UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

VALPARAÍSO-CHILE

“DESARROLLO DE UN MODELO DE MEJORA CONTINUA PARA IDENTIFICAR LAS CAUSAS Y PROYECTAR EL DESGASTE POR ABRASIÓN EN DUCTOS DE TRANSPORTE DE CARBÓN EN PLANTA TERMO-ELÉCTRICA (AES GENER, CENTRAL VENTANAS)”

CONSTANZA BELÉN MUÑOZ SEPÚLVEDA

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA: ING. RENÉ VALDENEGRO OYANEDER

PROFESOR CORREFERENTE: DR. ING. PEDRO SARIEGO PASTÉN

FEBRERO-2018

I.RESUMEN EJECUTIVO

El siguiente trabajo de título fue propuesto por la empresa termoeléctrica AES Gener, consistió en el desarrollo de un modelo de predicción del desgaste producido por la abrasión del carbón en tuberías de transporte, realizando un levantamiento de información de los parámetros y variables que afectan este desgaste e identificando los tramos más críticos. Además de identificar la Gestión de Riesgos para manejar la toma de decisiones frente al problema de abrasión.

El sistema de transporte de carbón, desde los pulverizadores hasta los quemadores que inyectan combustible en el hogar de la caldera para su combustión, posee un transporte neumático de carbón previamente pulverizado a una razón de 15-17 [ton/hr]. Este carbón pulverizado es inyectado por aire proveniente de los ventiladores de aire primario para obtener una mezcla de aire-carbón en la proporción de 1,5 kg de aire por cada kg de carbón, necesaria para el transporte y producción de una buena combustión. Se analizó que variables en este transporte aportan en el aumento en la erosión producida en las tuberías de transporte y las configuraciones de los cambios de dirección en las tuberías que afectan en el desgaste. También se analizó el tipo de mantenimiento realizado a los ductos de transporte y como afecta en la regularidad de reparaciones. En base a esto finalmente se propone un mayor control de la razón aire-carbón a transportar, una mejora de material en las zonas más afectadas por la erosión y la elaboración de un mantenimiento preventivo a las configuraciones de tubería.

Las alternativas presentadas de mejora de material generan un ahorro de alrededor de 50500 USD por reparación en ductos de transporte de carbón y un aumento de vida útil de 8 a 9 años

II.ABSTRACT

The following job title was proposed by the AES Gener Thermoelectrc Company. It consisted of the development of a design which could predict the wear caused by the coal abrasión in piping transport, gathering information about the parameters and variables that affect this wear and identifying the most critical sections. Besides identify the risk management to make decisions about how to face the abrasión issue.

Tha coal transport system, from the spray guns (atomizer) to the burners which inject gas into the cauldron for its combustion, it owns a pneumatic transport of coal previously pulverized at a rate of 15-17 (ton/hr). This pulverized coal is injected by air coming from primary air fans to get an air-coal mixture at a rate of 1,5 kg of air out of a coal kg needed for the transport and production of a good combustión. It was analized that variables in this kind of transport contributes to the increasement of the erosion produced in the transport pipes and the settings in the direction changes of the pipes which affect the wear. It was also analized the type of maintenance carried out to the transport tubes and how this affects the repair frecuencies. Based on this, we finally propose a major control of the rate air- coal to transport, a material improvement in the áreas which have been more affected by the erosion, and the elaboration of a preventive treatment to the tubes settings.

The alternatives presented to the material improvement créate a saving of about 50500 USD per tubes repair in coal transport and a lifespan increasement of 8-9 years.

