

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE



FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

**TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
EN MECATRÓNICA**

TEMA:

**“OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO DE LA PLANTA
INDUSTRIAL UNACEM”**

AUTOR: ERIC OSWALDO GUERRA DÁVILA

DIRECTOR: Ing. CHRISTIAN RENÁN VÁSQUEZ FALCONY MSc.

Ibarra, Septiembre 2019



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	DE	1004004337	
APELLIDOS Y NOMBRES:	Y	Guerra Dávila Eric Oswaldo	
DIRECCIÓN:		Ibarra, Los Pinos 1-22 y Quilago	
EMAIL:		eoguerrad@utn.edu.ec	
TELÉFONO FIJO:		06 2539261	TELÉFONO MÓVIL: 0991959173

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	“Optimización del sistema de aire comprimido de la planta industrial UNACEM”
AUTOR (ES):	Eric Oswaldo Guerra Dávila
FECHA: DD/MM/AAAA	24/09/2019
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero en Mecatrónica
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. Christian Renán Vásquez Falcony

2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 24 días del mes de Septiembre de 2019

EL AUTOR:

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Eric Guerra", with a horizontal line extending to the right.

Nombre: Eric Oswaldo Guerra Dávila

DECLARACIÓN

Yo, **Eric Oswaldo Guerra Dávila**, declaro bajo juramento que el trabajo aquí escrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

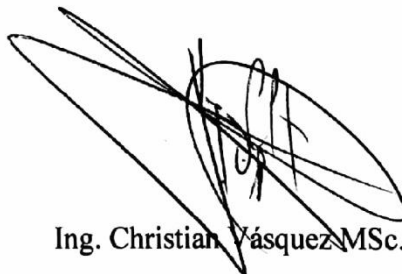
A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Eric Oswaldo Guerra Dávila', is written over a solid horizontal line.

Nombre: Eric Oswaldo Guerra Dávila

Cédula: 1004004337

CERTIFICACIÓN

En calidad de tutor del trabajo de grado titulado: “OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO DE LA PLANTA INDUSTRIAL UNACEM”, certifico que el presente trabajo fue desarrollado por el señor Eric Oswaldo Guerra Dávila, bajo mi supervisión.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'C. Vásquez', is written over a large, light-colored oval shape.

Ing. Christian Vásquez MSc.

DIRECTOR

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a:

Mis padres Frank y Matilde, ya que, con su amor, sacrificio y apoyo incondicional han logrado inculcar en mi un ejemplo de disciplina y esfuerzo para alcanzar las metas que me plantee; y con sus enseñanzas que permitieron en mi forjar un pensamiento crítico y objetivo.

Mis hermanos, quienes han permanecido a mi lado en todo momento, motivándome a continuar, consiguiendo juntos superar circunstancias desfavorables.

Mi abuelita Fanny, que con su carisma y alegría ha mostrado sin falta su apoyo a la familia, siendo un pilar fundamental para el crecimiento personal mío y de cada uno de mis hermanos. En general a toda mi familia, pues, aun con diferencias ha sabido sobrellevarlas mostrando empatía y soporte cuando así se ha requerido.

Katherine Chuquín quien me ha brindado su amor desinteresado, confianza e incentivación a seguir adelante, mostrándome que los problemas no son eternos.

Agradecimientos

“La gratitud no solo es la más grande de las virtudes, sino que engendra todas las demás”
-Cicerón

Primeramente, agradezco a UNACEM, pues, me brindaron todo el apoyo necesario para el desarrollo de este proyecto, además de la apertura para poder realizarlo en sus instalaciones.

A Ricardo Urrutia, quien me apoyo constantemente aportando conocimientos importantes en el desarrollo de este trabajo de grado, brindó la confianza y el consentimiento para que este proyecto pueda ser realizado.

A Christian Vásquez, quien como tutor demostró el interés, gozo y entrega a su trabajo, apoyando fuertemente a obtener los mejores resultados, siempre con el compromiso de excelencia.

A mis asesores quienes discernieron las alternativas para el desarrollo de este trabajo y supieron direccionar sus enseñanzas al conocimiento necesario para esta investigación.

En general a todas las personas que mostraron su empatía a lo largo de mi carrera, y han hecho que este trabajo se realice con éxito.

Resumen

La eficiencia energética es con frecuencia un tópico pocamente valorado en las industrias, pero ofrece primacías ampliamente aprovechables.

Este estudio se centró específicamente en la optimización energética del sistema de aire comprimido de la planta industrial UNACEM, mismo que no era tomado en cuenta como un recurso importante en la línea de producción. Para lo cual se plantearon algunas propuestas de mejora para el sistema sin recurrir a modificaciones drásticas del mismo ni alternativas costosas.

Considerando como objeto la optimización energética en sistemas de aire comprimido, se adoptaron métodos teóricos, empíricos y estadísticos, consiguiendo así establecer las bases necesarias para una auditoria energética apropiada. Puntualizando lo innecesario de realizar cambios radicales en un sistema sin un reconocimiento de todas las variables que componen al mismo.

Se presentaron opciones apoyadas en la tecnología como automatización o uso de dispositivos que permiten tener un sistema óptimo, eficaz y eficiente. Asimismo, se presentaron beneficios respecto a las propuestas de optimización.

Abstract

Energy efficiency is often a poorly valued topic in industries; however, it offers widely usable primacies.

This study focused specifically on the energy optimization of a compressed air system that was not considered into as an important resource in the production line. Some improvement proposals for the system were applied without resorting to drastic modifications of it or costly alternatives.

Considering the object of energy optimization in compressed air systems, theoretical, empirical and statistical methods were adopted, thus establishing the necessary foundations for a correct energy audit. Point out the unnecessary to make radical changes in a system without a recognition of all the variables that make up the same.

Options supported by technology were presented, such as automation or the use of devices that allow for an optimal, efficient and efficient system. Likewise, benefits were presented regarding the optimization proposals.

Tabla de Contenidos

Autorización De Uso Y Publicación A Favor De La Universidad Técnica Del Norte.....	II
1. Identificación De La Obra.....	II
2. Constancias.....	III
Declaración	IV
Certificación	V
Capítulo I.....	15
Descripción Del Problema	15
Objetivo General.....	16
Objetivos Específicos.....	16
Antecedentes	17
Justificación	18
Alcance	19
Capítulo II	20
Marco Teórico.....	20
2.1 UNACEM.....	20
2.2 AIRE COMPRIMIDO	20
2.2.1 Compresión	20
2.2.1.1 Compresores.....	20
2.2.2 Magnitudes Fundamentales.....	20
2.3 P&ID	21
2.4 PROBLEMA DE TRANSBORDO.....	21
2.5 MÉTODO DE MONTECARLO	21
2.6 EFICIENCIA ENERGÉTICA.....	21
2.7 OPTIMIZACIÓN DE LA ENERGÍA	22
2.8 AUDITORÍA ENERGÉTICA	22
Capítulo III.....	23
Metodología	23
3.1 MÉTODOS TEÓRICOS	23
Análisis-Síntesis.....	23
Inducción-Deducción.....	23

3.2	MÉTODOS EMPÍRICOS.....	23
	Análisis Documental.....	23
	Métodos Estadísticos	23
3.3	RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	23
3.4	PREPARACIÓN DE BACKGROUD DE LA PLANTA	24
3.5	IDENTIFICACIÓN DE LA DEMANDA DE AIRE COMPRIMIDO	24
3.6	ANÁLISIS DE DATOS	24
3.7	PROPUESTAS DE OPTIMIZACIÓN.....	24
Capítulo IV		24
Resultados		24
4.1	RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	25
4.2	PREPARACIÓN DE BACKGROUD DE LA PLANTA	31
4.3	IDENTIFICACIÓN DE LA DEMANDA DE AIRE COMPRIMIDO	35
4.4	ANÁLISIS DE DATOS	51
4.5	PROPUESTAS DE OPTIMIZACIÓN.....	59
	4.5.1 Eliminación De Flautas De Aire (Chisquetes)	59
	4.5.2 Optimización De Compresores	61
	4.5.2.1 Medición De Caudal Con Flujómetro	61
	4.5.2.2 Medición De Caudal Calculado	61
	4.5.2.3 Automatización De Compresores.....	62
	4.5.3 Cerrar Todo El Sistema De Aire Comprimido Como Un Anillo.....	64
Capítulo V		65
Conclusiones Y Recomendaciones		65
5.1	CONCLUSIONES	65
5.2	RECOMENDACIONES.....	66
Referencias.....		67
	ANEXO 1 P&ID UNACEM.....	71
	ANEXO 2 LAYOUT ACTUALIZADO.....	75
	ANEXO 3 P&ID.....	77
	ANEXO 4 INFORME URKUND.....	88

Lista de tablas

Tabla 3.1. Información global de compresores.....	29
Tabla 3.2. Información de mantenimiento típico.....	29
Tabla 3.3. Capacidad de oferta por cuarto de compresores.	30
Tabla 3.4. Consumo de aire comprimido de los cañones de aire de la línea 2.	36
Tabla 3.5. Consumo de aire comprimido de los golpeadores neumáticos.....	39
Tabla 3.6. Consumo de aire comprimido Dosificador de Harina Cruda.....	40
Tabla 3.7. Datos de colectores de polvo.	43
Tabla 3.8. Datos de colectores de polvo con información completa.	47
Tabla 3.9. Colectores agrupados por áreas con sus consumos.....	48
Tabla 3.10. Oferta y demanda del sistema de aire comprimido.....	52
Tabla 3.11. Escenarios de consumo en CFM.....	53
Tabla 3.12. Probabilidades de consumo/Método de Montecarlo.....	53
Tabla 3.13. Oferta de producción dada por los compresores escenario nominal.....	54
Tabla 3.14. Demanda de las áreas en escenario nominal.....	55
Tabla 3.15. Demanda de las áreas en escenario pesimista.....	57
Tabla 3.16. Demanda de las áreas en escenario optimista.....	58
Tabla 3.17. Oferta de producción dada por los compresores escenario optimista.....	58
Tabla 3.18. Costos por ventiladores.....	60
Tabla 3.19. Costos por chisguetes.....	60
Tabla 3.20. Compresor modulado.....	63

Lista de figuras

Figura 3.1. Comparación corriente de los compresores con presión de Cemento 2.	25
Figura 3.2. Esquema ejemplo de flujograma planta industrial UNACEM.	26
Figura 3.3. SCADA Precalentador y enfriadora.	27
Figura 3.4. Colector de polvo Edificio3 (M.Primas Cementos).	27
Figura 3.5. Dosificador de Harina Cruda.	28
Figura 3.6. Spray de agua Precalentador 1.	28
Figura 3.7. Cañones de aire Precalentador 2.	28
Figura 3.8. SCADA para monitoreo de cuartos de compresores.	32
Figura 3.9. Tuberías de aire comprimido.	33
Figura 3.10. Fuga visible en la tubería.	33
Figura 3.11. Layout con tuberías de aire comprimido y pulmones.	34
Figura 3.12. P&ID del sistema de aire comprimido.	34
Figura 3.13. Funcionamiento cañones de aire carga-descarga. [18]	35
Figura 3.14. Secuencia de funcionamiento cañones de aire Enfriadora.	35
Figura 3.15. Hoja de datos golpeadores neumáticos. [19]	38
Figura 3.16. Hoja de datos Dosificador de Harina Cruda. [20]	39
Figura 3.17. Flautas de aire.	40
Figura 3.18. Calibrador de presión.	40
Figura 3.19. Consumo de fuga según CEACSA. [21]	41
Figura 3.20. Consumo de fuga según TLV. [22]	41
Figura 3.21. Hoja de datos Colector de polvo 216DC01. [23]	42
Figura 3.22. Regresión con datos de los colectores de polvo.	47
Figura 3.23. Problema de transbordo.	51
Figura 3.24. Histograma Método de Montecarlo.	53
Figura 3.25. Demanda abastecida en el escenario Nominal.	55
Figura 3.26. Conclusiones auditoria KAESER Compresores 16-11-2018. [24].....	56
Figura 3.27. Demanda abastecida en el escenario Pesimista	57
Figura 3.28. Diferencia entre escenario optimista y pesimista en oferta de aire comprimido	59
Figura 3.29. Ejemplo funcionamiento de un compresor carga/descarga en una hora.	62

Figura 3.30. Costo compresor modulando y sin modular. 63
Figura 3.31. Anillo sistema de aire comprimido cerrado..... 64

CAPÍTULO I

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Desde la década de los setenta se agudiza el proceso de internacionalización de la economía mundial, lo que genera efectos contradictorios en las economías nacionales y transforma radicalmente las relaciones laborales, el empleo y el trabajo. [1]

Los países latinoamericanos han sometido sus economías a los imperativos de la globalización, que actualmente avanza a pasos agigantados. Este proceso sigue diferentes vías, ritmos y mecanismos. Frente a ello, en el sector industrial, las empresas buscan alternativas para ser competitivos en un mundo globalizado. En este contexto buscan optimizar los distintos procesos productivos. Entre otros propósitos, aumentar su eficiencia y reducir sus costos; así como conseguir una posición competitiva en el mercado. [1] [2]

En Imbabura están asentadas algunas industrias. Entre ellas, “UNACEM”, una de las industrias cementeras más grandes de la región 1 y del Ecuador. Entre sus objetivos empresariales busca la optimización y reducción de costos a nivel energético. Debido a que una de las principales fuentes de energía es el aire comprimido, la empresa requiere encontrar una alternativa de reducción energética.

El aire comprimido dentro de “UNACEM” es utilizado en muchas de sus áreas: Molienda de Crudo, Hornos y Enfriadores, Molinos de Cemento, entre otras edificaciones. No obstante, al requerimiento de reducción energética, se encuentra en trabajo el desarrollo de un plan de optimización del sistema de aire comprimido. Por otra parte, se evidencia poco interés en las aplicaciones en uso de aire comprimido, debido a que UNACEM es una planta fabricante de cemento, esta energía no es crítica en el proceso. De esta manera todavía se mantiene en la producción industrial un costo elevado.

La problemática planteada genera varios efectos entre los que evidencian: utilización de aire comprimido para el enfriamiento de sus motores y puntos calientes; falta de atención en la relación entre la generación de aire comprimido y el gasto que realiza la planta; en ocasiones, presencia de presiones superiores a la necesaria, puesto que empíricamente se pone en funcionamiento más compresores que los realmente necesarios, lo cual muchas de las ocasiones no es la solución; los secadores no se encuentran operativos, debido a una falla en el

dimensionamiento del sistema y no poseen un plan de control para la realización de la purga de los tanques y de los compresores; limitado nivel de análisis de fugas en las tuberías y accesorios.

Un análisis energético permitirá a la Gerencia de Optimización reducir costos por generación de aire comprimido, optimizar su sistema redistribuyendo los recursos existentes.

OBJETIVO GENERAL

Diseñar una propuesta de optimización del sistema de aire comprimido de la planta industrial “UNACEM”.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir los fundamentos teórico-metodológicos que sustentan la optimización de los sistemas de aire comprimido de una planta industrial.
- Diagnosticar la situación inicial sobre la capacidad, nodos del sistema y demanda de aire comprimido de la planta industrial.
- Generar alternativas de optimización del sistema de aire comprimido de la planta industrial.

ANTECEDENTES

En agosto de 2013, por parte de la empresa Kaeser Kompressoren, se realizó una auditoria energética, enfocada al sistema de aire comprimido. Se evaluó tanto la integridad física de dicho sistema como el consumo de aire comprimido dividido por áreas. Además, se valoró el gasto de energía con respecto al dinero empleado. Al final, se sugirieron algunas propuestas para aumentar la eficiencia del sistema actual para minimizar el consumo energético y lograr reducir el costo en la producción de aire comprimido.

En 2018, la misma empresa Kaeser Kompressoren, realizó un análisis de la demanda de aire comprimido en UNACEM. En esta ocasión evaluó la demanda de aire requerida por la planta en relación con la oferta disponible por los compresores. Se evaluó tanto en flujo (Pie cúbico por minuto CFM) como en presión (Libra por pulgada cuadrada PSI). Con ello se pudo conocer la existencia de un consumo de aire comprimido superior a la capacidad ofertada por los compresores. Se recomendó cubrir la demanda adicional y mantener una presión constante mediante la compra de compresores con mayor eficiencia.

En noviembre de 2011 se muestra la revisión de la norma UNE-EN ISO 50001 “Sistemas de gestión de la energía: Requisitos con orientación para su uso”, la cual provee de herramientas para mejorar el desempeño energético. Con esta norma se incluye la eficiencia energética, el uso y consumo de energía, además de reducir el impacto ambiental en la utilización de diferentes tipos de energías.

No obstante, a lo expresado en relación con las normas, éstas han ido mejorando su validez y confiabilidad. Hoy se cuenta con la norma ISO 11011 “Compressed air-Energy efficiency-Assessment” misma que establece los requisitos para llevar a cabo e informar los resultados de una evaluación de un sistema de aire comprimido. Con ello se puede generar un reporte con las oportunidades de optimización dentro del sistema.

JUSTIFICACIÓN

La globalización económica obliga a las empresas a buscar alternativas de optimización, que permitan que los diferentes procesos de una industria tengan un funcionamiento que garantice el correcto empleo de los recursos. Por otra parte, las empresas buscan también la reducción de costos a la par de obtener un funcionamiento cercano al ideal de sus equipos. En este contexto, con los conocimientos, habilidades y procedimientos aprendidos como estudiante de la carrera de Ingeniería Mecatrónica, fue posible abordar una investigación, que aporte con soluciones concretas a los requerimientos de la empresa y del área industrial, en particular.

