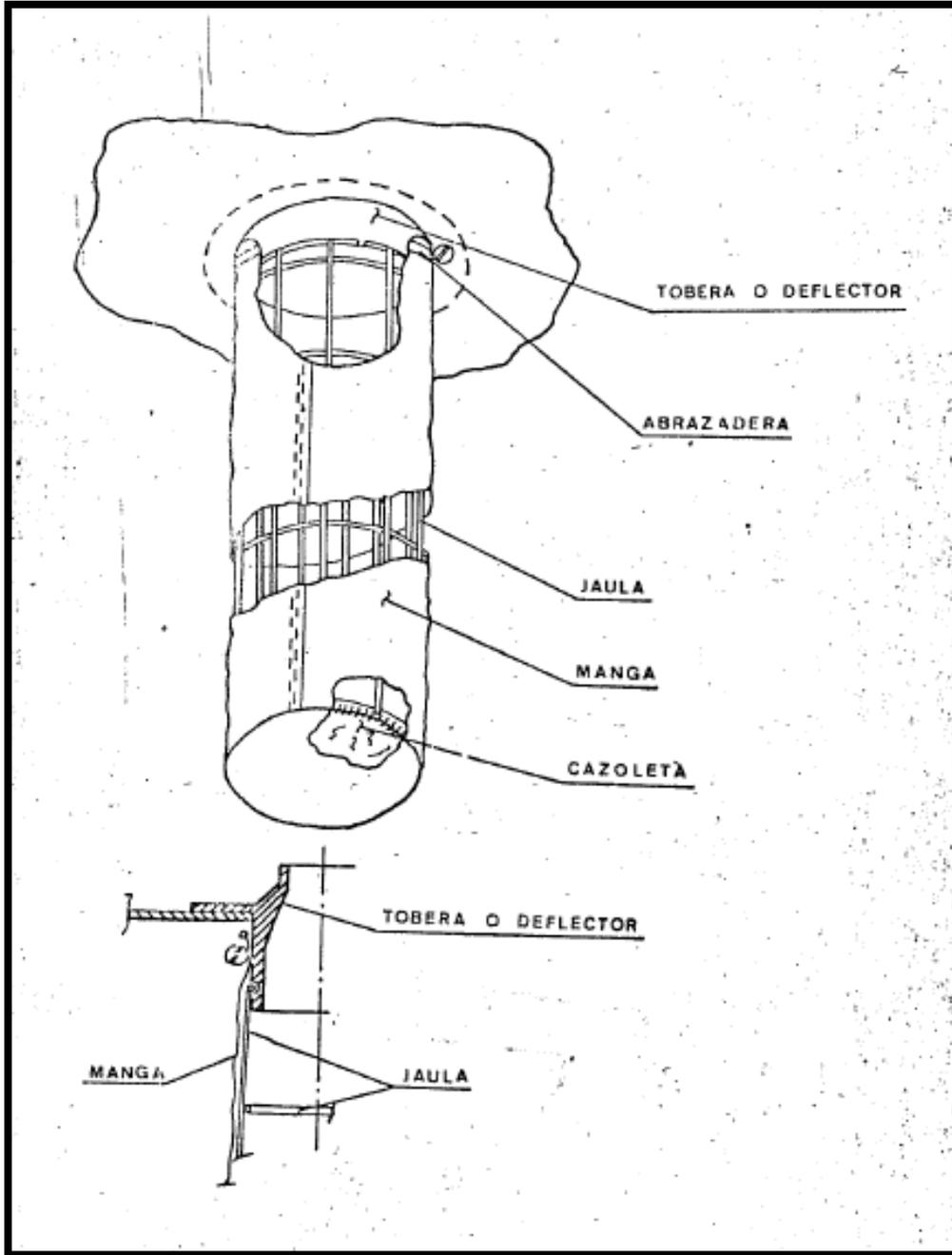


Figura 60. Isométrico de manga de filtro colector de polvos.

Fuente: Oficina Técnica Cemex. (2014).