III.GLOSARIO

ρ	Densidad [kg/m^3]
P	Presión absoluta [Pa]
R	Constante gases ideales [J/KgK]
δ	Espesor capa límite [mm]
T	Temperatura [°C]
Re	Número de Reynolds [-]
U	Velocidad media [m/s]
D	Diámetro interior tubería [m]
Q	Caudal de aire [$\frac{m^3}{s}$]
Et	Energía total en ecuación de Bernoulli [Pa]
z	Cota geométrica respecto a un nivel de referencia
v	Velocidad [m/s]
Δh	Pérdida de energía [Pa]
Δh_{ab}	Pérdida de energía entre el punto a y b [Pa]
f	Factor de fricción [-]
L	Largo tubería [m]
Re_D	
k	Coeficiente de fricción [-]
ΔP	Caída de presión [Pa]
ΔP_{GAS}	Consumo de energía de un gas dentro de una cañería [Pa]
$\Delta P_{ACELERACIÓN}$	Energía usada para acelerar partícula dentro de una cañería [Pa]
$\Delta P_{TUBERÍA}$	Perdida de carga por gas y sólidos dentro de una tubería [Pa]
ΔP_{CURVAS}	Energía consumida por cambio de dirección dentro de una cañería [Pa]
g	Fuerza gravedad $\left[\frac{m}{s^2}\right]$
t	Tiempo [s]
Sm	Masa añadida [kg]
Pe	Presión estática [Pa]
e	Energía [Pa] Rugosidad [mm]
τij	Tensor tensión [-]
x_i	Coordenada espacial en vector i
x_i	Coordenada espacial en vector j
υ	Viscosidad cinemática [Pa*s]
u_i	Velocidad en vector i [m/s]
u_j	Velocidad en vector j [m/s]
μ_t	Viscosidad turbulenta [$\frac{kg}{ms}$]
ε	Tasa disipación [-]
k	Energía cinética de turbulencia [Pa]

R erosión	Tasa de erosión $\left[\frac{kg}{m^2 s}\right]$
$C(d_p)$	Función diámetro partícula [m]
$f(\alpha)$	Función ángulo de impacto [rad]
b(v)	Función velocidad relativa de partícula [m/s]
A face	Área de impacto en pared de tubería $[m^2]$
ER	Tasa de erosión según material tubería $\left[\frac{kg}{m^2 s}\right]$
Fs	Coeficiente forma de partícula [-]
B	Dureza Brinell
ϵ	Espacio vacío dentro de una cañería
μ	Relación de carga [-]
w	Flujo másico [kg/s]