La optimización de sistemas de energía es un pilar fundamental en el desarrollo y crecimiento de una empresa, tanto en el área económica, como en la laboral, ya que permite un mejor desempeño de los procesos. En este aspecto, con base a la formación en mecatrónica recibida en la Universidad Técnica del Norte, se pudo aportar con soluciones tecnológicas a requerimientos puntuales de optimización energética de la empresa UNACEM, una de las más grandes de la región 1 del Ecuador.

Realizar un estudio de este tipo generaría interés por parte de la industria nacional, pues la optimización de procesos es un tema con una acogida en crecimiento dentro de los planes de desarrollo empresarial en Ecuador. De ahí, la relevancia de la propuesta que se plantea. La propuesta podría generar beneficios al contribuir al mejoramiento a nivel macro y una considerable reducción de costos por energía. Por otra parte, para la UTN representa una oportunidad para que sus estudiantes demuestren los conocimientos, habilidades y actitudes desarrolladas en sus aulas, y de esta manera, establecer un vínculo fortalecido de relación entre la academia y el área industrial, lo cual resultaría de alto impacto dentro de la formación de ingeniería.

La propuesta de estudio para la optimización del sistema de aire comprimido fue factible de realizar ya que no representó grandes inversiones económicas. Por otra parte, se tuvo el interés y posterior colaboración de “UNACEM”. De igual manera se contó con la bibliografía y conocimientos suficientes para realizar un correcto plan de optimización. Al final, con este estudio, se logrará la necesaria vinculación de los conocimientos desarrollados a lo largo de la carrera, con la práctica en un ambiente real.

ALCANCE

El estudio y la optimización de aire comprimido se realizó con el propósito de mejorar las condiciones de producción de las áreas de despacho, molinos de cemento, crudo, hornos y enfriadores de la planta Industrial “UNACEM”.

El estudio se orientó al:

Estudio del estado del arte sobre optimización de energía, enfocada al perfeccionamiento de los sistemas neumáticos.

Revisión del estado actual del sistema de aire comprimido de la planta industrial, enfocándose en las capacidades de producción y demanda de aire comprimido, además del reconocimiento de nodos presentes en el sistema.

Ejecución de un análisis energético mediante pérdidas de carga, actualización de planos de tuberías (piping) del sistema de aire comprimido y levantamiento de diagramas de procesos e instrumentación (P&ID).

Generación de al menos dos alternativas para reducción y optimización detallada del consumo de energía, basadas en el estudio realizado.

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1 UNACEM

Es una empresa enfocada en tres sectores: cemento, concreto y energía. Sigue como lineamientos estratégicos la seguridad y salud, el enfoque al cliente, excelencia en operaciones, crecimiento y desarrollo, responsabilidad social y ambiental y desarrollo de personas. [3]

Busca la mejora continua de sus sistemas, reduciendo las emisiones al entorno, utilizando eficientemente los recursos y contribuyendo a la mitigación de los efectos del cambio climático [3].

2.2 AIRE COMPRIMIDO

2.2.1 COMPRESIÓN

Proceso mediante el cual se disminuye el volumen específico de un fluido gaseoso logrando así elevar su presión [4].

2.2.1.1 COMPRESORES

- A. Volumétricos:** En estos compresores el aumento de la presión se da por la reducción de un volumen por el desplazamiento de un pistón alternativo o por la acción de un elemento rotativo. [4]
- B. Dinámicos:** Su funcionamiento se fundamenta en la transformación de la velocidad en presión por medio de acelerar el fluido mediante rotores [4].

2.2.2 MAGNITUDES FUNDAMENTALES

Caudal: Volumen de fluido que pasa por una determinada sección transversal de una tubería o conducto por cada unidad de tiempo [4].

Presión: Es el cociente de dividir una fuerza por una superficie que recibe su acción [4].

Presión atmosférica: Es la presión ejercida por el aire en cualquier lugar de la atmosfera, viene dada por el peso del aire que se encuentra sobre la superficie de la tierra [5], [4].

Presión efectiva o relativa: Diferencia entre la presión del recipiente menos la presión atmosférica.

Presión Absoluta: Es la sumatoria de la presión efectiva con la presión atmosférica.

2.3 P&ID

Los diagramas de tuberías e instrumentación son utilizados comúnmente para describir los flujos de procesos y servir de base para el diseño de plantas de procesamiento. Sirven de base para las próximas actividades de ingeniería [6].

2.4 PROBLEMA DE TRANSBORDO

Es una variación del modelo de transporte, dando la posibilidad de transportar unidades mediante nodos fuentes, destinos y transitorios [7].

2.5 MÉTODO DE MONTECARLO

Según [8] el método de Montecarlo permite obtener soluciones de problemas matemáticos o físicos por medio de pruebas aleatorias repetidas. Además de realizar valoraciones teniendo en cuenta variables que no son ciertas, sino que en ocasiones pueden referirse a varios valores [9].

2.6 EFICIENCIA ENERGÉTICA

La eficiencia energética puede tener algunos significados según su aplicación. Algunas definiciones se dan a continuación:

- Relación entre la cantidad de energía y los productos finales logrados a partir de ese consumo de energía [10].
- Reducción de la energía utilizada para un servicio o nivel de actividad determinada [11].
- Usar menos energía para proporcionar el mismo servicio, rendimiento, comodidad y conveniencia [12].

2.7 OPTIMIZACIÓN DE LA ENERGÍA

En [13] se menciona que la optimización de la energía implica un uso eficaz y eficiente de la energía, buen equilibrio entre la generación y el consumo; además [14] establece que la optimización se lleva a cabo mediante la implementación de factores tanto en ahorro como en inversiones de nivel tecnológico, encaminadas a lograr una utilización eficiente y equilibrada de los recursos energéticos.

A nivel nacional para el sector industrial en [15] se proponen algunas estrategias:

- Mejorar la eficiencia energética tanto en usos térmicos y eléctricos.
- Promover la eficiencia energética como un mecanismo para mejorar la ventaja competitiva.
- Reducir el uso de derivados intermedios de petróleo como el Diesel.

2.8 AUDITORÍA ENERGÉTICA

Es un proceso sistemático mediante el cual se obtiene un conocimiento suficientemente fiable del consumo energético de una empresa, se detectan los factores que afectan el consumo de energía, y se identifican, evalúan y ordenan las distintas oportunidades de ahorro de energía desde un punto de vista técnico y económico. [16]

De acuerdo con [17] las auditorías energéticas pueden ser de tres tipos:

- a) Visita de inspección: Consiste en un recorrido por toda la instalación recolectando datos, familiarizándose con los sistemas instalados, y con los programas de mantenimiento existentes, divisando oportunidades potenciales de ahorro de energía.
- b) Mini auditoría: Cuantifica el uso de energía, para ser evaluado en términos económicos y presentar la factibilidad de posibles cambios en el sistema.
- c) Maxi auditoría: Se realiza una evaluación de toda la energía consumida en cada parte del proceso de producción, además de esto se analiza el patrón de consumo y se toma un año como base para formular predicciones en todos los sistemas.

CAPÍTULO III METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este trabajo de investigación se adoptó métodos teóricos, empíricos y estadísticos, en consonancia con las necesidades del proceso de investigación y de la construcción e implementación de la solución energética.

3.1 MÉTODOS TEÓRICOS

Análisis-síntesis: usados en la búsqueda y revisión de la literatura en relación con aire comprimido y optimización energética, con vistas a la construcción y desarrollo del marco teórico (fundamentos teóricos, términos a utilizar) así como en el trabajo previo de campo para la elaboración de los indicadores e instrumentos; durante el estudio y la valoración de los datos obtenidos en la aplicación de los instrumentos y su confrontación con la teoría.

Inducción-deducción: utilizados durante el estudio diagnóstico y documental y en la identificación de las particularidades del entorno y en el análisis cualitativo de los resultados. Fue posible sistematizar las principales causas y efectos de tal manera que permitieran establecer la propuesta de optimización necesaria.

3.2 MÉTODOS EMPÍRICOS

Análisis documental: se revisaron documentos académicos y normas ISO 50001 e ISO 11011 de eficiencia energética. Fue aplicado para la construcción teórica del trabajo de grado y en la elaboración de la solución planteada.

Métodos Estadísticos: se diseñaron tablas de distribución de frecuencias y porcentajes para el procesamiento y análisis de los resultados recolectados. Los resultados se muestran en gráficos para su mejor comprensión e interpretación.

3.3 RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

En primera instancia se realizó una recolección exhaustiva de datos para su análisis. Este procedimiento permitió evaluar la eficacia del sistema actualmente utilizado. Este estudio se lo realizará estableciendo relaciones en distintos periodos de funcionamiento, evaluando la energía generada y el costo producido respecto a la energía gastada, es decir se tomará como indicador clave (KPI) a Cfm/kWh.

3.4 PREPARACIÓN DE BACKGROUD DE LA PLANTA

Seguidamente se actualizó el layout de la planta y se efectuó un P&ID del sistema de aire comprimido para tener una comprensión precisa de su estado, tanto en producción de aire como en el funcionamiento.

3.5 IDENTIFICACIÓN DE LA DEMANDA DE AIRE COMPRIMIDO

Posteriormente se identificó la demanda de los equipos y elementos que utilizan aire comprimido, y a su vez fue comparado con la capacidad de generación de aire que ofertan los compresores.

3.6 ANÁLISIS DE DATOS

Paralelamente se analizaron los datos de demanda y oferta de aire comprimido, por medio de métodos de optimización y estadísticos para garantizar la fidelidad de los datos tomados, además de identificar el uso inapropiado de esta energía.

3.7 PROPUESTAS DE OPTIMIZACIÓN

Finalmente fue posible ofrecer alternativas para el funcionamiento óptimo y eficiente del sistema, planteando oportunidades para mejorar el rendimiento, establecer prioridades dentro del sistema de aire comprimido, y trazar recomendaciones para implementar en las actividades de la planta.

El desarrollo de esta metodología hace referencia a las normas ISO 50001 e ISO 11011, las mismas que establecen parámetros a seguir en auditorías energéticas, enfocadas al aire comprimido asimismo brindan criterios para un informe y documentación de los resultados de la evaluación.

CAPÍTULO IV RESULTADOS

4.1 RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

Se realizó un levantamiento de toda la información disponible en planta acerca del sistema de aire comprimido. Se encontró diagramas del sistema, como se observa en el anexo 1.

Por medio de estos diagramas se logró comprender de mejor manera las conexiones presentes en el sistema de aire comprimido, específicamente en la línea 1 de producción

Seguidamente se obtuvo gráficas del SCADA de la planta (Siemens PCS7) que reflejan el funcionamiento del sistema en diferentes intervalos de tiempo. Con ello se realizó una comparación entre la presión de aire en un área determinada respecto a la corriente consumida por los compresores. Se observó que cuando la corriente es de 0A la presión del área cae de la misma manera mostrando una parada en el área (figura 3.1.). Permitiendo así evaluar en intervalos los niveles de operación de la planta.

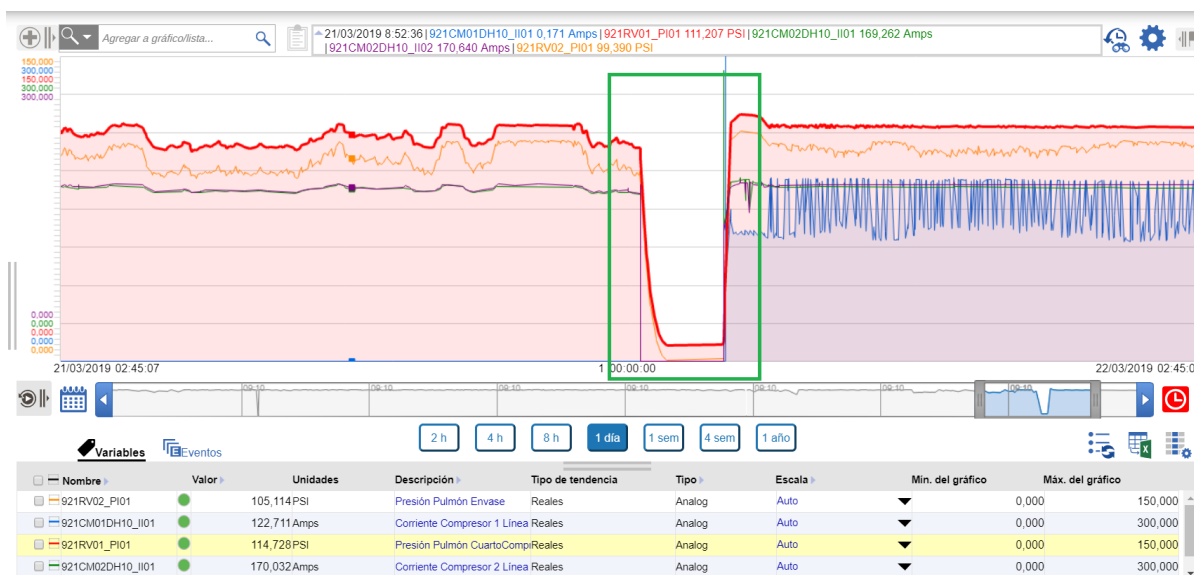


Figura 3.1. Comparación corriente de los compresores con presión de Cemento 2.

Fuente: SCADA UNACEM

Como se observa en el gráfico, previo a una parada el funcionamiento es en lo posible lineal, utilizando únicamente los compresores necesarios, pero luego del paro la corriente tiene un comportamiento brusco debido a que los compresores son encendidos y operan en carga y descarga para identificar de manera rápida el estado del compresor en el SCADA. Estos compresores pueden

ser modulados por medio de una compuerta de admisión, siendo poco práctico debido a la falta de variadores de velocidad en los mismos.

A continuación, se realizó el levantamiento de los equipos que utilizan aire comprimido. Entre los principales: colectores de polvo, cañones de aire, golpeadores neumáticos, sprays de agua, flautas de aire (chisguetes) y dosificador de Harina Cruda.

Los colectores de polvo se los ubicó por medio de su código y la verificación del flujograma de la planta esquema ejemplo (figura 3.2.). El mismo procedimiento se lo realizó con los sprays de agua, golpeadores neumáticos y dosificador de Harina Cruda. Para identificar y ubicar los cañones se utilizó los SCADA (figura 3.3.) que utilizan en la empresa, para controlar y garantizar el correcto funcionamiento de la planta. Para localizar las flautas de aire se contó con el apoyo del personal encargado de realizar las inspecciones en planta.

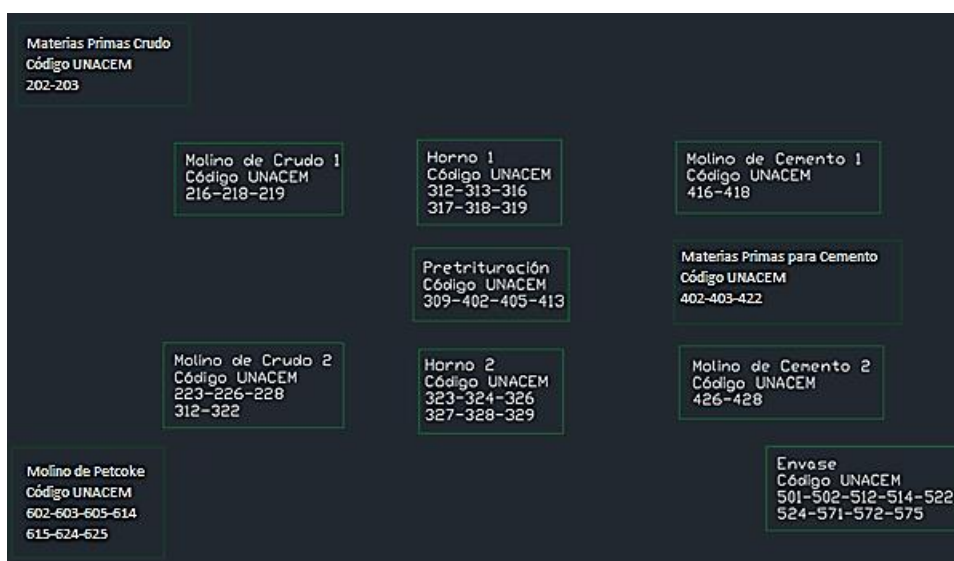


Figura 3.2. Esquema ejemplo de flujograma planta industrial UNACEM.