La figura siguiente muestra la curva de operación de los compresores Sullair TS 32S 300, así como la curva de operación del compresor Sullair TS 32s 400:

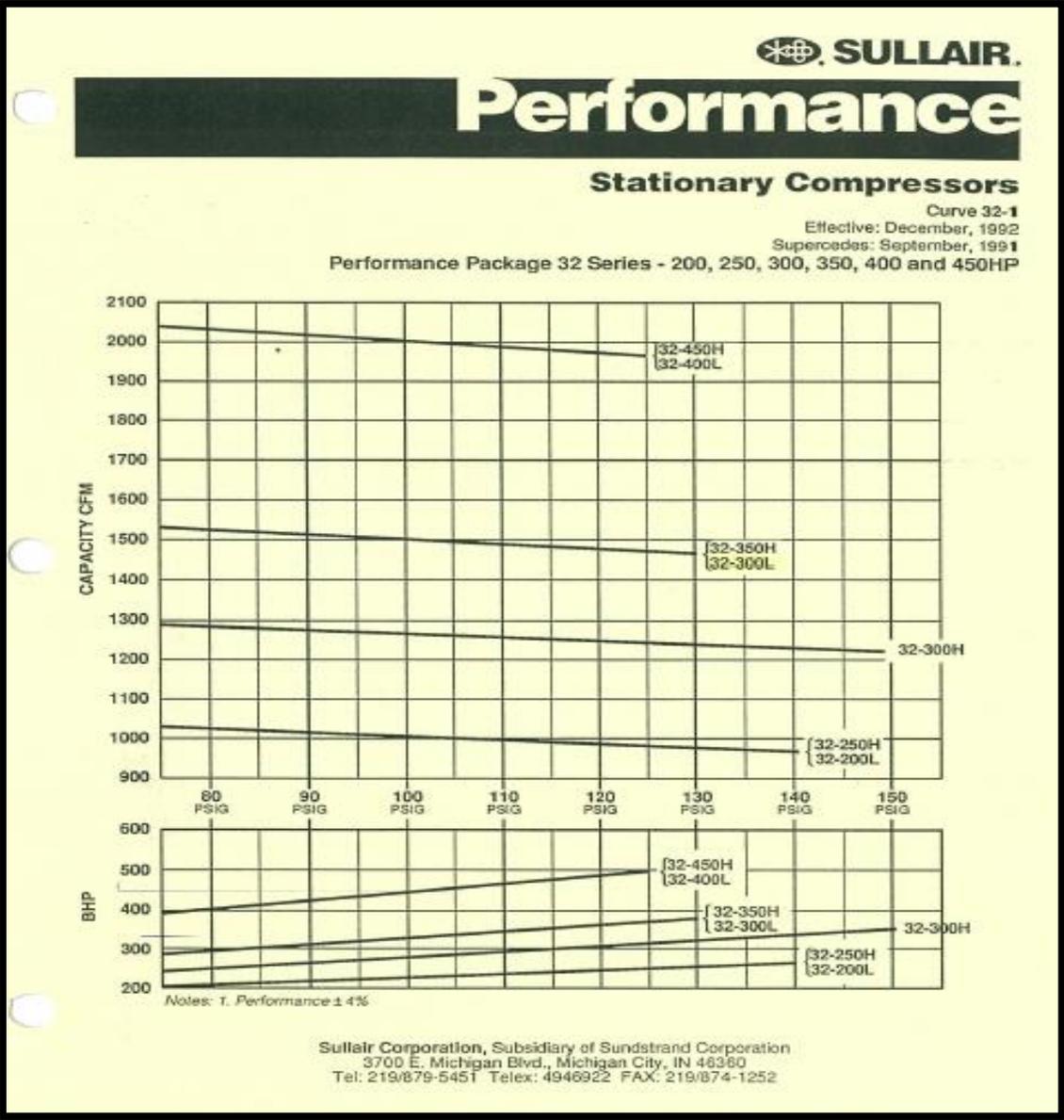


Figura 61. Curva de operación de compresores Sullair.

Fuente: Oficina Técnica Cemex. (2014).