Subíndices

p	partícula
g	gas
a	Primera sección en tubería
b	Segunda sección en tubería

CONTENIDO

I. RESUMEN EJECUTIVO III

II. ABSTRACT IV

III. GLOSARIO V

IV. ÍNDICE ILUSTRACIONES IX

V. ÍNDICE TABLAS X

1. INTRODUCCIÓN 1

2. OBJETIVOS 5

2.1. OBJETIVO GENERAL 5

2.2. OBJETIVOS ESPECPIFICOS 5

3. MARCO TEÓRICO 6

3.1. Generación de energía en termoeléctrica 6

3.1.1. Ciclo térmico 7

3.1.2. Mejoras en el ciclo Rankine 8

3.2. Combustible: carbón 10

3.2.1. Propiedades 13

3.2.2. Carbón pulverizado. 14

3.3. Transporte neumático 16

3.3.1. Partículas transportadas 17

3.3.3. Flujo de gas para el transporte neumático 17

3.3.4. Pérdidas de energía 20

3.3.5. Clasificación de Sistemas de transporte neumático 24

3.3.7. Componentes básicos de un sistema de transporte neumático 26

3.4. Desgaste de material 27

3.4.1. Mecanismos de abrasión 28

3.4.2. Erosión 29

3.5. Herramienta computacional Ansys CFD 30

3.5.1. Erosión mediante CFD 32

4. CAPÍTULO: LA EMPRESA 38

4.1. Identificación del problema 38

4.2. Metodología 39

4.3. Proceso productivo 39

4.3.1. Generador de vapor ... 40
4.3.2. Turbina- Generador ... 42
4.3.3. Sistema de condesado ... 44
4.3.4. Sistema agua de alimentación ... 47
4.3.5. Sistema agua de enfriamiento ... 48
4.3.6. Sistema de combustible ... 49
4.4. Erosión en tubería transporte de carbón ... 58
4.5. Trayectoria del carbón ... 58
5. DESARROLLO DEL TEMA ... 60
5.1. Análisis del problema ... 63
5.1.1. IPlanes de Mantenimiento ... 64
5.1.2. Contexto operacional ... 64
5.1.3. Identificación riesgos ... 65
5.1.4. Diagrama causa- efecto ... 66
5.1.5. Análisis falla y criticidad ... 68
6. CÁLCULO Y CONDICIONES OPERACIONES DE LA LÍNEA DE TRANSPORTE ... 79
6.1. Características del material a transportar ... 79
6.2. Cálculo caídas de presión en las líneas de transporte ... 80
6.3. Erosión por Ansys, CFD ... 84
7. RESULTADOS CFD, FLUENT ANSYS ... 86
8. ANÁLISIS DE RESULTADOS ... 93
9. SOLUCIONES PROPUESTAS ... 94
9.1. Plan de mantenimiento preventivo ... 94
9.2. Variables que influyen en la erosión. ... 100
9.3. Propuesta de mejora ... 100
9.3.1. Otras soluciones existentes en el mercado ... 102
9.3.2. Análisis económico, mejora de material ... 103
10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES ... 105
11. BIBLIOGRAFÍA ... 106
12. Anexo A ... 107
Viscosidad [crane] ... 107
13. Anexo B ... 108
Diagrama de MOODY ... 108
14. Anexo C ... 109

Pérdidas en codos y curvas 109
Pérdidas en válvulas 109
15. ANEXO D 110
Curva de calibración de flujo de aire primario 110
16. Anexo E 111
Plano Unidad 1 111
Plano Unidad 2 112

IV.ÍNDICE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 matriz energética mundial. Fuente: Key Worl Energy Stadistics, IEA, 2016 [2] 2
Ilustración 2 Matriz energética primaria, año 2015 [3] 2
Ilustración 3 Consumo en centros de transformación, año 2015 [3] 3
Ilustración 4 Matriz de insumo de generación eléctrica [3] 3
Ilustración 5 ciclo Rankine ideal simple (Cengel, 2009) [4] 8
Ilustración 6 Diagrama T-S con sobrecalentamiento [Cengel.2009] [4] 9
Ilustración 7 Ciclo Rankine ideal con recalentamiento [Cengel 2009] [4] 10
Ilustración 8 Clasificación del carbón. Fuente: 13
Ilustración 9 crecimiento capa límite al interior de una tubería. Irving h. Shames. 4ta edición. Mecánica de Fluidos [10] 19
Ilustración 10 Diagrama de Moody, Irving H. Shames, 3era edición. Mecánica de Fluidos [10] 22
Ilustración 11 coeficiente de pérdida para curva de pared lisa Robert H. Perry, 7th edition. Perry´s Chemical Engineers´handbook [12] 23
Ilustración 12 descripción esquemática de los principales mecanismos de desgaste 28
Ilustración 13: Fuerza contacto partícula- superficie. Fuente: Estudio de desgaste abrasivo en Tuberías [16] 30
Ilustración 14 Descripción de los modelos de Fluent turbulencia. Ansys Fluent: Manual CFD, Fluent, Ansys [17] 33
Ilustración 15: Metodología a seguir para solucionar problemática. Fuente: Elaboración propia 39
Ilustración 16 proceso de generación. Fuente: AES Gener, 2017 40
Ilustración 17 Extracciones de vapor en turbina 43
Ilustración 18 Ubicación sistema de condensado en el ciclo agua-vapor 45
Ilustración 19: Sistema agua enfriamiento 49
Ilustración 20 Sistema de carbón 50
Ilustración 21: apilador radial 51
Ilustración 22: Carbones en cacha, Enero 2018 51
Ilustración 23: silos de almacenamiento carbón 52
Ilustración 24 Elementos internos de un pulverizador 54
Ilustración 25 Molino de Bolas 54
Ilustración 26 Diversos codos y curvas 57
Ilustración 27 sistema de carbón unidad 1 60
Ilustración 28 sistema de carbón unidad 2 61
Ilustración 29 Sistema ilustrativo transporte de carbón 61