Fuente: Archivo UNACEM

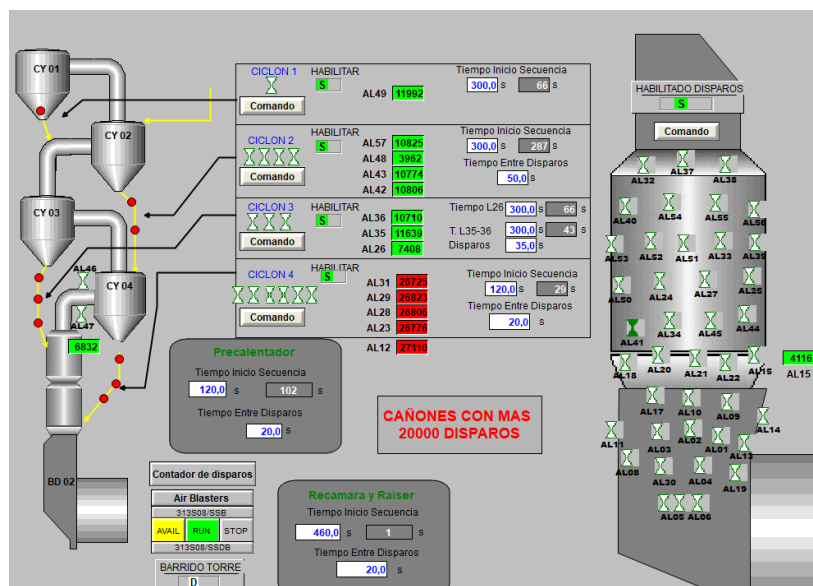


Figura 3.3. SCADA Precalentador y enfriadora.

Fuente: Panel Central UNACEM

Asimismo, se verificó físicamente la existencia de colectores de polvo (figura 3.4.), dosificador de Harina Cruda (figura 3.5.), spray de agua (figura 3.6) y cañones de aire (figura 3.7) en las diferentes áreas de la planta.

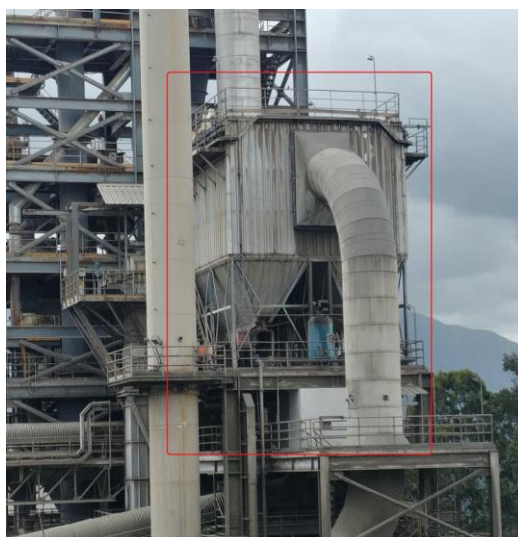


Figura 3.4. Colector de polvo Edificio3 (M.Primas Cementos).



Figura 3.5. Dosificador de Harina Cruda.



Figura 3.6. Spray de agua Precaentador 1.



Figura 3.7. Cañones de aire Precaentador 2.

Posteriormente se recolectó información del sistema basándose en los datos requeridos en la norma ISO 11011 como son la información global de los compresores (tabla 3.1.), información de mantenimiento típico (tabla 3.2.) y capacidad total instalada (tabla 3.3.). Al mismo tiempo, se determinó la relación de Cfm/kWh y el costo de estos compresores.

Tabla 3.1. Información global de compresores.

Total, de todos los compresores instalados:		15						
Edad de las instalaciones de aire comprimido								
El sistema es dividido por líneas, la línea 1 tiene alrededor de 40 años y la línea 2 alrededor de 10 años desde su instalación.								
Tipo de compresores instalados								
	Etapas	Lubricación		Refrigeración			VSD	
		Si	No	Aire	Agua		Aceite	
					Abierto	Cerrado		
Tornillo	Existe únicamente un compresor de 2 etapas, el resto son de 1.	X		12	3			1

Tabla 3.2. Información de mantenimiento típico.

¿Existe un plan de mantenimiento para el sistema examinado?	No	Si
Frecuencia de mantenimiento del sistema examinado:		
El mantenimiento se lo realiza según un cronograma perteneciente a cada área de la planta y partes del sistema de aire comprimido. En concreto se podría decir que existe una revisión anual, semestral y cada dos meses.		
Gestión de fugas de aire:	No	Frecuencia/Acción
Mensualmente se examina el sistema por fugas, y en caso de encontrar alguna se procede a generar una orden de trabajo y de ser posible se reemplaza el accesorio.		
¿El sistema va a ser modificado de las instalaciones originales?	No	Si, cuando:
No existe aún una fecha tentativa para la realización del procedimiento.		
Razón de la modificación:	Se cambiará las tuberías de la línea 1, debido a su antigüedad y así evitar pérdidas de presión.	

Elementos que podrían tener efectos en el sistema de aire comprimido analizado:	
El uso de enfriadores, apertura de algunas válvulas, sucesos que se realizan sin notificar y provocan caídas de presión no contempladas.	
Histórico de problemas con las instalaciones de aire comprimido	• Condensados en poca medida, pero con frecuencia.
	• Fugas
	• Caídas de presión por el uso de equipos sin notificación previa

Tabla 3.3. Capacidad de oferta por cuarto de compresores.

Compresores L1		Consumo Max (kW/h)	Consumo Medio (kW/h)	CFM	CFM Efectivo	kWh/ 100 Cfm	\$/h
c6	922CM01	130	65	434	312,48	20,80	\$ 4,23
c7	922CM04	435	164	880	633,6	25,88	\$ 10,66
c8	922CM05	378	144	880	633,6	22,73	\$ 9,36
c9	922CM06	346	173	1249	899,28	19,24	\$ 11,25
c10	922CM08	141	75	455	327,6	22,89	\$ 4,88
c5	922cm07	173	72	446	321,12	22,42	\$ 4,68
						22,33	\$ 7,51
Compresores L2		Consumo Max (kW/h)	Consumo Medio (kW/h)	CFM	CFM Efectivo	kWh/100 Cfm	\$/h
c11	921CM04	177	145	892	642,24	22,58	\$ 9,43
c12	921CM05	177	145	892	642,24	22,58	\$ 9,43
c13	921CM06	177	145	892	642,24	22,58	\$ 9,43
c14	921CM07	177	145	892	642,24	22,58	\$ 9,43
c15	921CM08	177	145	892	642,24	22,58	\$ 9,43
						22,58	\$ 9,43

Compresores En		Consumo Max (kW/h)	Consumo Medio (kW/h)	CFM	Cfm Efectivo	kWh/100 Cfm	\$/h
c1	921CM01	225	129	670	482,4	26,74	\$ 8,39
c2	921CM02	225	129	670	482,4	26,74	\$ 8,39
c3	921CM03	225	129	670	482,4	26,74	\$ 8,39
c4	921CM09	212	127	690	496,8	25,56	\$ 8,26
						26,45	\$ 8,35

\$/kWh	Capacidad instalada (Cfm)	Capacidad Efectiva instalada (Cfm Efectivo)
\$ 0,065	11.504,00	8282,88

4.2 PREPARACIÓN DE BACKGROUD DE LA PLANTA

Luego de revisar los diagramas disponibles en planta y constatar por medio del SCADA la disposición y unión entre las líneas de producción (figura 3.8.), se efectuaron salidas de campo para realizar un seguimiento de las tuberías de aire comprimido y verificar los nodos existentes. Por otra, se logró determinar un mejor entendimiento de la disposición y forma de funcionamiento del sistema.

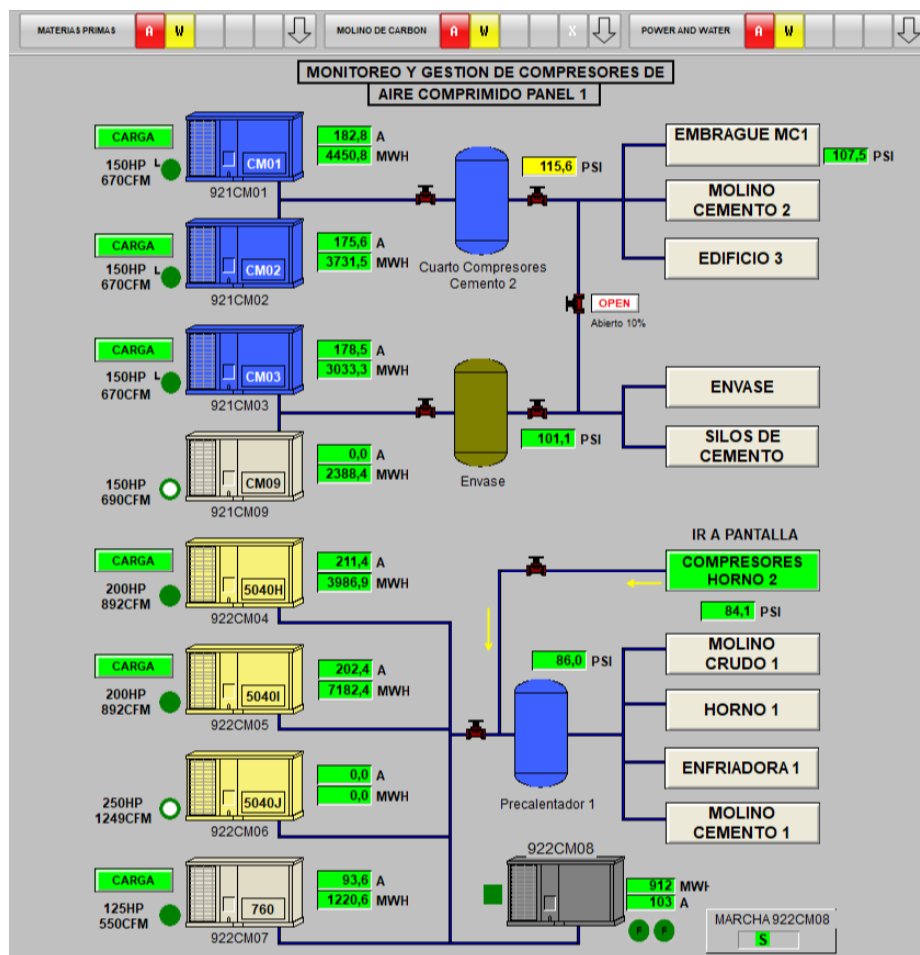


Figura 3.8. SCADA para monitoreo de cuartos de compresores.

Fuente: Panel Central UNACEM

Luego de la intervención se evidenció reducciones drásticas de tuberías (figura 3.9.) generando pérdidas de carga, igualmente la ausencia de válvulas check para controlar el sentido del flujo de aire, lo cual podría ser contraproducente en determinadas áreas. Además, se verificó puntos en los que se aprecia la existencia de fugas debido a la corrosión, ya que es notorio el condensado que rodea la tubería (figura 3.10.).

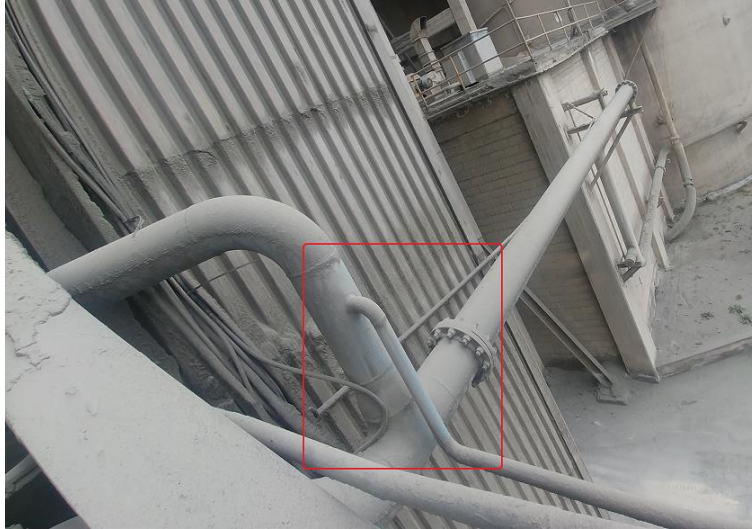


Figura 3.9. Tuberías de aire comprimido.



Figura 3.10. Fuga visible en la tubería.

Con los datos obtenidos fue posible actualizar el layout de la planta colocando las tuberías y pulmones de aire comprimido. Esquema (figura 3.11.) ver anexo 2.

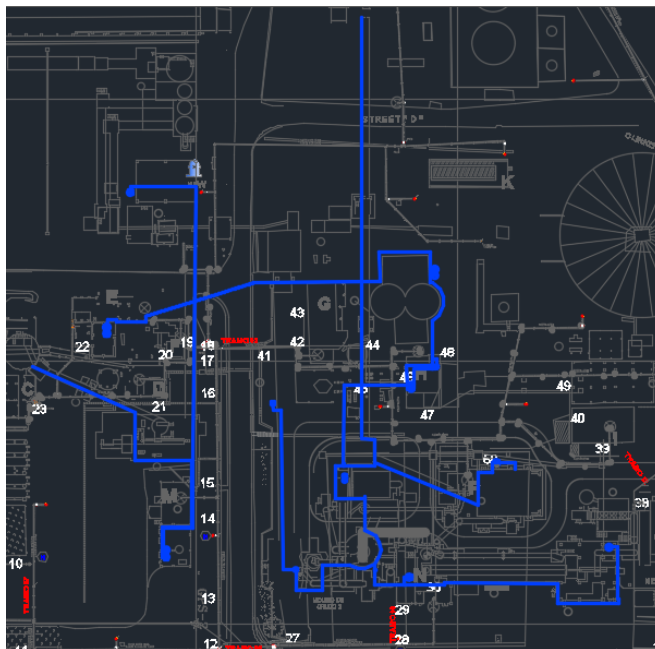


Figura 3.11. Layout con tuberías de aire comprimido y pulmones.

Posterior a esto se levantó el P&ID (esquema ejemplo figura 3.12.) (ver anexo 3) que contempla los compresores divididos por cuartos, con sus correspondientes secadores y pulmones. Asimismo, de los equipos con sus respectivas líneas de alimentación de aire comprimido, en las que se representa válvulas y reducciones en las tuberías con sus correspondientes diámetros. Cada elemento contiene su respectivo tag de información.

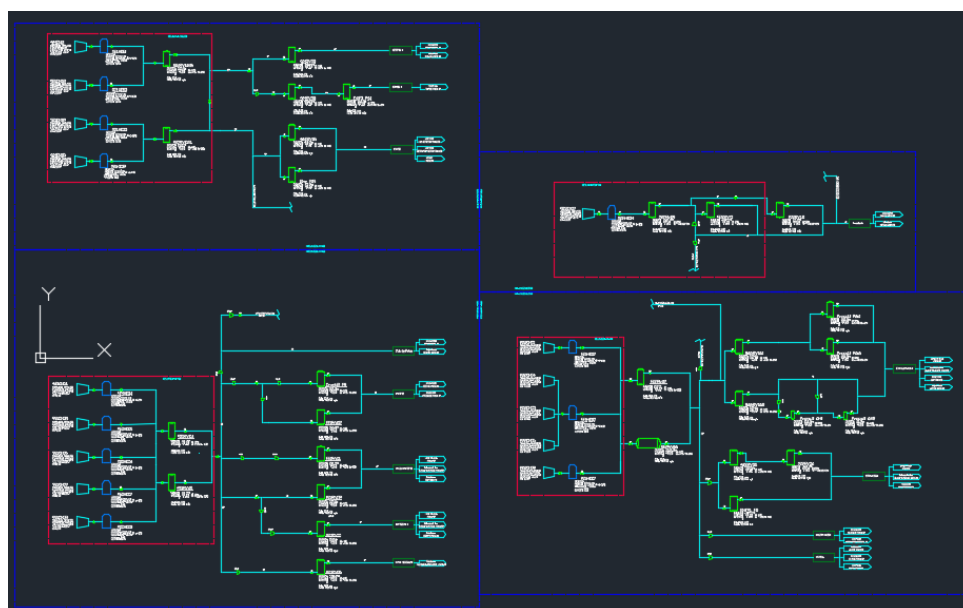


Figura 3.12. P&ID del sistema de aire comprimido.

4.3 IDENTIFICACIÓN DE LA DEMANDA DE AIRE COMPRIMIDO

Una vez conocido el funcionamiento y disposición del sistema de aire comprimido se utilizó las hojas de datos provistas por los fabricantes de los equipos disponibles para tomar el valor nominal de consumo de aire.

En el caso de los cañones de aire, el fabricante facilita graficas (figura 3.13.) de fácil comprensión que muestran la presión respecto al tiempo en carga y descarga.

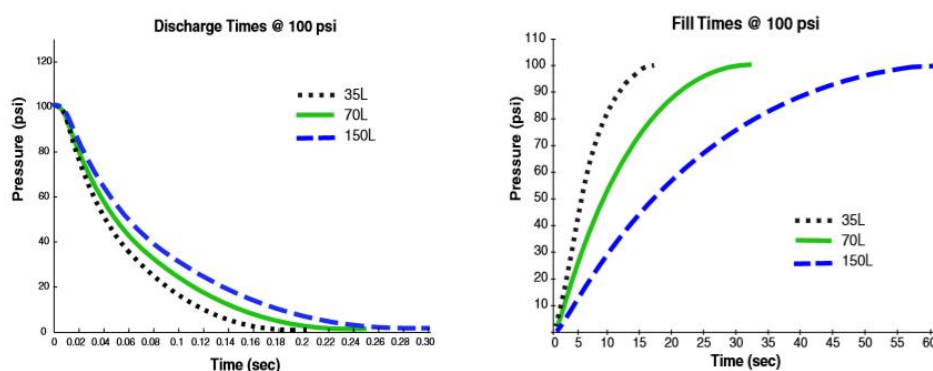


Figura 3.13. Funcionamiento cañones de aire carga-descarga. [18]

Con estos datos y con el conocimiento del tipo de cañones instalados se tomó en cuenta la secuencia de funcionamiento (figura 3.14.) programada previamente. Con ello fue posible establecer el consumo real de los cañones (tabla 3.4.); el mismo procedimiento fue seguido para ambas líneas.