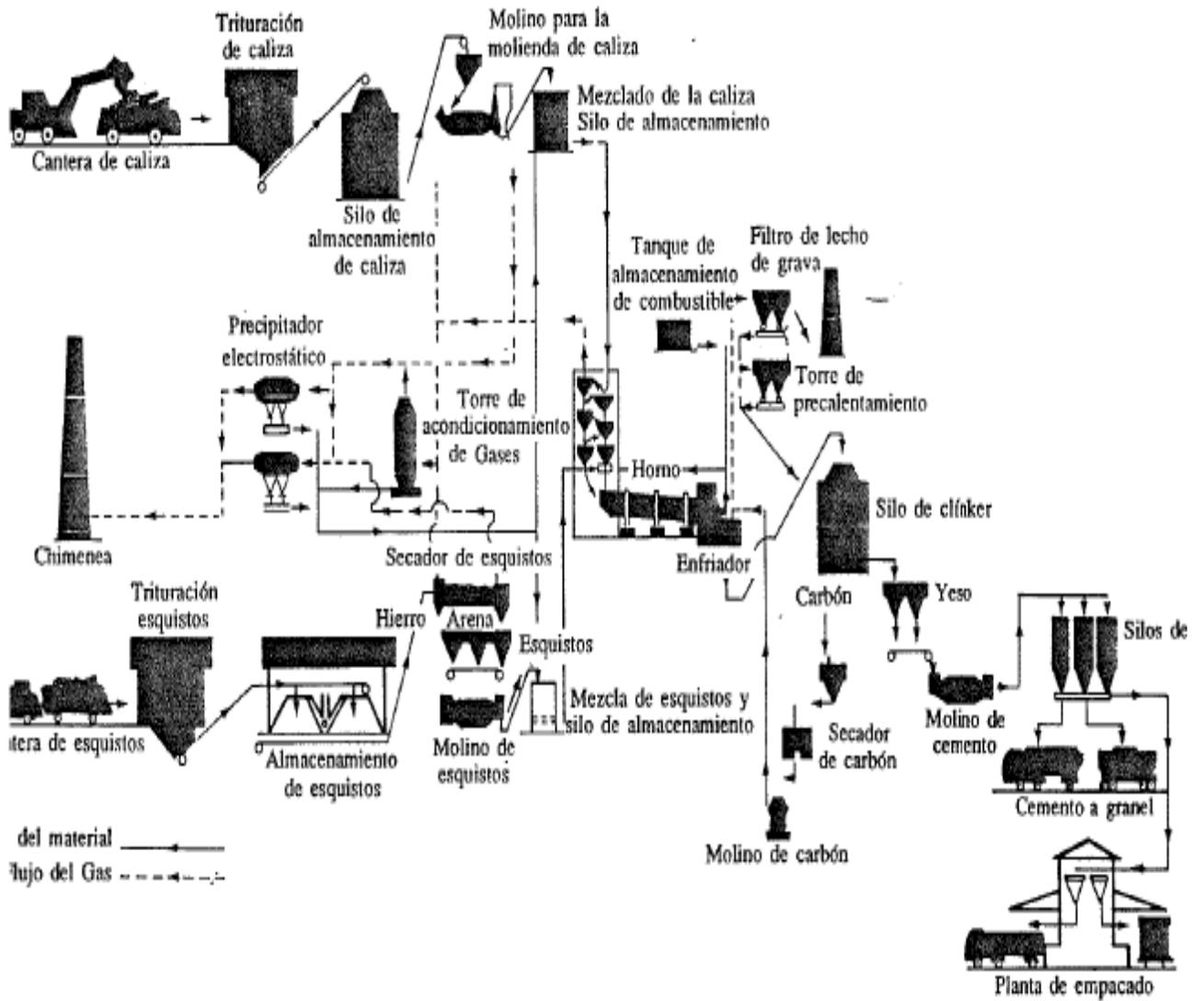


Figura 62. Diagrama de flujo de fabricación de cemento.

Fuente: Oficina Técnica Cemex. (2014).

Apéndices

Apéndice 1. Comprobación de ecuación usada por el software Transair.

ϵ : rugosidad relativa del material. Según el fabricante 0,01mm para efectos de cálculo se usa 0,0125.

D: diámetro del ducto, se analizará uno tubo de 150,0 mm.

NR: número de Reynolds.

V: velocidad de fluido (m/s).

ρ_A : densidad, bajo las condiciones del lugar; se acoge valor de 1,1 kg/m³.

Qd: Caudal de diseño, se usará para esta demostración el tramo A-B de la tubería principal con un valor de 151 520 l/min.

Leq: está dada a un valor de 57,6 m.

μ : viscosidad relativa del aire 1,9x10⁻⁵ kg/(m s).