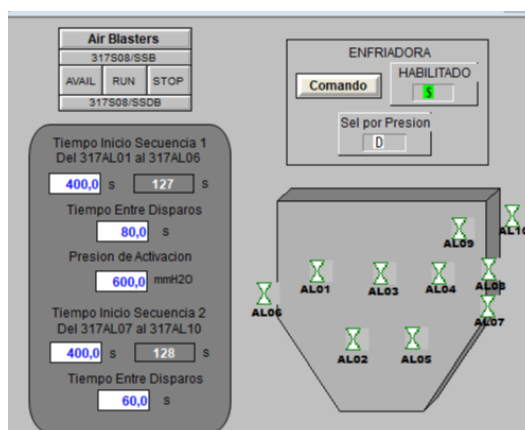


Figura 3.14. Secuencia de funcionamiento cañones de aire Enfriadora.

Fuente: Panel central UNACEM

Tabla 3.4. Consumo de aire comprimido de los cañones de aire de la línea 2.

	Enfriadora/Horno 2/Precalentador	Presión (PSI)	Capacidad (lt)	lt/s	cfm
Precalentador	323AL56	90	70	2,217	4,698
	323AL57	90	70		
	323AL28	90	70		
	323AL26	90	70		
	323AL25	90	70		
	323AL46	90	70		
	323AL44	90	70		
	323AL45	90	70		
	323AL34	90	70		
	323AL35	90	70		
	323AL36	90	70		
	323AL37	90	70		
	323AL32	90	70		
	323AL33	90	70		
	323AL62	90	70		
	323AL38	90	70		
	323AL19	90	70		
323AL20	90	70			
323AL21	90	70			
Calciner/Raiser	323AL60	90	70	14,47	30,66
	323AL58	90	70		
	323AL61	90	70		
	323AL59	90	70		
	323AL24	90	70		
	323AL22	90	70		
	323AL23	90	70		
323AL25	90	70			

	Enfriadora/Horno 2/Precalentador	Presión (PSI)	Capacidad (lt)	lt/s	cfm
	323AL13	90	70		
	323AL18	90	70		
	323AL17	90	70		
	323AL14	90	70		
	323AL15	90	70		
	323AL16	90	70		
	323AL07	90	70		
	323AL51	90	70		
	323AL52	90	70		
	323AL53	90	70		
	323AL54	90	70		
	323AL08	90	70		
	323AL09	90	70		
	323AL10	90	70		
	323AL11	90	70		
	323AL12	90	70		
	323AL50	90	70		
	323AL06	90	70		
	323AL02	90	70		
	323AL03	90	70		
	323AL04	90	70		
	323AL05	90	70		
	323AL01	90	70		
Enfriadora	327AL01	90	70	0,4667	0,9889
	327AL02	90	70		
	327AL03	90	70		
	327AL04	90	70		
Total				17,150	36,347

Con respecto a los golpeadores neumáticos se utilizó los datos de la tabla (figura 3.15.). El cual proporcionó información de la presión de trabajo con su respectivo consumo de aire, en este caso los golpeadores instalados son los P60.

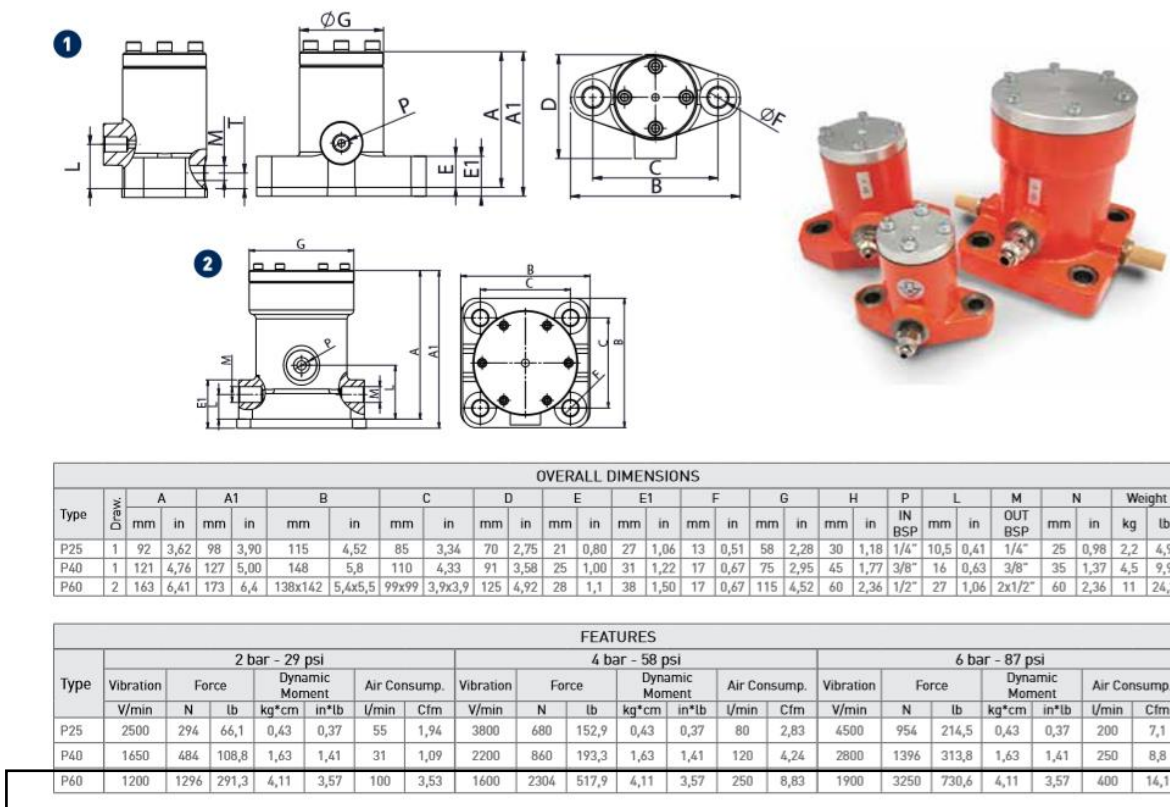


Figura 3.15. Hoja de datos golpeadores neumáticos. [19]

Con estos datos y según su ubicación física dentro de la planta fue posible contabilizarlos y establecer un consumo por área, tal como se exhibe en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Consumo de aire comprimido de los golpeadores neumáticos.

Ubicación		Unidades	Cfm
Crudo 1	212HO02	5	70,5
Crudo 2	226HO02	5	70,5
M. Primas	203HO01	3	42,3
M. Primas	203HO02	3	42,3
Cemento 2	426HO04	1	14,1
Pretriturador	405DC01	1	14,1
Pretriturador	405DC02	1	14,1
Cemento 1	418DC01	1	14,1
Horno 1	313TC01	1	14,1

Para cuantificar el consumo de aire comprimido generado por los dosificadores de Harina Cruda se utilizó la hoja de datos provista por el fabricante (figura 3.16.) y se realizó una tabla ubicando cada dosificador de Harina Cruda en el área al que pertenece (tabla 3.6.).

HOJA DE DATOS
Báscula dosificadora a rotor
 472.3271.1000-DA-a



TRM/Becke 16.08.2011 472.3271.1000 -DA-a-E

Transmisor de impulsos	
Marca:	
Tipo:	
Impulsos / revolución: $z =$	
Divisor (de frecuencia): $d_g =$	16
Reductor	
Marca:	SEW
Tipo:	KAF97 R57
No. de fabricación:	01.1736617701.0001.11
Reducción:	$i_g =$ 1102
Consumo de aire	
Aire obturante (0,5 bar):	20 Nm ³ /h
Aire de barrido (6 bar):	40 Nm ³ /h

Figura 3.16. Hoja de datos Dosificador de Harina Cruda. [20]

Tabla 3.6. Consumo de aire comprimido Dosificador de Harina Cruda.

Enfriadora 1/Horno 1/ Precalentador 1			Molino de Carbón		
312-313- 316-317- 318-319	Nm3/hr	Cfm	602-603- 605-614- 615-624- 625	Nm3/hr	Cfm
312WF01	40	25	625WF01	40	24,8

Para obtener un consumo estimado de las flautas de aire (figura 3.17.) se utilizó un calibrador de presión (figura 3.18.) para medir la presión en un punto, puesto que estas flautas fueron tratadas como fugas en este estudio. Se tuvo una presión de 90 Psi.



Figura 3.17. Flautas de aire.



Figura 3.18. Calibrador de presión.

Estas flautas tenían un diámetro de una pulgada, pero debido a que su válvula siempre estaba abierta hasta la mitad de su capacidad, para la evaluación se consideró un diámetro de media pulgada.

Debido a la falta de un flujómetro se utilizaron dos calculadoras de fugas proporcionadas por empresas especialistas en aire comprimido. Los datos de “TLV” se encuentran en condiciones estándar por lo cual fue necesario realizar una conversión mediante $\frac{P1*V1}{T1} = \frac{P2*V2}{T2}$ obteniendo un valor de 393 CFM; Ya que los datos de “CEACSA” (figura 3.19.) tienen una ligera variación con respecto a “TLV” (figura 3.20.) se consideró como el valor a utilizar el promedio de ambas.

Flujo de Fuga de Aire Comprimido: 338.5 CFM
Potencia Consumida en Compresor: 74.47 kW
Consumo de Energía Año: 74,470 kW/año
Costo de Fuga al Año: 74,470 \$/ año

Figura 3.19. Consumo de fuga según CEACSA. [21]

Rango de Flujo de Aire (Normal)	293.703	SCFM ▼
Resultados		

Figura 3.20. Consumo de fuga según TLV. [22]

En la identificación del consumo de aire por parte de los colectores de polvo, se identificó un manual del colector de polvo más grande y recientemente instalado en la planta (figura 3.21.), además de algunos datos proporcionados por personal de UNACEM (tabla 3.7.).


 Redecam Group		FILTER DATA SHEET DPD TYPE		
		Ref n°	C116004	DS-DPD-01
	Date	25-Feb-16		
	Client	UNACEM		
	Plant	OTAVALO-ECUADOR		
	Item	Kiln&Raw mill filter		
			3,2	
Filter design data				
Design maximum vacuum	1224		mm w.g.	
<u>Operating condition</u>	<u>DESIGN (Mill OFF)</u>	<u>Mill ON</u>		
Volume at the filter inlet	242.135	312.415	Nm ³ /h	
Inlet temperature	200	90	°C	
Static pressure at filter inlet	1.000	1.000	mm w.g.	
Volume at the filter inlet	665.289	658.765	Am ³ /h	
Type of filter	DPD			
Model	10 DPD 13x10/7			
Number of main manifolds	1			
Number of compartments	10			
Rows of bags per compartment	26			
Total bags number	2.600			
Bags Nominal Diameter x Length	ø 160 x 7000		mm	
Cloth area	9.144		m ²	
Air/cloth ratio	1,21	1,20	m ³ /m ² *min	
Plenum height	800		mm	
Number of pneumatic valves	260			
Number of valves per compartment	26			
Number of solenoid valves	260			
Number of bags per compartment	260			
Number of cleaning boards	1			
Compressed air consumption				
Compressed air consumption per cycle	36		Nm ³ /cycle	
Number of cycles per hour	6		Cycles/h	
Total compressed air consumption	218		Nm ³ /h	
Compressed air pressure at our mains	3,0		bar	

Figura 3.21. Hoja de datos Colector de polvo 216DC01. [23]

Tabla 3.7. Datos de colectores de polvo.

Fuente: Personal UNACEM.

	Numero de Módulos	Numero mangas compartimiento	Numero de mangas	Longitud de Manga PULG	Largo MM	Diámetro de Manga PULG	m3/hr	m3 (Área de filtrado)
OTV-501-DC03			0,00		0,00			0,00
OTV-502-DC01			0,00	109,50	2781,30	5,75		0,00
OTV-512-DC02			0,00		0,00			0,00
OTV-514-DC01			0,00		0,00			0,00
OTV-524-DC01			0,00		0,00			0,00
OTV-571-DC01			0,00		0,00			0,00
OTV-571-DC02			0,00	97,00	2463,80	5,00		0,00
OTV-575-DC01			0,00		0,00			0,00
OTV-402-DC01	1,00	18,00	18,00	106,50	2705,00	5,91		22,58
OTV-405-DC03	1,00	20,00	20,00	106,50	2705,00	5,91		25,09
OTV-312-DC01	1,00	24,00	24,00	109,50	2781,30	5,75		30,15
OTV-413-DC02	1,00	36,00	36,00	109,50	2781,30	5,75		45,22
OTV-416-DC03	1,00	36,00	36,00	109,50	2781,30	5,75		45,22
OTV-428-DC01	1,00	36,00	36,00	97,00	2463,80	5,00		34,83
OTV-572-DC01	1,00	36,00	36,00	97,00	2463,80	5,00		34,83
OTV-319-DC01	1,00	42,00	42,00	109,50	2781,30	5,75		52,75
OTV-321-DC01	1,00	42,00	42,00	97,00	2463,80	5,00		40,64

	Numero de Módulos	Numero mangas compartimiento	Numero de mangas	Longitud de Manga PULG	Largo MM	Diámetro de Manga PULG	m3/hr	m3 (Area de filtrado)
OTV-322-DC01	1,00	42,00	42,00	97,00	2463,80	5,00		40,64
OTV-322-DC02	1,00	42,00	42,00	97,00	2463,80	5,00		40,64
OTV-418-DC01	1,00	48,00	48,00	109,50	2781,30	5,75		60,29
OTV-418-DC02	1,00	48,00	48,00	109,50	2781,30	5,75		60,29
OTV-418-DC03	1,00	48,00	48,00	109,50	2781,30	5,75		60,29
OTV-403-DC04	1,00	54,00	54,00	97,00	2463,80	5,00	1,18	52,25
OTV-403-DC05	1,00	54,00	54,00	97,00	2463,80	5,00	1,18	52,25
OTV-422-DC01	1,00	54,00	54,00	97,00	2463,80	5,00	1,18	52,25
OTV-422-DC02	1,00	54,00	54,00	97,00	2463,80	5,00	1,18	52,25
OTV-428-DC04	1,00	54,00	54,00	97,00	2463,80	5,00	1,18	52,25
OTV-428-DC05	1,00	54,00	54,00	97,00	2463,80	5,00	1,18	52,25
OTV-614-DC01	1,00	55,00	55,00	97,44	2475,00	6,30		67,35
OTV-624-DC01	1,00	55,00	55,00	97,44	2475,00	6,30		67,35
OTV-324-DC02	1,00	60,00	60,00	97,00	2463,80	5,00		58,05
OTV-501-DC01	1,00	60,00	60,00	97,00	2463,80	5,00		58,05
OTV-426-DC05	1,00	70,00	70,00	97,00	2463,80	5,00		67,73
OTV-426-DC06	1,00	70,00	70,00	97,00	2463,80	5,00		67,73
OTV-428-DC02	1,00	70,00	70,00	97,00	2463,80	5,00		67,73
OTV-428-DC03	1,00	70,00	70,00	97,00	2463,80	5,00		67,73

	Numero de Módulos	Numero mangas compartimiento	Numero de mangas	Longitud de Manga PULG	Largo MM	Diámetro de Manga PULG	m3/hr	m3 (Area de filtrado)
OTV-602-DC01	1,00	70,00	70,00	97,00	2463,80	5,00		67,73
OTV-602-DC02	1,00	70,00	70,00	97,00	2463,80	5,00		67,73
OTV-615-DC01	1,00	70,00	70,00	97,00	2463,80	5,00		67,73
OTV-625-DC01	1,00	70,00	70,00	97,00	2463,80	5,00		67,73
OTV-218-DC01	1,00	72,00	72,00	109,50	2781,30	5,75		90,44
OTV-218-DC03	1,00	72,00	72,00	109,50	2781,30	5,75		90,44
OTV-413-DC01	1,00	72,00	72,00	109,50	2781,30	5,75		90,44
OTV-422-DC03	1,00	96,00	96,00	97,00	2463,80	5,00		92,88
OTV-426-DC01	1,00	96,00	96,00	97,00	2463,80	5,00		92,88
OTV-428-DC06	1,00	96,00	96,00	97,00	2463,80	5,00		92,88
OTV-228-DC01	1,00	98,00	98,00	97,00	2463,80	5,00		94,82
OTV-501-DC02	1,00	100,00	100,00	97,00	2463,80	5,00		96,75
OTV-218-DC02	1,00	108,00	108,00	109,50	2781,30	5,75		135,65
OTV-403-DC01	1,00	108,00	108,00	97,00	2463,80	5,00	1,86	104,49
OTV-403-DC03	1,00	108,00	108,00	97,00	2463,80	5,00	1,86	104,49
OTV-405-DC01	1,00	108,00	108,00	106,50	2705,00	5,91		135,50
OTV-405-DC02	1,00	108,00	108,00	106,50	2705,00	5,91		135,50
OTV-312-DC02	1,00	117,00	117,00	109,50	2781,30	5,75		146,96
OTV-328-DC02	1,00	140,00	140,00	97,00	2463,80	5,00		135,45

	Numero de Módulos	Numero mangas compartimiento	Numero de mangas	Longitud de Manga PULG	Largo MM	Diámetro de Manga PULG	m3/hr	m3 (Area de filtrado)
OTV-329-DC01	1,00	140,00	140,00	97,00	2463,80	5,00		135,45
OTV-329-DC02	1,00	140,00	140,00	97,00	2463,80	5,00		135,45
OTV-512-DC01	1,00	144,00	144,00	119,88	3045,00	6,26		215,48
OTV-309-DC01	1,00	210,00	210,00	97,00	2463,80	5,00		203,18
OTV-522-DC02	1,00	312,00	312,00	108,86	2765,00	6,28		425,28
OTV-416-DC01	4,00	150,00	600,00	168,00	4267,20	6,25		1256,79
OTV-416-DC02	1,00	600,00	600,00	168,00	4267,20	6,25		1256,79
OTV-426-DC04	1,00	700,00	700,00	166,00	4216,40	5,00	37,29	1159,04
OTV-328-DC01	6,00	182,00	1092,00	237,50	6032,50	6,20	66,00	3207,76
OTV-426-DC02	4,00	294,00	1176,00	166,00	4216,40	5,00		1947,19
OTV-318-DC01	6,00	216,00	1296,00	110,43	2805,00	6,18		1764,79
OTV-603-DC01	2,00	650,00	1300,00	166,00	4216,40	5,00		2152,51
OTV-426-DC03	2,00	896,00	1792,00	166,00	4216,40	5,00	74,57	2967,15
OTV-216-DC01	10,00	260,00	2600,00		0,00		97,87	9148,32
OTV-324-DC01	8,00	56 + 140	448+1120	237.25 275.59	6026.15 7000	6,30	90,00	5123,70

Con los datos provistos se estableció el área de filtrado de cada colector en m³. Debido a que esta área guarda relación directa con el consumo de aire comprimido fue posible separar los colectores que poseen la información completa (tabla 3.8.). Con estos valores se realizó una regresión, donde el eje “x” marca el área de filtrado y el eje “y” el consumo de aire, obteniendo así una ecuación que describe el consumo de aire en los colectores (figura 3.22.).

Tabla 3.8. Datos de colectores de polvo con información completa.

Fuente: Personal UNACEM.

	Numero de Módulos	Numero mangas compartimiento	Numero de mangas	Longitud de Manga PULG	Largo MM	Diámetro de Manga PULG	m3/hr	m3 (Area de filtrado)
OTV-501-DC02	1,00	100,00	100,00	97,00	2463,80	5,00	1,86	96,75
OTV-426-DC04	1,00	700,00	700,00	166,00	4216,40	5,00	37,29	1159,04
OTV-328-DC01	6,00	182,00	1092,00	237,50	6032,50	6,20	66,00	3207,76
OTV-426-DC03	2,00	896,00	1792,00	166,00	4216,40	5,00	74,57	2967,15
OTV-324-DC01	8,00	56 + 140	448+1120	237.25 275.59	6026.15 7000	6,30	90,00	5123,70
OTV-216-DC01	10,00	260,00	2600,00		0,00		97,87	9148,32

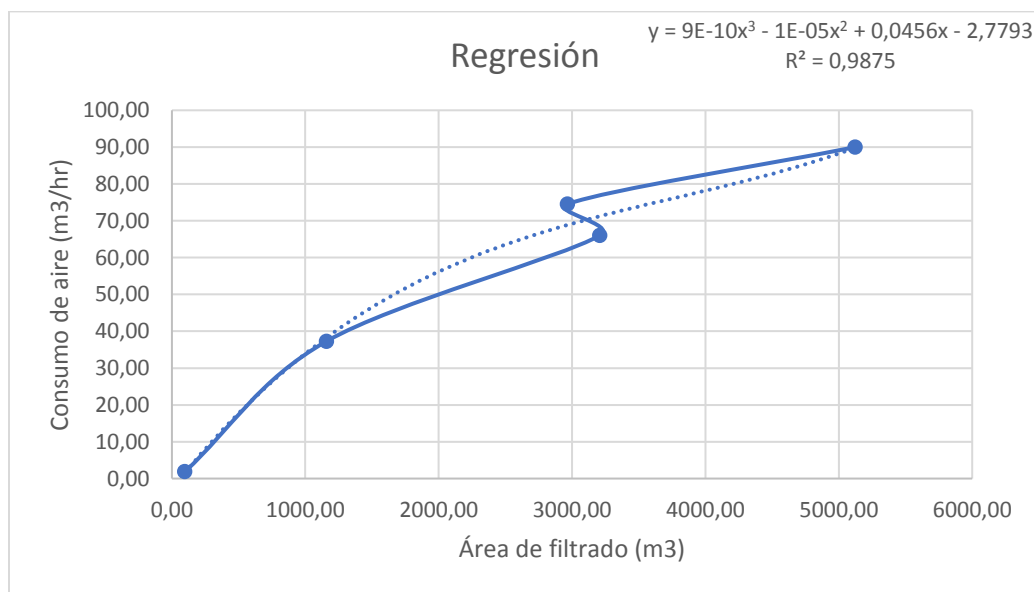


Figura 3.22. Regresión con datos de los colectores de polvo.

La línea de tendencia con mayor proximidad al valor real se seleccionó mediante el coeficiente de determinación (R^2) verificando que sea lo más próximo a 1. Con esto fue posible dividir por áreas los colectores de polvo con sus correspondientes consumos de aire (tabla 3.9). Los colectores de los que no se disponía información (*) fueron relacionados con colectores de características similares.

Tabla 3.9. Colectores agrupados por áreas con sus consumos.

Enfriadora 1/Horno 1/ Precalentador 1			Crudo 1			Cemento 1		
312-313- 316-317- 318-319	Scfm	Cfm	216-218- 219	Scfm	Cfm	416-418	Scfm	Cfm
OTV-312- DC01	1,79	2,42	OTV-216- DC01	195, 86	265, 85	OTV- 416- DC01	81,09	110, 07
OTV-312- DC02	7,42	10,0 7	OTV-218- DC01	3,37	4,57	OTV- 416- DC02	81,09	110, 07
OTV-318- DC01	103,0 5	139, 88	OTV-218- DC02	3,37	4,57	OTV- 416- DC03	2,18	2,96
OTV-319- DC01	2,38	3,23	OTV-218- DC03	4,55	6,18	OTV- 418- DC01	2,58	3,50
						OTV- 418- DC02	2,58	3,50
						OTV- 418- DC03	2,58	3,50
Enfriadora 2/Horno 2/ Precalentador 2			Crudo 2			Cemento 2		
323-324- 326-327- 328-329	Scfm	Cfm	223-226- 228-321- 322	Scfm	Cfm	426-428	Scfm	Cfm
OTV-324- DC01	178,9 0	242, 82	OTV-228- DC01	3,48	4,72	OTV- 426- DC01	3,43	4,66
OTV-324- DC02	2,52	3,42	OTV-321- DC01	2,06	2,80	OTV- 426- DC02	109,5 5	148, 69

OTV-328-DC01	140,69	190,96	OTV-322-DC01	2,06	2,80	OTV-426-DC03	136,07	184,69				
OTV-328-DC02	6,44	8,74	OTV-322-DC02	2,06	2,80	OTV-426-DC04	76,13	103,33				
OTV-329-DC01	6,44	8,74				OTV-426-DC05	2,77	3,76				
OTV-329-DC02	6,44	8,74				OTV-426-DC06	2,77	3,76				
						OTV-428-DC01	1,91	2,59				
						OTV-428-DC02	2,77	3,76				
						OTV-428-DC03	2,77	3,76				
						OTV-428-DC04	2,36	3,21				
						OTV-428-DC05	2,36	3,21				
						OTV-428-DC06	3,43	4,66				
Pretrituración			Edificio 3 (Materias primas para Cemento)			Molino Carbón			Envase			
309-402-405-413	Scfm	Cfm	401-403-422	Scfm	Cfm	602-603-605-614-615-624-625	Scfm		501-502-512-514-522-524-571-572-575	m3/hr	Scfm	Cfm
OTV-309-DC01	12,17	16,52	OTV-403-DC01	3,73	5,07	OTV-602-DC01	2,77	3,76	OTV-501-DC01	1,258	0,740	1,005
OTV-402-DC01	1,59	2,15	OTV-403-DC03	3,73	5,07	OTV-602-DC02	2,77	3,76	OTV-501-DC02	1,765	1,039	1,410
OTV-405-DC01	4,55	6,17	OTV-403-DC04	2,36	3,21	OTV-603-DC01	116,10	157,59	OTV-501-DC03		*	*

OTV-405-DC02	4,55	6,17	OTV-403-DC05	2,36	3,21	OTV-614-DC01	2,76	3,75	OTV-502-DC01		*	*
OTV-405-DC03	1,65	2,24	OTV-422-DC01	2,36	3,21	OTV-615-DC01	2,77	3,76	OTV-512-DC01	6,59 1	3,8 80	5,2 66
OTV-413-DC01	2,18	2,96	OTV-422-DC02	2,36	3,21	OTV-624-DC01	2,76	3,75	OTV-512-DC02		*	*
OTV-413-DC02	3,37	4,57	OTV-422-DC03	3,43	4,66	OTV-625-DC01	2,77	3,76	OTV-514-DC01		*	*
									OTV-522-DC02	14,8 7	8,7 5	11, 88
									OTV-524-DC01		*	*
									OTV-571-DC01		*	*
									OTV-571-DC02		*	*
									OTV-572-DC01	0,95 3	0,5 61	0,7 62
									OTV-575-DC01		*	*

4.4 ANÁLISIS DE DATOS

Para una mayor facilidad se trató el caso como un problema de transbordo (figura 3.23.). Se colocó las diferentes rutas que existen en el sistema de aire comprimido, comenzando por los compresores, para pasar a los pulmones y finalmente llegar a los equipos que consumen aire. Luego de este procedimiento se organizó los valores de oferta y demanda como se observa en la tabla 3.10.

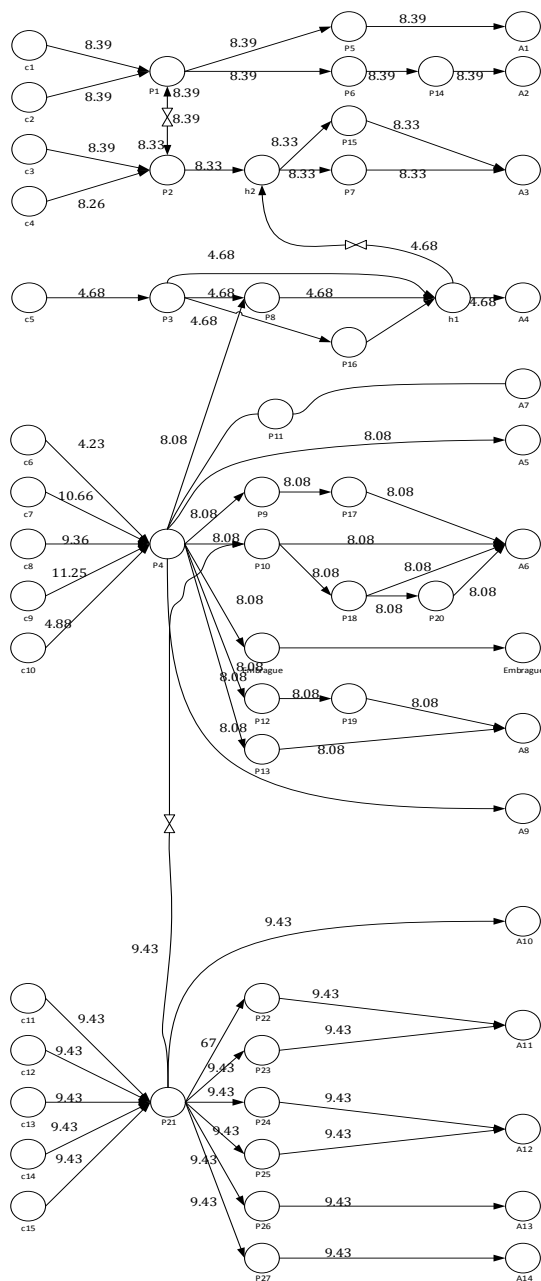


Figura 3.23. Problema de transbordo.

Tabla 3.10. Oferta y demanda del sistema de aire comprimido.

Compresores	Código UNACEM	Capacidad Cfm	Oferta Cfm efectivo	Áreas	Código UNACEM	Demanda Nominal Cfm	Chisguetes abiertos	Consumo Chisguetes	Sin Chisguetes
c1	921CM01	670,0	482,4	A1	Cemento2	520,0	520,0		520,0
c2	921CM02	670,0	482,4	A2	Edificio3 (M. P. Cem)	27,6	27,6		27,6
c3	921CM03	670,0	482,4	A3	Envase	740,1	740,1		740,1
c4	921CM09	690,0	496,8	A4	Cemento1	283,1	283,1		283,1
c5	922CM07	446,0	321,1	A5	Crudo1	157,3	157,3		157,3
c6	922CM01	434,0	312,5	A6	Pre calentador1	2053,9	2753,9	1750,0	1003,9
c7	922CM04	880,0	633,6	A7	Colector grande	265,9	265,9		265,9
c8	922CM05	880,0	633,6	A8	Enfriadora1	1466,5	1816,5	1050,0	766,5
c9	922CM06	1249,0	899,3	A9	Pretritución	69,0	69,0		69,0
c10	922CM08	455,0	327,6	A10	M. Primas Crudo	42,3	42,3		42,3
c11	921CM04	892,0	642,2	A11	Crudo 2	155,1	155,1		155,1
c12	921CM05	892,0	642,2	A12	Precalentador 2	1911,6	2611,6	1400,0	1211,6
c13	921CM06	892,0	642,2	A13	Enfriadora 2	1538,2	1888,2	1050,0	838,2
c14	921CM07	892,0	642,2	A14	Molino de Carbón	204,9	204,9		204,9
c15	921CM08	892,0	642,2	Total		9435,4	11535,4	5250,0	6285,4
Total		*8282,88							

La oferta efectiva por parte de los compresores fue determinada considerando un 28% de afectación por la altura en Otavalo.

Con la demanda de aire comprimido nominal fue posible definir un escenario optimista. Como producto se redujo el consumo de las flautas de aire (chisguetes), tomando en cuenta que su empleo constituía una mala práctica, ya que tienen un consumo elevado, además de una eficiencia baja. Por otra parte, son fácilmente reemplazables por otras alternativas. Con este análisis y procedimiento implementado fue posible definir tres escenarios, optimista sin ningún chisguete de aire funcionando, pesimista con todos los chisguetes activos y nominal siendo el funcionamiento natural de la planta como se observa en la tabla 3.11.

Tabla 3.11. Escenarios de consumo en CFM.

	Nominal	Pesimista	Optimista
Demanda	9435,4	11535,4	6285,4
Oferta - Demanda	-1152,5	-3252,5	1997,5

Debido a que la apertura y cierre de los chisguetes de aire es incierto, llegando a ser aleatorio, pues, existen algunas variables por las que se necesita de esta práctica, se utilizó el Método de Montecarlo. Al final se constató que el valor más probable de consumo de aire era próximo a nuestro valor nominal como se observa en la tabla 3.11. y la figura 3.24., dando más relevancia a este valor.

Tabla 3.12. Probabilidades de consumo/Método de Montecarlo.

Intervalos	Consumo	Frecuencia	Probabilidad	Chisguetes abiertos
1	6285,43	212	4,2%	
2	6810,43	202	4,0%	
3	7335,43	332	6,6%	
4	7860,43	494	9,9%	
5	8385,43	611	12,2%	6
6	8910,43	656	13,1%	(7-8)
7	9435,43	668	13,4%	9
8	9960,43	626	12,5%	(10-11)
9	10485,43	488	9,8%	
10	11010,43	310	6,2%	
11	11535,43	191	3,8%	

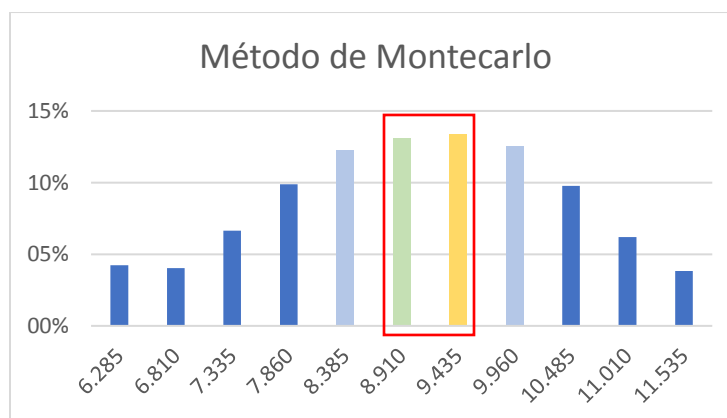


Figura 3.24. Histograma Método de Montecarlo

Para garantizar un error mínimo en el método se utilizaron 5000 iteraciones. Debido a que el error absoluto es igual a $\frac{1}{\sqrt{N}}$ donde N es el número de iteración, se logró un error del 1.4%. Al final se determinó que el error es despreciable en este estudio.

Finalmente se seleccionaron todas las variables y restricciones tanto de oferta como demanda y balanceo. Con ello, se analizó el caso del consumo nominal como prioridad, observando que con los compresores cuando ofertan toda su capacidad efectiva (tabla 3.12) no satisfacen la demanda de todas las áreas (tabla 3.13.) (figura 3.25.).