Paso 1: cálculo de velocidad:

$$V = \frac{151520\left(\frac{l}{\text{min}}\right) \times 100}{4,71 \times 8,2(\text{bar}) \times 150,0^2(\text{mm}^2)} = 17,436 \text{ m/s}$$

Paso 2: Cálculo de número de Reynolds:

$$NR = \frac{0,15(m) \times 17,436\left(\frac{m}{s}\right) \times 1,1\left(\frac{kg}{m^3}\right)}{1,9 \times 10^{-5}\left(\frac{Kg}{ms}\right)} = 151\,417,89$$

Paso 3: Cálculo de factor de fricción ecuación de Colebrook:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\frac{0,0125(mm)}{150(mm)}}{3,7} + \frac{2,51}{151417,89 \sqrt{f}} \right)$$

Despejando la ecuación anterior, se llega a un valor de f : **0,09223**.

Paso 4: Cálculo de caída de presión, ecuación general (Yunus, 2006):

$$\Delta P(bar) = \frac{0,09223 \times 17,436^2 \left(\frac{m^2}{s}\right) \times 1,1 \left(\frac{kg}{m^3}\right) \times 57,6(m)}{2 \times 0,150(m) \times 10^5} = 0,059 bar$$

Cálculo de consumo de filtros de mangas

Paso 1: medir volumen de *manifold*.

Paso 2: Determinar presión inicial.

Paso 3: Medir presión después de descarga.

Paso 4: Tomar el tiempo que dura en regresar a presión inicial.



Figura 63. Medición de presión en filtro de 96 mangas.

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Paso 5: Aplicar ecuación, nótese el cálculo para el filtro de mangas de coque.

$$Q = \frac{0,2138(m^3) \times (6,5 - 5,1)(bar) \times 308,15(K) \times 60(s)}{3(s) \times 7(bar) \times 293,15(K) \times 1(min)} = 6,293 \frac{m^3}{min}$$

En donde:

0,2138 m³: volumen del manifold.

6,5 bar: Presión inicial.

5,1 bar: Presión final.

3s: Tiempo que dura en retomar presión inicial.

308,15 K: Temperatura ambiente.

293,15 K: Temperatura en condiciones nominales.

7 bar: Presión de operación.

Lo anterior sirve para mostrar como el procedimiento experimental usado para calcular el consumo de algunos filtros de mangas, los restantes son tomados de (Quirós, 2008).

Tabla 57. Consumo de filtros de mangas.

GFH	ID	Diámetro(m)	Longitud(m)	Volumen(m3)	Presión antes (bar)	Presión después(bar)	T(s)	Q(Nm3/min)
605	30	0,165	10,000	0,214	6,500	5,100	3,000	6,293
605	44	0,100	1,0000	0,008	6,200	1,900	1,000	2,130
607	6	0,100	1,000	0,008	6,300	1,200	1,000	2,526
370	18	0,150	1,200	0,021	6,400	4,100	7,000	0,439
370	18	0,100	1,700	0,013	6,500	3,000	4,000	0,737
420	20	0,125	2,000	0,024	7,000	5,000	3,000	1,032

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Tramos de tubería principal calculados por software del fabricante Parker



Transair Flow Calculator

ENGINEERING YOUR SUCCESS.

Fecha 02/10/2014

Nombre del proyecto PG José Miguel Bonilla Gutiérrez

Datos del proyecto

Gas	Aire comprimido
Presión	7 bar(g)
Caudal	145.59 Nm ³ /Min
Longitud	30.7 m
Red	Línea recta
Diámetro Transair®	168 mm
Velocidad del gas	15.0 m/s



Pérdida de carga

Tubo Transair®

0.03 bar(g)

Figura 64. Cálculo de Tramo B-C.

Fuente: Elaboración propia. (2014).



Transair Flow Calculator

ENGINEERING YOUR SUCCESS.

Fecha 02/10/2014

Nombre del proyecto PG José Miguel Bonilla Gutiérrez

Datos del proyecto

Gas	Aire comprimido
Presión	7 bar(g)
Caudal	134.39 Nm ³ /Min
Longitud	20 m
Red	Línea recta
Diámetro Transair®	168 mm
Velocidad del gas	13.9 m/s



Pérdida de carga

Tubo Transair®  0.02 bar(g)

Figura 65. Cálculo de Tramo C-D.

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Procedimiento de cálculo de consumo de pistones

$$Q = 2 \times s \times n \times q$$

De la ecuación anterior:

Q: Caudal (litros por minuto).

S: longitud de carrera.

n: Número de carreras por minuto.

q: Caudal de aire por cm de carrera (litros/minuto).

Para calcular q: es necesario calcular el volumen que se desplaza por cada tramo que se desplaza durante el recorrido de una carrera.

Obsérvese la tabla siguiente donde se muestra el cálculo de consumo de dos pistones de 0,03 m de diámetro y carrera de 0,60 m.

Tabla 58. Cálculo de volumen desplazado por ciclo de pistones doble efecto.

Diámetro (m)	Longitud (m)	Volumen (m ³)
0,0300	0,6000	0,0004
0,0300	0,3000	0,0002

Fuente: Propia

De la tabla anterior se conoce q, ahora que es conocido el volumen desplazado por cada carrera solo se debe multiplicar este volumen por la cantidad de ciclos por minutos y así se conoce el caudal consumido por cada pistón.

Fecha 02/10/2014

Nombre del proyecto PG José Miguel Bonilla Gutiérrez

Datos del proyecto

Gas	Aire comprimido
Presión	7 bar(g)
Caudal	59.84 Nm ³ /Min
Longitud	35 m
Red	Línea recta
Diámetro Transair®	168 mm
Velocidad del gas	6.2 m/s



Pérdida de carga

Tubo Transair®



0.01 bar(g)

Figura 66. Cálculo de tramo D-E.

Elaboración propia. (2014).

Fecha 02/10/2014

Nombre del proyecto PG José Miguel Bonilla Gutiérrez

Datos del proyecto

Gas	Aire comprimido
Presión	7 bar(g)
Caudal	54.44 Nm ³ /Min
Longitud	112.38 m
Red	Línea recta
Diámetro Transair®	168 mm
Velocidad del gas	5.8 m/s



Pérdida de carga

Tubo Transair®



Figura 67. Cálculo de tramo E-F.

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Fecha 02/10/2014

Nombre del proyecto PG José Miguel Bonilla Gutiérrez

Datos del proyecto

Gas	Aire comprimido
Presión	7 bar(g)
Caudal	35 Nm ³ /Min
Longitud	287 m
Red	Línea recta
Diámetro Transair®	168 mm
Velocidad del gas	3.6 m/s



Pérdida de carga

Tubo Transair®  0.02 bar(g)

Figura 68. Cálculo de tramo F-G.

Fuente: Elaboración propia. (2014).



Fecha 14/10/2014

Nombre del proyecto PG José Miguel Bonilla Gutiérrez Cemex Costa Rica

Datos del proyecto

Gas	Aire comprimido
Presión	7 bar(g)
Caudal	25 Nm ³ /Min
Longitud	63 m
Red	Línea recta
Diámetro Transair®	100 mm
Velocidad del gas	7.1 m/s



Pérdida de carga

Tubo Transair®	0.02 bar(g)
Tubo de acero nuevo	0.04 bar(g)
Tubo de acero oxidado	0.06 bar(g)

Figura 69. Cálculo tramo G-H.

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Procedimiento de cálculo de efecto térmico

Las condiciones ambientales de Cemex son monitoreadas por un laboratorio implementado por la Universidad de Costa Rica, con esta virtud es posible conocer la temperatura ambiental máxima y mínima; ahora bien, como se describió previamente que se determinó cuánta temperatura sufría el puente de tubos de la red principal, se logra conseguir un valor de diferencial de temperatura de **283,05 K**.

Ahora bien, el procedimiento de cálculo de la expansión sigue la siguiente ecuación:

$$\Delta L(mm) = 0,5 \times L(m) + 0,024 \times L(m) \times \Delta T(^{\circ}C)$$

Donde: L es la longitud de la tubería en metros.

ΔL : Es la elongación o contracción que sufrirá la tubería.

Finalmente, se expone el valor tabulado del cálculo de la expansión de los diferentes tramos de la red principal.

Tabla 59. Expansión calculada para los distintos tramos de la red principal.