Tabla 3.13. Oferta de producción dada por los compresores escenario nominal.

	Código	Oferta	
c1	921CM01	482,4	= 482,4
c2	921CM02	482,4	= 482,4
c3	921CM03	482,4	= 482,4
c4	921CM09	496,8	= 496,8
c5	922CM07	328,32	= 328,32
c6	922CM01	312,48	= 312,48
c7	922CM04	633,6	= 633,6
c8	922CM05	633,6	= 633,6
c9	922CM06	899,28	= 899,28
c10	922CM08	327,6	= 327,6
c11	921CM04	642,24	= 642,24
c12	921CM05	642,24	= 642,24
c13	921CM06	642,24	= 642,24
c14	921CM07	642,24	= 642,24
c15	921CM08	642,24	= 642,24

Tabla 3.14. Demanda de las áreas en escenario nominal.

	Área	Demanda			Faltante
a1	Cemento2	520,0	=	520,0	0,0
a2	Edificio3 (M.Primas Cementos)	27,6	=	27,6	0,0
a3	Envase	740,1	=	740,1	0,0
a4	Cemento1	0,0	=	283,1	283,1
a5	Crudo1	157,3	=	157,3	0,0
a6	Pre calentador1	2053,9	=	2053,9	0,0
a7	Colector grande	265,9	=	265,9	0,0
a8	Enfriadora1	260,5	=	1466,5	1206,0
a9	Pretrituración	69,0	=	69,0	0,0
a10	M. Primas	0,0	=	42,3	42,3
a11	Crudo 2	155,1	=	155,1	0,0
a12	Precaentador 2	1313,0	=	1911,6	598,5
a13	Enfriadora 2	1538,2	=	1538,2	0,0
a14	Molino de Carbón	204,9	=	204,9	0,0

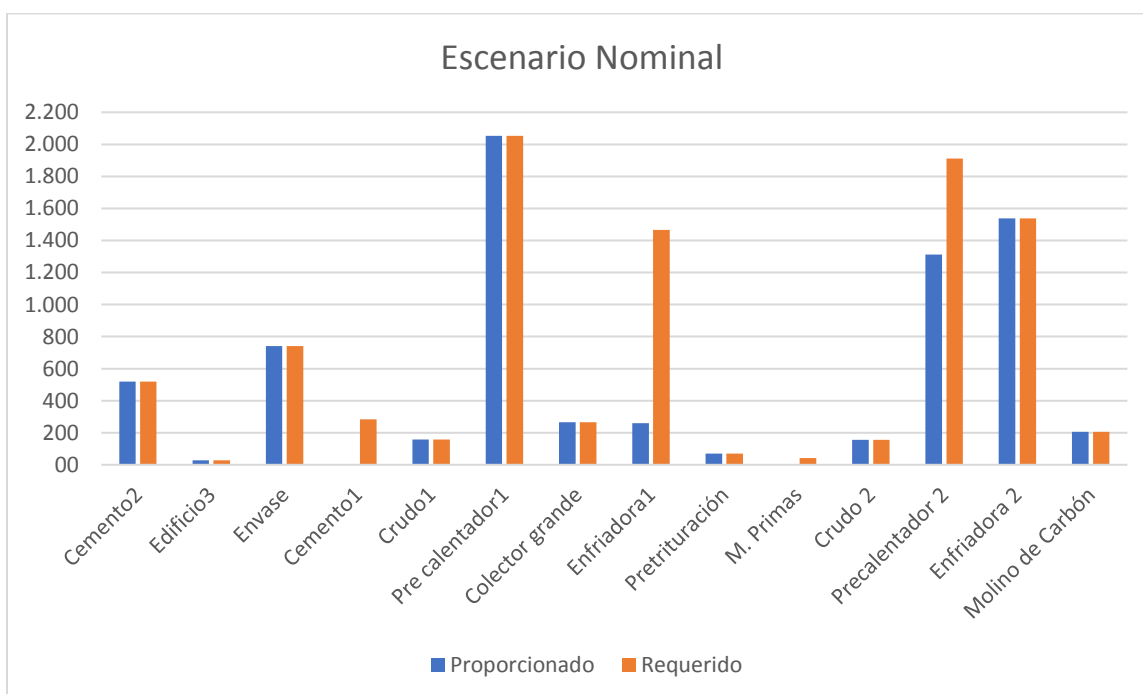


Figura 3.25. Demanda abastecida en el escenario Nominal

Cómo se aprecia en la figura 3.26., los datos obtenidos tienen concordancia con los datos de KAESER COMPRESORES en su auditoría, por lo cual se determinó que existe descompensación de aire en las diferentes áreas del sistema. Para satisfacer esta falta sugirieron la compra de compresores con mayor eficiencia u oferta de aire comprimido.

11. Conclusiones	
PLANTA	UNACEM LÍNEA 2
Cantidad de compresores	5
Potencia total instalada en compresores	850 HP
Capacidad instalada en la planta	3878 CFM
Datos Generales Obtenidos en la Auditoría	
Consumo máximo de aire de la planta	3878 CFM
Presión máxima / mínima de la red	99/ 79 psi(a)
Descripción de la situación encontrada	La planta opera las 24 horas incluidos los fines de semana, con una operación de los equipos del 100%. Se observa caídas de presión de hasta 20 PSI las cuales muestran una falta de aire en el sistema.
Costo anual para generar aire comprimido	\$ 215,498.81 /Año
Costo de cada pie ³ de aire	\$ 0.0002 \$/pie ³
Eficiencia del sistema	18.22 kW / [100 cfm]
Propuesta KAESER	De acuerdo a los datos obtenidos se debe reemplazar los equipos por 3 ESD 300 con esto se cubrirá la demanda actual y el requerimiento adicional para mantener 100 PSI de presión. A esto se debe implementar un sistema de tratamiento de condensados adecuado para alcanzar la calidad 1.4.2
Costo anual para generar aire comprimido	USD \$ 214.321,50 / Año
Costo de cada pie ³ de aire	USD \$ 0.0002 /pie ³
Eficiencia del sistema	18.35 kW / [100 cfm]
AHORRO DE ENERGÍA	USD \$ 1,177.31
Generación de Condensados	195,172 Gal/Año

Figura 3.26. Conclusiones auditoria KAESER Compresores 16-11-2018. [24]

El mismo procedimiento fue realizado para los escenarios pesimista teniendo un resultado similar al nominal, pero con un mayor déficit de aire en sus áreas como se ve en tabla 3.14. (Figura 3.27.). Por su parte, con el optimista se puede cubrir toda la demanda de aire comprimido (tabla 3.15.) y reducir el trabajo de los compresores como observamos en tabla 3.16.

Tabla 3.15. Demanda de las áreas en escenario pesimista.

	Área	Demanda		Faltante
a1	Cemento2	520,0	= 520,0	0,0
a2	Edificio3 (M. Primas Cementos)	27,6	= 27,6	0,0
a3	Envase	740,1	= 740,1	0,0
a4	Cemento1	0,0	= 283,1	283,1
a5	Crudo1	157,3	= 157,3	0,0
a6	Pre calentador1	2580,3	= 2753,9	173,7
a7	Colector grande	0,0	= 265,9	265,9
a8	Enfriadora1	0,0	= 1816,5	1816,5
a9	Pretrituración	69,0	= 69,0	0,0
a10	M. Primas	0,0	= 42,3	42,3
a11	Crudo 2	155,1	= 155,1	0,0
a12	Precaentador 2	963,0	= 2611,6	1648,5
a13	Enfriadora 2	1888,2	= 1888,2	0,0
a14	Molino de Carbón	204,9	= 204,9	0,0

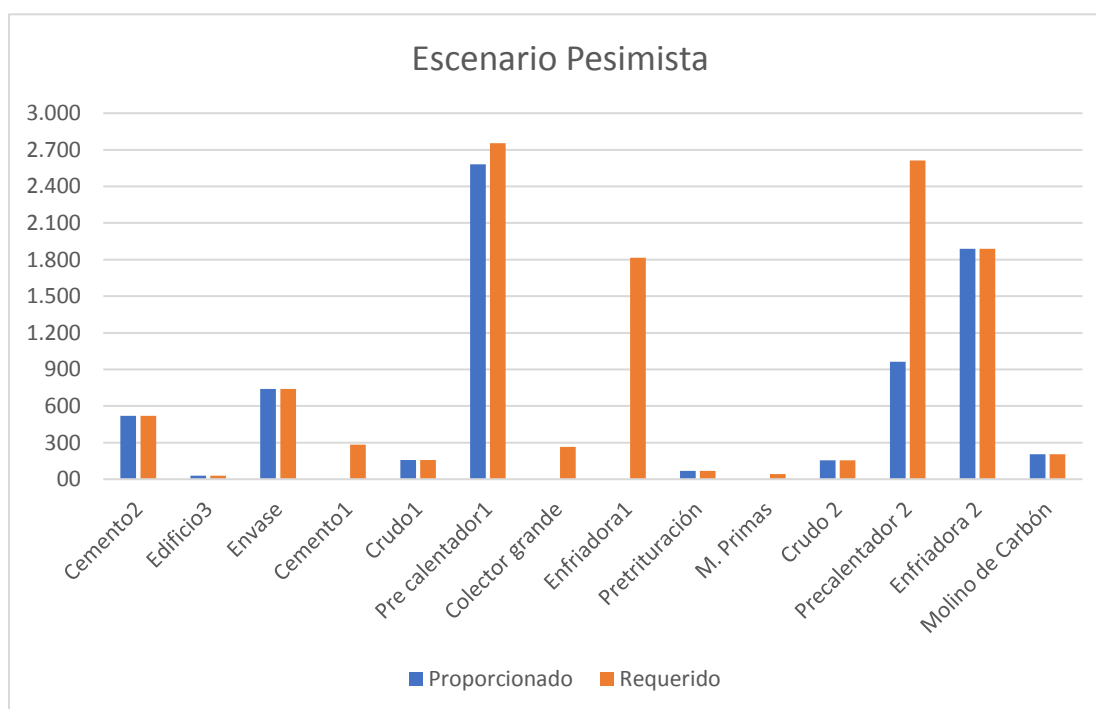


Figura 3.27. Demanda abastecida en el escenario Pesimista

Tabla 3.16. Demanda de las áreas en escenario optimista.

	Área	Demanda			Faltante
a1	Cemento2	520	=	520	0
a2	Edificio3 (M.Primas Cementos)	27,6	=	27,6	0
a3	Envase	740,1	=	740,1	0
a4	Cemento1	283,08	=	283,08	0
a5	Crudo1	157,3	=	157,3	0
a6	Pre calentador1	1003,9	=	1003,9	0
a7	Colector grande	265,9	=	265,9	0
a8	Enfriadora1	766,49	=	766,49	0
a9	Pretrituración	69	=	69	0
a10	M. Primas	42,3	=	42,3	0
a11	Crudo 2	155,1	=	155,1	0
a12	Precaentador 2	1211,6	=	1211,6	0
a13	Enfriadora 2	838,19	=	838,19	0
a14	Molino de Carbón	204,9	=	204,9	0

Tabla 3.17. Oferta de producción dada por los compresores escenario optimista.

	Código	Oferta		
c1	921CM01	482,4	<=	482,4
c2	921CM02	65,2	<=	482,4
c3	921CM03	243,3	<=	482,4
c4	921CM09	496,8	<=	496,8
c5	922CM07	283,1	<=	328,3
c6	922CM01	312,5	<=	312,5
c7	922CM04	633,6	<=	633,6
c8	922CM05	633,6	<=	633,6
c9	922CM06	355,3	<=	899,3
c10	922CM08	327,6	<=	327,6
c11	921CM04	642,2	<=	642,2
c12	921CM05	642,2	<=	642,2
c13	921CM06	642,2	<=	642,2
c14	921CM07	483,0	<=	642,2
c15	921CM08	0,0	<=	642,2

Como se observa en la figura 3.28., el escenario optimista garantiza que no todos los compresores trabajen al máximo de su capacidad.

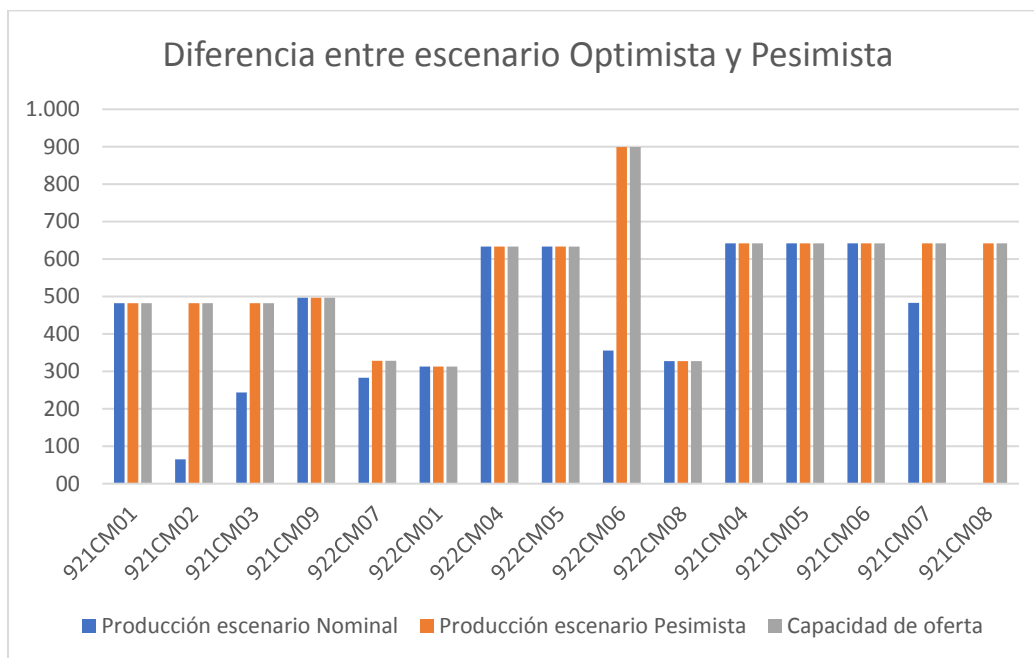


Figura 3.28. Diferencia entre escenario optimista y pesimista en oferta de aire comprimido

4.5 PROPUESTAS DE OPTIMIZACIÓN

Por último, con base en los estudios realizados fue posible ofrecer alternativas para el funcionamiento óptimo y eficiente del sistema.

4.5.1 ELIMINACIÓN DE FLAUTAS DE AIRE (CHISGUETES)

Los Chisquetes de aire son una mala práctica, carente de eficiencia en el momento de utilizarlos para enfriamiento. Por esta razón se planteó reemplazarlos por ventiladores. Estos aparatos pueden cumplir el mismo fin, pero con un menor costo y mayor eficiencia. Como evidencia se muestran dos cuadros que permiten establecer semejanzas y diferencias con relación al costo del uso de ventiladores (tabla 3.18.) respecto al uso de chisquetos (tabla 3.19.)

Tabla 3.18. Costos por ventiladores.

Ventilador (2200 Cfm)					
Costo	Cantidad	Costo instalación por punto	Número de puntos	Inversión	
\$330,00	4	\$5.000,00	2	\$11.320,00	
Watts	kW/día	\$/día	\$ Energía/año	Factor de uso	
469,2	45,043	2,928	\$ 1.068,65	80%	\$ 854,92
Inversión final	\$	12.388,65	\$	12.174,92	

Para obtener el estimado de costos por parte de los chisguetes se utilizó el costo por pie cúbico de aire comprimido, mismo que se logró obtener en la relación de la capacidad de Cfh (pies cúbicos por hora) con respecto al costo en una hora de producir esta cantidad. Al final el costo final fue de \$/ft³ 0.00027.

Tabla 3.19. Costos por chisguetes.

Chisguetes (350 Cfm)			
\$/ft ³	Cantidad	\$ Chisguetes/día	\$ Chisguetes/año
\$ 0,00027	4	\$ 537,81	\$ 196.299,35
Factor de uso		80%	\$ 157.039,48
AHORRO Ventilador		\$	144.864,56

Como se observa en los gráficos, los ventiladores tienen mayor capacidad de flujo de aire (2200 Cfm) a un menor costo y gasto de energía, debido a que estos no utilizan el aire comprimido para su funcionamiento. De igual forma es posible realizar su control directamente desde el panel central sin mayor dificultad. Por otra parte, se determinó que pueden funcionar programados desde un panel de control y que se activen únicamente cuando sean necesarios, a diferencia de las flautas de aire que dependen de una persona para la apertura y cierre de sus válvulas. Además, representan un ahorro al año representativo respecto al uso de aire comprimido para la misma aplicación.

4.5.2 OPTIMIZACIÓN DE COMPRESORES

Al respecto de las evidencias y resultados obtenidos con la presente investigación William Thomson (Lord Kelvin, 1883), expresó: “Lo que no se define no se puede medir. Lo que no se mide, no se puede mejorar. Lo que no se mejora, se degrada siempre”.

4.5.2.1 MEDICIÓN DE CAUDAL CON FLUJÓMETRO

Con la investigación y propuesta desarrollada se plantea la necesidad de medir el caudal de aire y tener constancia de la cantidad requerida en las diferentes áreas con el uso de flujómetros en puntos críticos del sistema de aire comprimido. De esta manera se podría realizar un manejo óptimo del funcionamiento de los compresores en torno a la demanda requerida por parte de los equipos.