Tramo	ΔL (mm)
A-B	39,83
B-C	11,58
C-D	8,85
D-E	22,13
E-F	76,99
F-G	193,99
G-H	41,31

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Ahora como se conoce este efecto, es conveniente que se incorporen dentro del recorrido de tuberías juntas de expansión, las juntas que se deciden usar son Garlock, específicamente el tipo Garflex 810.



Figura 70. Juntas de expansión que se deciden instalar.

Fuente: Garflex. (2014).

La selección de este tipo de juntas se hace en función de la capacidad que tienen para soportar elongación y la operativa. En la figura siguiente se muestran los atributos de este tipo de junta de expansión:

Type Movement	Movement	
	Inch	mm
Compression	1	25
Elongation	1	25
Transverse Deflection (at recommended installed position)	± 1	± 25

Figura 71. Datos técnicos de la junta de expansión escogida.

Fuente: Garflex. (2014).

Cotización de tubería



Novatec Industrial S.A.
Cédula Jurídica 3-101-280782
Radial Santa Ana - Belen Costa Rica.
Tel: (506) 2239 1111 Fax: (506) 2239 1212
e-mail info@novatec.cr www.novatec.cr

CLIENTE: Cemex Costa Rica S.A
ATENCIÓN: Johnny Garay
Tel: 2201-2000 ext11924 johnnyalberto.garay@cemex.com
FECHA: 15/10/2014

Oferta de Venta
No. SAP 5658

#	CANT.	CODIGO	DESCRIPCION	U.M.	PRECIO UNIT	%DESC	PRECIO	TOTAL
16	9.000	550-0367-RED	100Mm (4 In Id) Tubería (L= 6Mt): 6063T5 Aluminio	Unid	343.2	0.00	USD 343.200	USD 3,088.8
17	13.000	550-0335-RED	100Mm (4 In Id) Union: Calculated	Unid	63	0.00	USD 63.000	USD 819
18	5.000	550-0343-RED	100Mm (4 In Id) 90 Angulo de Codo	Unid	148.85	0.00	USD 148.850	USD 744.25
19	2.000	550-0348-RED	100Mm (4 In Id) 45 Angulo de Codo	Unid	194.79	0.00	USD 194.790	USD 389.58
20	3.000	550-0345-RED	100Mm (4 In Id) Te Igual	Unid	194.61	0.00	USD 194.610	USD 583.83
21	8.000	550-0353-RED	100Mm (4 In Id) Para 40Mm (1 1/2 In Id) Te de Reduccion	Unid	146.3	0.00	USD 146.300	USD 1,170.4
22	3.000	550-0354-RED	100Mm (4 In Id) Para 63Mm (2 1/2 In Id) Te de Reduccion	Unid	161.7	0.00	USD 161.700	USD 485.1
23	8.000	550-0340-RED	100 Mm (4 In Id) Bracket Reductor	Unid	104.53	0.00	USD 104.530	USD 836.24
24	1.000	550-0372-RED	100Mm (4 In Id) Flanged Valvula de Mariposa	Unid	314.99	0.00	USD 314.990	USD 314.99
25	1.000	550-0370-RED	100Mm (4 In Id) Flanged Valvula de Bola	Unid	474.08	0.00	USD 474.080	USD 474.08
26	2.000	550-0358-RED	100Mm (4 In Id) Flange Adaptador:	Unid	302.4	0.00	USD 302.400	USD 604.8
27	2.000	550-0305-RED	100Mm (4 In Id) Empaque Para Flange Calculated	Unid	6	0.00	USD 6.000	USD 12
28	2.000	550-0307-RED	Bolsa Con Tornillos P/Brida. Bolsa de 8 Unds Cal	Unid	26.89	0.00	USD 26.890	USD 53.78
29	12.000	550-0314-RED	100Mm (4 In Id) Tubería Bracket de Montaje	Unid	13.13	0.00	USD 13.130	USD 157.56
30	8.000	550-0045-RED	40Mm (1 1/2 In Id) Tubería (L=6Mt): 6063T5 Alumin	Unid	123.24	0.00	USD 123.240	USD 985.92
31	8.000	550-0102-RED	40Mm (1 1/2 In Id) Valvula	Unid	115	0.00	USD 115.000	USD 920
32	8.000	550-0161-RED	40Mm (1 1/2 In Id) Tapon Final	Unid	39.86	0.00	USD 39.860	USD 318.88
33	8.000	550-0139-RED	1 1/2 In Npt Macho Conectar Para 40Mm (1 1/2 In Tub	Unid	61.64	0.00	USD 61.640	USD 493.12
							SUBTOTAL	USD 119,440.13
							DESC	USD 17,916.02
							N VENTAS	USD 13,198.13
							TOTAL	USD 114,722.24

Condiciones de la oferta	Contacto	Javier Garro Sanchez
--------------------------	----------	----------------------

Observaciones:

Tiempo de Entrega:

Validez de la Oferta: 15/11/2014

Forma de Pago: Crédito 60 días



Figura 72. Cotización de tubería transair.

Fuente: Novatec. (2014).



Novatec Industrial S.A.
 Cédula Jurídica 3-101-280782
 Radial Santa Ana - Belen Costa Rica.
 Tel: (506) 2239 1111 Fax: (506) 2239 1212
 e-mail info@novatec.cr www.novatec.cr

CLIENTE: Cemex Costa Rica S.A
 ATENCIÓN: Johnny Garay
 Tel: 2201-2000 ext11924 johnnyalberto.garay@cemex.com
 FECHA: 15/10/2014

Oferta de Venta
 No. SAP 5658

#	CANT.	CODIGO	DESCRIPCION	U.M.	PRECIO UNIT	%DESC	PRECIO	TOTAL
1	80.000	550-0368-RED	Tubo de aluminio azul 168mm (6in) 6 mts	Unid	680	0.00	USD 680.000	USD 54,400
2	160.000	550-0336-RED	Union 168mm (6 In Id)	Unid	165	0.00	USD 165.000	USD 26,400
3	36.000	550-0336-RED	Union 168mm (6 In Id)	Unid	165	0.00	USD 165.000	USD 5,940
4	5.000	550-0322-RED	168Mm (6 In Id) Codo	Unid	208	0.00	USD 208.000	USD 1,040
5	5.000	600-0260-CTR	168Mm (6 In Id) 45 Codo	Unid	234	0.00	USD 234.000	USD 1,170
6	1.000	550-0323-RED	168Mm (6 In) Equal Tee	Unid	338	0.00	USD 338.000	USD 338
7	6.000	550-0326-RED	168Mm (6 In) A 100Mm (4 In) Tee Reductora	Unid	286	0.00	USD 286.000	USD 1,716
8	30.000	550-0343-RED	168Mm (6 In) Reducing Brkt 1-1/2 In Npt Female Thread	Unid	119.6	0.00	USD 119.600	USD 3,588
9	7.000	550-0410-RED	168Mm (6") Reducing Brkt 2" Npt Female Thread	Unid	119.6	0.00	USD 119.600	USD 837.2
10	1.000	550-0329-RED	168Mm (6 In) To 100Mm (4 In) In-Line Reducer	Unid	254.8	0.00	USD 254.800	USD 254.8
11	3.000	550-0373-RED	168Mm (6 In Id) Flanged Valvula de Mariposa C/Tor	Unid	445	0.00	USD 445.000	USD 1,335
12	28.000	550-0328-RED	168Mm (6 In) Ansil Flange Adapter: Calculated	Unid	208	0.00	USD 208.000	USD 5,824
13	28.000	550-0306-RED	168Mm (6 In) Calculated Empaque Para Flange	Unid	18	0.00	USD 18.000	USD 504
14	28.000	550-0308-RED	Bolsa Con Tornillos P/Brida. Bolsa de 8 Unds Cal	Unid	38.6	0.00	USD 38.600	USD 1,080.8
15	160.000	550-0298-RED	168Mm (6 In) Pipe Mounting Bracket (Rubber Insula	Unid	16	0.00	USD 16.000	USD 2,560
							SUBTOTAL	USD 119,440.13
							DESC	USD 17,916.02
							IV VENTAS	USD 13,198.13
							TOTAL	USD 114,722.24

Condiciones de la oferta	Contacto	Javier Garro Sanchez
--------------------------	----------	----------------------

Observaciones:

Tiempo de Entrega:

Validez de la Oferta: 15/11/2014

Forma de Pago: Crédito 60 días



Figura 73. Cotización de tubería Transair.

Fuente: Novatec. (2014).

Muestreo de operación de compresores

Tabla 60. Muestreo distintos días al compresor Sullair # 1.