4.5.2.2 MEDICIÓN DE CAUDAL CALCULADO

Otra alternativa para contabilizar el consumo sería estimar un flujo mediante el cálculo del consumo de los compresores en kWh con respecto a las áreas en funcionamiento en ese instante (Figura3.29.), ya que se conoce la capacidad de producción de cada compresor. Con ello se verificaría cuales compresores se encuentran en carga y cuales, en descarga, pudiendo así definir cuáles son los compresores que realizan un trabajo mayor en ese momento. A esto se podría añadir el uso de compresores según su eficiencia, tomando en cuenta la relación de kWh/Cfm, dando mayor prioridad de funcionamiento a los compresores que generan mayor cantidad de Cfm por kWh (más eficientes).

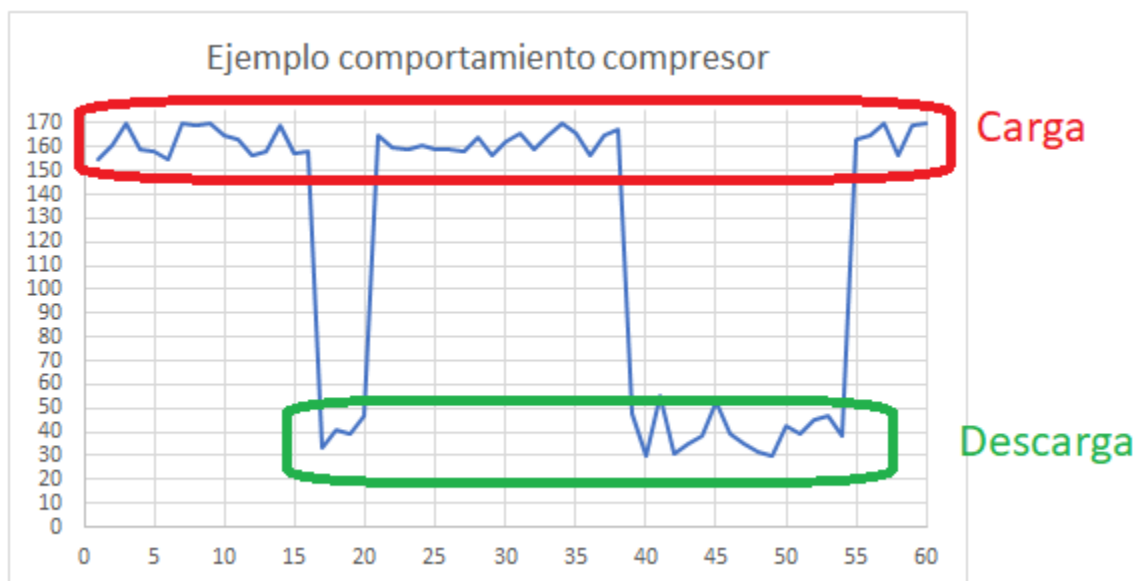


Figura 3.29. Ejemplo funcionamiento de un compresor carga/descarga en una hora.

4.5.2.3 AUTOMATIZACIÓN DE COMPRESORES

Desde el punto de vista de la mecatrónica se busca realizar las tareas de producción aplicando un conjunto de elementos tecnológicos. De ahí la importancia de la automatización ya que radica en mejorar la productividad y simplificar las condiciones y operaciones de trabajo.

El funcionamiento de los compresores instalados en planta actualmente es de carga y descarga de manera intencional, debido a que la modulación por medio de la válvula de admisión de aire no es óptimo. Una alternativa para mejorar la eficiencia del sistema de aire comprimido es la implementación de VDFs. Con ello se lograría una modulación que se ajuste a las necesidades de aire en cada instante, reduciendo así el consumo innecesario del funcionamiento al máximo de los compresores.

Sin embargo, el precio de implementación de estos dispositivos, en todos los compresores, llega a ser un inconveniente. Una posible alternativa sería instalar únicamente un dispositivo por cuarto de compresores. De esta manera se tendría algunos compresores (principales) en funcionamiento constante y un compresor que ayude a modular en momentos en los cuales sea necesario debido a la demanda de aire. Estos compresores serían puestos en marcha desde el panel central según los requerimientos de presión y flujo del sistema en un determinado periodo de

tiempo. Esta solución permitiría reducir en un porcentaje representativo los costos de generación de aire comprimido como se observa en la figura 3.30.

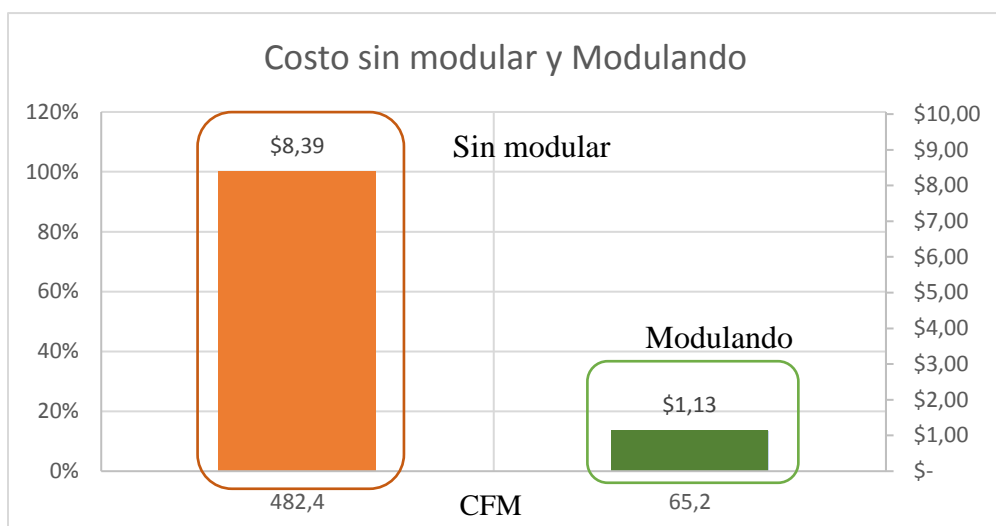


Figura 3.30. Costo compresor modulando y sin modular.

Este escenario de ejemplo se establece considerando la existencia de una necesidad de modulación del 14%

En este caso fueron considerandos los valores de la tabla 3.20.; debido a que todos los compresores tienen la misma eficiencia (kWh/100CFM) el funcionamiento óptimo sería c1, c3 y c4 con funcionamiento normal y c2 siendo modulado.

Tabla 3.20. Compresor modulado.

	Código	Oferta	kWh/100 Cfm
c1	921CM01	482,4 <= 482,4	26,7
c2	921CM02	65,2 <= 482,4	26,7
c3	921CM03	482,4 <= 482,4	26,7
c4	921CM09	496,8 <= 496,8	25,6

Se tendría un ahorro aproximado de \$7.26 por hora, mismo que representa un ahorro de \$63597 anuales, considerando un trabajo continuo los 365 días del año con una modulación de trabajo del 14%.

Todos los valores son aproximaciones, debido a que se utilizaron únicamente datos documentales provistos por los fabricantes de estos equipos.

4.5.3 CERRAR TODO EL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO COMO UN ANILLO

Como se destaca en [25] la mejor configuración para un sistema de aire comprimido es formar un anillo cerrado. De esta forma se consigue una alimentación uniforme para todas las áreas que requieran aire comprimido. Por otra parte, permitiría continuidad en el servicio de aire comprimido ante averías, gracias a las válvulas ubicadas en cada sector, pudiendo así trabajar normalmente como una red abierta de ser necesario [26].

Dado el caso se propone cerrar el sistema de aire comprimido formando un anillo entre el Cemento 2 y la línea 2 (Molino de crudo 2, horno y enfriadora 2) ya que actualmente el sistema forma una “U” invertida. Esta forma de instalación determina mejoras en la conexión entre estos dos sectores, ya que físicamente se encuentran a una corta distancia (Figura 3.31.). De esta manera se logrará una mayor eficiencia en toda la red de aire, además de satisfacer de mejor manera la demanda de aire en todas las áreas de la planta. Por último, también es necesario reubicar el secador de aire al área de envase, pues, en dicha área la exigencia de la calidad de aire es alta y de esta manera se evitará tener conflictos con la calidad de aire que circula por el resto de la planta.

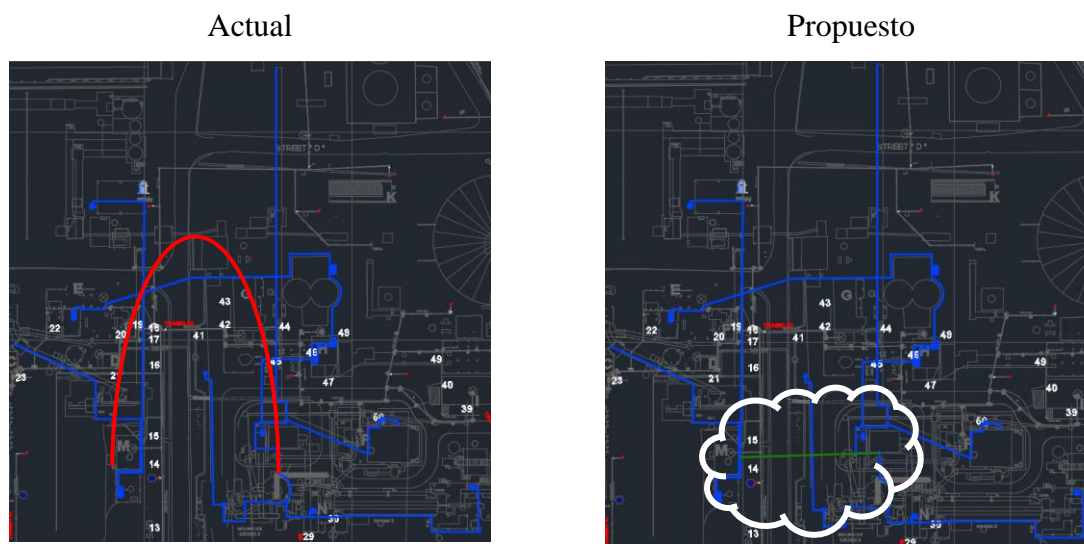


Figura 3.31. Anillo sistema de aire comprimido cerrado.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Conocer los fundamentos teórico-metodológicos de la optimización de sistemas de aire comprimido como las normas ISO 50001 y 11011 permiten tener una visión global del estado inicial de un sistema y focalizar fácilmente oportunidades de mejora.

Es necesario estar al tanto de la situación inicial del sistema de aire comprimido de la planta industrial, puesto que esto permite concebir claramente posibles problemas que eviten un funcionamiento óptimo de los diferentes procesos como son el uso de chisquetes de aire para sistemas de enfriamiento, puesto que estos representan un costo anual de \$157.039,48 considerando un factor de uso del 80%.

Con base en la evidencia fue posible generar alternativas de optimización del sistema de aire comprimido como la eliminación de las flautas de aire, automatización de compresores, uso de variadores de frecuencia y cerrar todo el sistema como un anillo, basándose en el estado actual y sin necesidad de recurrir a modificaciones drásticas del sistema ni opciones sumamente costosas.

5.2 RECOMENDACIONES

Para garantizar el correcto funcionamiento de los equipos que requieren aire comprimido es necesario tener una calidad de aire adecuada en lo posible sin humedad, por lo cual se recomienda dar uso a los secadores de aire por lo menos en equipos que así lo requieran como son los colectores de polvo, con eso se extendería el tiempo de vida de las mangas y se evitaría la corrosión en tanques pulmón y tuberías.

Purgar con frecuencia los pulmones y líneas de aire comprimido, evitando dejar abiertas las válvulas más del tiempo necesario para depurar los condensados, para evitar pérdidas y tener una mejor calidad de aire.

Realizar una inspección frecuente de fugas y espesores tanto en pulmones como en las tuberías principales para corregirlas y evitar los costos que estas representan.

Intensificar el plan de mantenimiento preventivo para aire comprimido y reemplazar tramos de tubería enterrada por tubería aérea para suministro de aire.

Realizar un análisis de los condensados para evaluar el estado del sistema de aire comprimido

REFERENCIAS

- [1] L. G. Arango y C. M. López, *Globalización, apertura económica y relaciones industriales en América Latina*, Tumaco: Centro Editorial Facultad de Ciencias Humanas, 1999.
- [2] «DOCPLAYER,» [En línea]. Available: https://docplayer.es/85886052-I-1-resena-historica.html#show_full_text.
- [3] UNACEM, «UNACEM Ecuador,» [En línea]. Available: <https://unacem.com.ec/>.
- [4] E. Carnicer Royo, *Aire Comprimido: Teoría y cálculo de las instalaciones*, Madrid: PARANINFO S.A.
- [5] EcuRed, «Presión Atmosferica,» [En línea]. Available: https://www.ecured.cu/Presión_atmosférica. [Último acceso: 02 07 2019].
- [6] G. Koltun, M. Kolter y B. Vogel-Heuser, «Automated Generation of Modular PLC Control Software from P&ID Diagrams in Process Industry,» *IEEE Xplore*.
- [7] Ingenieria Industrial Online, «Investigación de Operaciones,» [En línea]. Available: <https://www.ingenieriaindustrialonline.com/herramientas-para-el-ingeniero-industrial/investigación-de-operaciones/problema-de-transbordo/>.
- [8] La Universidad del País Vasco, «Procedimientos numéricos,» [En línea]. Available: http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica_/numerico/montecarlo/montecarlo.html.
- [9] J. Martín, «CEREM International Business School,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.cerem.ec/blog/cuanto-vale-el-riesgo-el-metodo-montecarlo>.
- [10] INCAE BUSINESS SCHOOL, «Herramientas gerenciales para la optimización del consumo energético,» 2012. [En línea]. Available: <https://conocimiento.incae.edu/ES/centros-academicos-investigacion/HerramientasGerenciales-AhorroEnergia.pdf>.

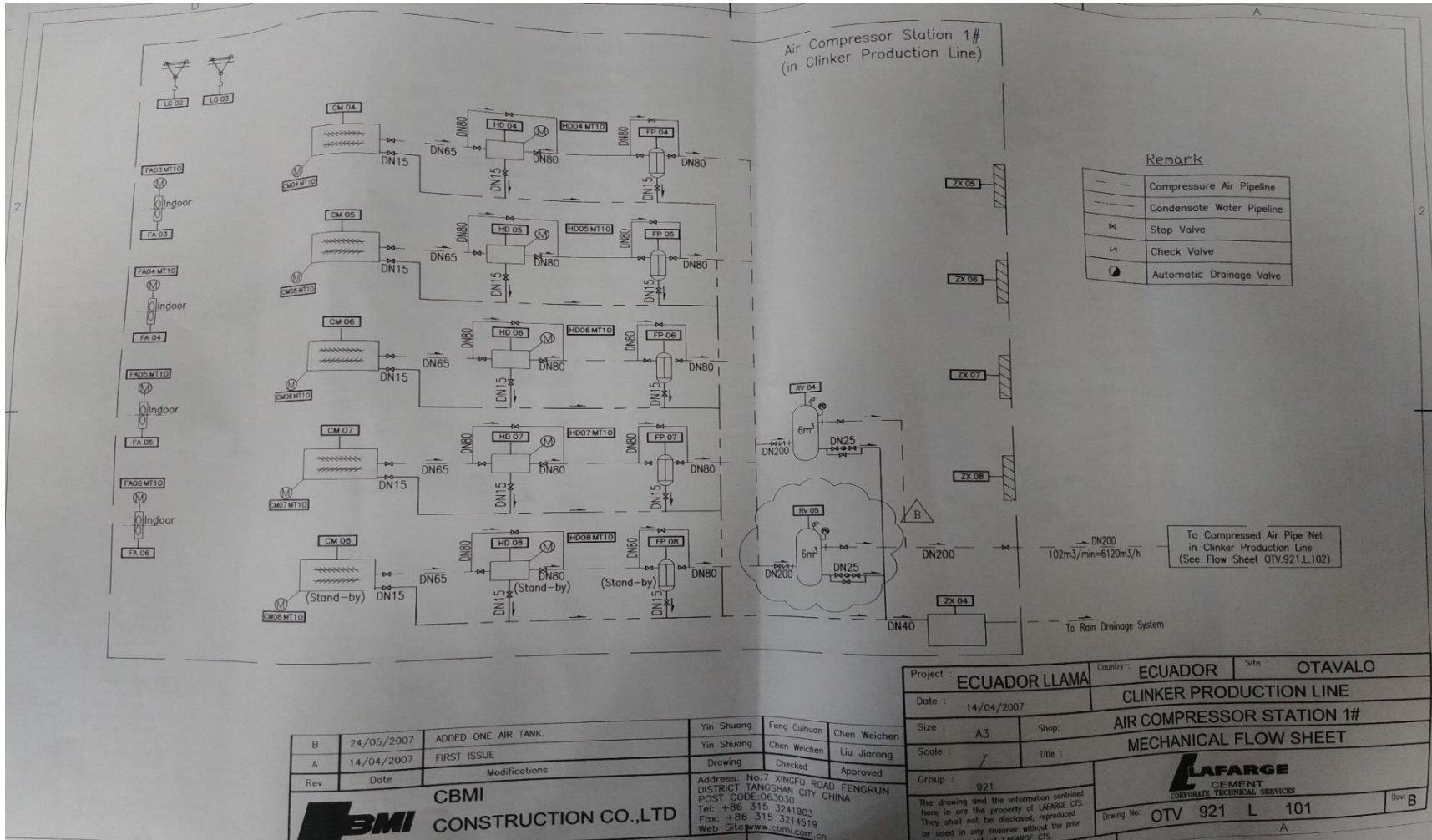
- [11] World Energy Council, «Energy Efficiency Policies around the World: Review and Evaluation.» [En línea]. Available: <http://www.worldenergy.org>.
- [12] My Energy Solutions, «Energy efficiency is doing more with less energy.» [En línea]. Available: <http://www.myenergysolution.com/>.
- [13] B. Asare-Bediako, W. Kling y P. Ribeiro, «Integrated Energy Optimization with Smart Home Energy Management Systems,» *IEEE Xplore*, 2012.
- [14] G. F. Achig Morales, *Auditoría energética en la granja porcina el cabuyal de la empresa grupo oro y propuesta técnica de mejoras para la optimización del uso y gestión de la energía*, Ibarra, 2016.
- [15] CONELEC, «IV Aspectos de sustentabilidad y sostenibilidad social y ambiental,» [En línea]. Available: <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/12/Vol4-Aspectos-de-sustentabilidad-y-sostenibilidad-social-y-ambiental.pdf>.
- [16] TECA, «Técnicas de Energías y Calidad Ambiental,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.tecaingenieros.es/servicios/eficiencia-energetica/>. [Último acceso: 02 Julio 2019].
- [17] J. Abramson Miller, «Auditoria energética,» 7 Agosto 2010. [En línea]. Available: <http://julianabramson.blogspot.com/2010/08/auditoria-energetica-primera-parte.html>.
- [18] MARTIN, *Technical Data Sheet Big Blaster Hurricane*.
- [19] OLI, *Technical Data Sheet Linear Pneumatic Vibrators*.
- [20] FLSMIDTH, *Dosificador de Harina Cruda*.
- [21] CEACSA, «Cálculo de fugas,» [En línea]. Available: <http://ceacsa.com.mx/herramienta/calculo-fugas.php#>.
- [22] TLV, «Cálculo de fugas,» [En línea]. Available: <https://www.tlv.com/global/LA/calculator/air-flow-rate-through-orifice.html>.
- [23] REDECAMGROUP, *Manual de instrucciones-Reglas de operación y mantenimiento*.