Hora	Datos de Corriente (A)			
12:00	325	340	300	0
13:00	350	360	300	315
14:00	300	325	300	298
15:00	350	350	300	300
16:00	350	300	300	301
17:00	312	300	300	314
18:00	340	300	325	312
19:00	390	290	325	313
20:00	325	310	290	334
21:00	325	305	290	319
22:00	325	305	300	320
23:00	310	305	300	329
00:00	300	305	300	316
01:00	305	305	300	301
02:00	300	305	300	318
03:00	300	305	300	314
04:00	296	305	290	315
05:00	300	305	305	314
06:00	300	300	300	332
07:00	300	305	300	331
08:00	300	305	0	315
09:00	325	305	0	311
10:00	320	305	0	311
11:00	355	305	0	311
12:00	350	340	0	309

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Tabla 61. Muestreo distintos días al compresor Sullair # 2.

Hora	Datos de corriente (A)			
12:00	0	0	0	0
13:00	0	0	0	0
14:00	0	0	0	0
15:00	0	0	0	0
16:00	0	0	0	0
17:00	0	0	0	0
18:00	0	0	0	0
19:00	300	0	0	0
20:00	300	0	0	0
21:00	350	0	0	0
22:00	298	0	0	0
23:00	200	0	0	0
00:00	200	0	0	0
01:00	298	0	0	0
02:00	298	0	0	0
03:00	298	0	0	0
04:00	298	0	0	0
05:00	298	0	0	0
06:00	298	0	0	0
07:00	298	0	0	0
08:00	288	0	300	0
09:00	300	0	300	0
10:00	300	0	300	0
11:00	298	0	300	0
12:00	300	0	0	0

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Tabla 62. Muestreo de distintos días al compresor Sullair # 3.

Hora	Datos de corriente(A)			
12:00	60	0	125	0
13:00	60	0	125	0
14:00	60	0	125	0
15:00	60	0	125	0
16:00	60	0	0	0
17:00	60	0	0	0
18:00	60	0	0	0
19:00	60	0	0	0
20:00	0	0	0	0
21:00	0	0	0	0
22:00	0	0	0	0
23:00	0	0	0	0
00:00	0	0	0	0
01:00	0	0	0	0
02:00	0	0	0	0
03:00	0	0	0	0
04:00	0	0	0	0
05:00	0	0	0	0
06:00	0	0	0	0
07:00	0	0	0	0
08:00	0	0	0	0
09:00	0	0	0	0
10:00	0	0	0	0
11:00	0	0	0	0
12:00	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia. (2014).

Tabla 63. Muestreo de distintos días al compresor Sullair # 4.

Hora	Datos de corriente (A)			
12:00	325	360	360	412
13:00	350	360	360	374
14:00	325	360	360	367
15:00	350	370	360	370
16:00	360	370	360	380
17:00	350	370	360	389
18:00	320	360	360	383
19:00	0	360	360	386
20:00	325	360	360	394
21:00	325	360	360	426
22:00	325	360	360	418
23:00	320	360	360	408
00:00	320	360	360	413
01:00	320	360	360	401
02:00	320	360	360	386
03:00	320	360	360	405
04:00	310	360	360	397
05:00	310	360	360	400
06:00	320	300	360	394
07:00	320	300	380	422
08:00	320	300	380	422
09:00	320	300	380	399
10:00	320	300	380	390
11:00	320	300	380	375
12:00	320	300	380	379

Fuente: Elaboración Propia (2014).



Figura 74. Medición de consumo en combustibles alternos.

Fuente: Elaboración propia. (2014).



Figura 75. Medición de presión en puntos a la salida del acumulador cuarto compresores 1.

Fuente: Elaboración propia. (2014).

PLANOS

Los planos del proyecto se pueden consultar en carpeta adjunta al disco entregado.

Hoja propuesta para detección de fugas

DETECCIÓN DE FUGAS

REALIZADO POR:

SECTOR DE INSPECCIÓN:

FECHA:

SE
DETECTA
FUGA

NO SE
DETECTA
FUGA

FORMA DE FUGA:

Filtro dañado

Corte Lineal

Corte Circular

Acople

SE PUEDE CORREGIR DE INMEDIATO

SI

NO

Solicite
materiales

Corrija

Reporte

Reporte

Solicite
ayuda

Corrija