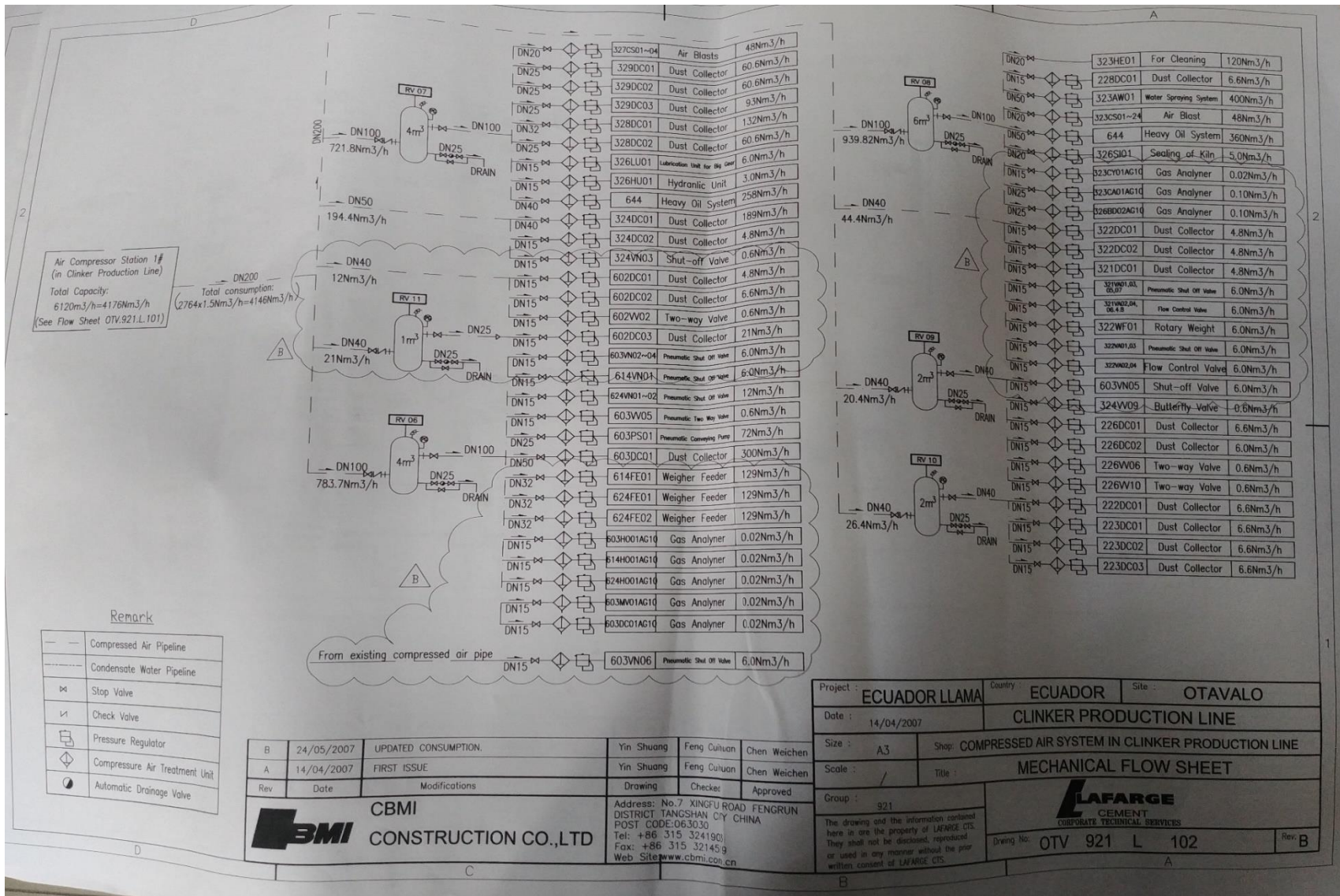
- [24] F. Lanas, «Kaeser compresores Advanced Air Demand Analysis: Unacem Ecuador Sala 2,» 2018.
- [25] H. Rodríguez Galbarro, «Ingemecánica,» [En línea]. Available: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn201.html>.
- [26] «Automatización Industrial,» [En línea]. Available: <http://industrial-automatica.blogspot.com/2010/09/distribucion-de-aire-comprimido.html>.

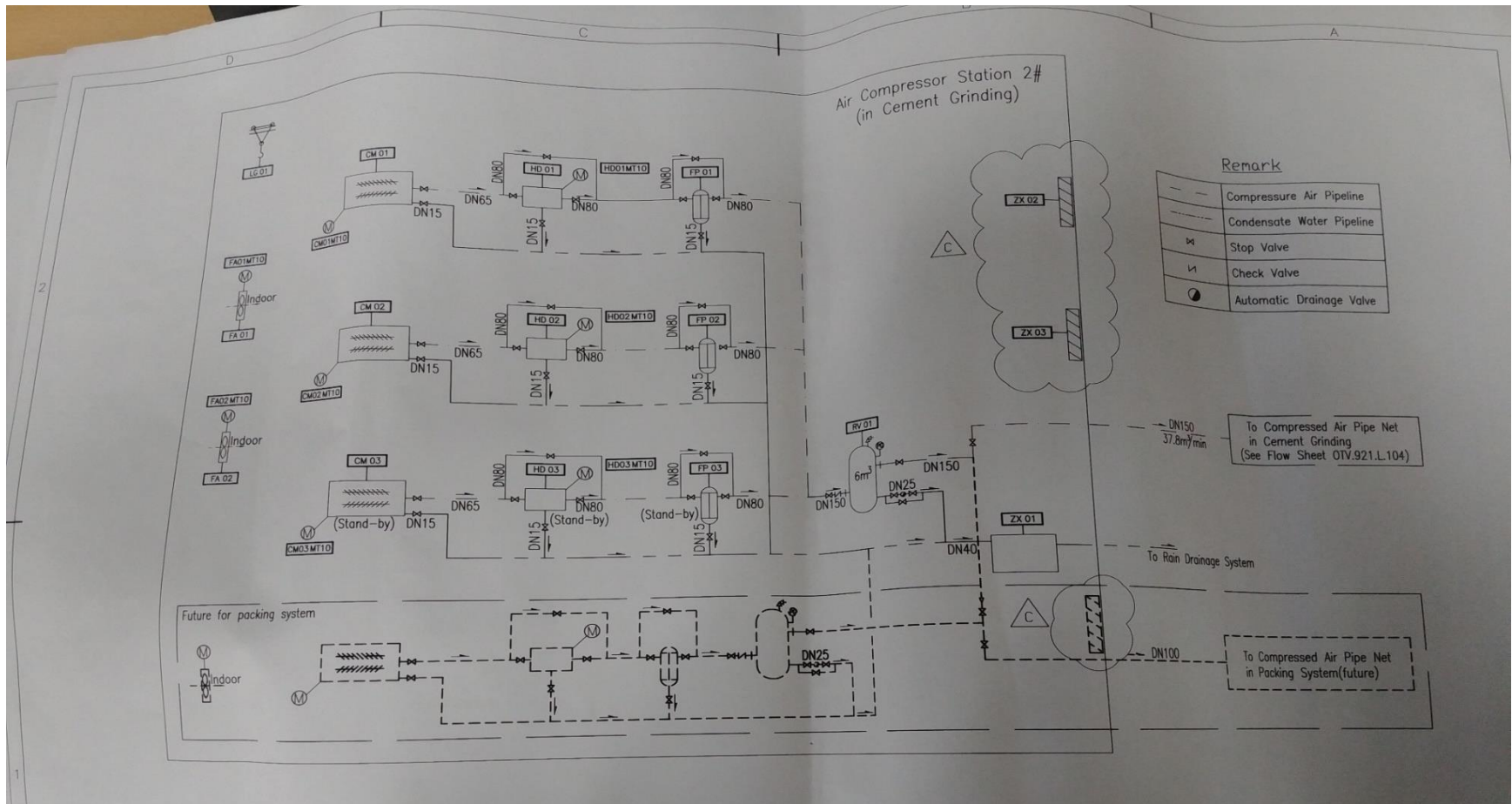
ANEXOS

ANEXO 1 P&ID UNACEM.

Fuente: Archivos UNACEM







Remark

---	Compressure Air Pipeline
----	Condensate Water Pipeline
M	Stop Valve
∨	Check Valve
⊙	Automatic Drainage Valve

DN150
37.8m³/min
To Compressed Air Pipe Net
in Cement Grinding
(See Flow Sheet OTV.921.L.104)

To Rain Drainage System

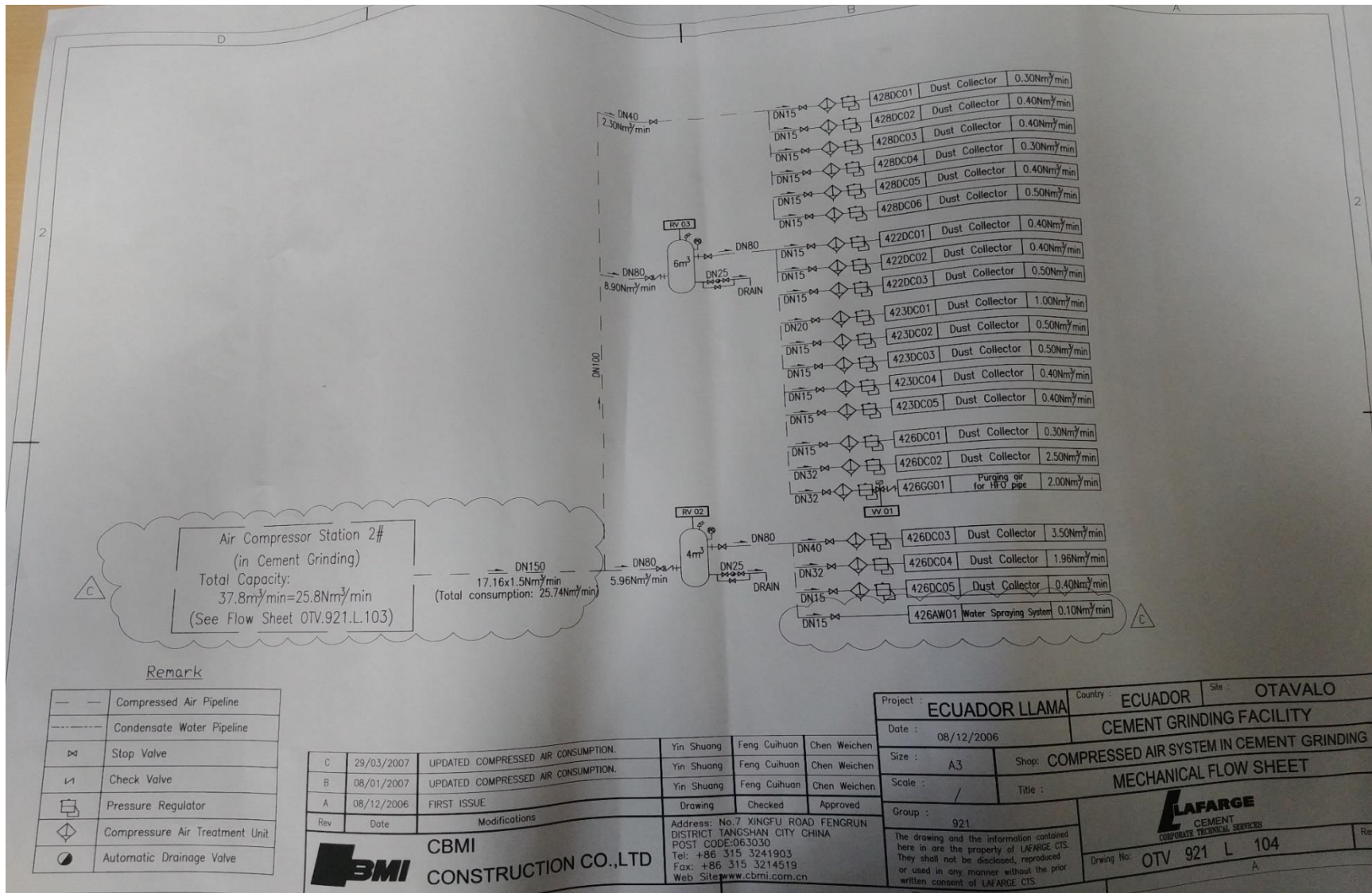
DN100
To Compressed Air Pipe Net
in Packing System(future)

Rev	Date	Modifications	Drawing	Checked	Approved
C	29/03/2007	ADDED TWO WALL LOUVERS.	Yin Shuang	Chen Weichen	Liu Jiarong
B	08/01/2007	UPDATED ACCORDING TO COMMENTS OF CTS.	Yin Shuang	Chen Weichen	Liu Jiarong
A	08/12/2006	FIRST ISSUE	Yin Shuang	Chen Weichen	Liu Jiarong

CBMI

Address: No.7 XINGFU ROAD FENGRUN DISTRICT TANGSHAN CITY CHINA

Project :	ECUADOR LLAMA	Country :	ECUADOR	Site :	OTAVALO
Date :	08/12/2006	CEMENT GRINDING FACILITY			
Size :	A3	Shop:	AIR COMPRESSOR STATION 2#		
Scale :	/	Title :	MECHANICAL FLOW SHEET		
Group :	921				



Air Compressor Station 2#
(in Cement Grinding)
Total Capacity:
37.8m³/min=25.8Nm³/min
(See Flow Sheet OTV.921.L.103)

Remark

—	Compressed Air Pipeline
- - -	Condensate Water Pipeline
⊗	Stop Valve
⊘	Check Valve
⊞	Pressure Regulator
◇	Compressure Air Treatment Unit
⦿	Automatic Drainage Valve

Rev	Date	Modifications			
C	29/03/2007	UPDATED COMPRESSED AIR CONSUMPTION.	Yin Shuang	Feng Cuihuan	Chen Weichen
B	08/01/2007	UPDATED COMPRESSED AIR CONSUMPTION.	Yin Shuang	Feng Cuihuan	Chen Weichen
A	08/12/2006	FIRST ISSUE	Yin Shuang	Feng Cuihuan	Chen Weichen

Address: No.7 XINGFU ROAD FENGRUN DISTRICT TANGSHAN CITY CHINA
POST CODE:063030
Tel: +86 315 3241903
Fax: +86 315 3214519
Web Site:www.cbmi.com.cn

CBMI
CONSTRUCTION CO.,LTD

Project :	ECUADOR LLAMA	Country :	ECUADOR	Site :	OTAVALO
Date :	08/12/2006	CEMENT GRINDING FACILITY			
Size :	A3	Shop: COMPRESSED AIR SYSTEM IN CEMENT GRINDING			
Scale :	/	Title : MECHANICAL FLOW SHEET			
Group :	921				
The drawing and the information contained here in are the property of LAFARGE CTS. They shall not be disclosed, reproduced or used in any manner without the prior written consent of LAFARGE CTS.					
Drawing No: OTV 921 L 104					

ANEXO 2 LAYOUT ACTUALIZADO

ANEXO 3 P&ID

ANEXO 4 INFORME URKUND