Ilustración 30: Riegos de rotura de ducto de carbón 66
Ilustración 31: Diagrama de Ishikawa 67
Ilustración 32 Tasas de erosión BP10: a) Mezcla enriquecida b) mezcla empobrecida c) mezcla óptima 88
Ilustración 33 Tasas de erosión BP 40: a) Mezcla enriquecida b) Mezcla empobrecida c) Mezcla óptima 89
Ilustración 34 Tasas de erosión BP-69 a) Mezcla empobrecida b) Mezcla enriquecida c) Mezcla óptima 91
Ilustración 35 Tasas de erosión BP24/20R a) Mezcla empobrecida b) mezcla enriquecida c) mezcla óptima 92
Ilustración 36: Instrumento medición de espesores, Krautkramer familia DM4 95
Ilustración 37 Diagrama de medición de espesores a lo largo del ducto 96
Ilustración 38 Codo de desvío 103

V.ÍNDICE TABLAS

Tabla 1 Principales características del carbón. Fuente: Elaboración propia 12
Tabla 2: Secuencia curvas, codos, tramos rectos y válvulas, desde pulverizador hacia quemadores. Unidad 1 62
Tabla 3 curvas, codos, tramos rectos y válvulas, desde pulverizadores hacia quemadores, Unidad 2 62
Tabla 4: FMEA, ductos de carbón 71
Tabla 5: Guía de criticidad Unidad 2 72
Tabla 6 Guía de criticidad Unidad 1 73
Tabla 7 Tabla de valores criticidad, Unidad 2 75
Tabla 8 Tabla de valores criticidad, Unidad 1 75
Tabla 9 Tramos críticos a analizar, Unidad 2 76
Tabla 10 Configuraciones tramos críticos a analizar, Unidad 2 76
Tabla 11 Tabla 10 Tramos críticos a analizar, Unidad 1 77
Tabla 12 Configuraciones tramos críticos a analizar, Unidad 2 78
Tabla 13 Características del carbón 80
Tabla 14 Parámetros de entrada ductos de carbón, Unidad 1 82
Tabla 15 Parámetros de entrada ductos de carbón, Unidad 2 82
Tabla 16 Parámetros de entrada programa CFD, Ansys Unidad 1-2 85
Tabla 17: Resultados de Tasa Erosión obtenidos, ducto 2D2-BP10 87
¿Tabla 18 Resultados de Tasa Erosión obtenidos, ducto 2E4-BP40 88
Tabla 19 Resultados de Tasa Erosión obtenidos, ducto 2G3-BP69 90
Tabla 20 Resultados de tasa de erosión obtenidos, ductos 1C2/3-BP24/20R 91
Tabla 21 Ejemplo de plan de mantenimiento 96
Tabla 22 Criticidades A de componentes ductos de carbón, Unidad 1-2 97
Tabla 23 Criticidades B de componentes ductos de carbón, Unidad 2 97
Tabla 24 Criticidades B de componentes ductos de carbón, Unidad 1 98
Tabla 25 Criticidad C de componentes ductos de carbón, Unidad 2 99
Tabla 26 Criticidad C de componentes ductos de carbón, Unidad 1 99
Tabla 27 Flujo de caja 104
Tabla 28 Indicadores económicos 104

1. INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica se obtiene en centrales de generación, las cuales están determinadas por la fuente de energía que se utiliza, pudiendo ser del tipo renovables y no renovable. En el grupo de las renovables se encuentran las centrales hidráulicas, eólicas, solares y de biomasa. Cada una de estas fuentes indicadas se puede regenerar de manera natural o artificial. En cuanto, a las centrales que utilizan fuentes de energías que no son renovables, es decir, aquellas que tienen un uso ilimitado en el planeta y cuya velocidad de consumo es mayor que la de su regeneración, se encuentran las centrales térmicas y nucleares. En las centrales térmicas se produce electricidad a partir de recursos limitados como el carbón, petróleo, gas natural y otros combustibles fósiles. Para el caso de las nucleares la energía se produce a partir de fisión y fusión nuclear.

Hoy en día satisfacer la demanda global de energía eléctrica está comenzando a pasar factura al medioambiente del planeta. La generación de energía eléctrica se sigue obteniendo, en gran medida, por la quema de combustibles fósiles. Ésta combustión emite a la atmósfera dióxido de carbono que es el principal contribuyente al calentamiento global. Por otro lado, las reservas de combustibles fósiles, se estima, que dentro de uno 100-200 años las fuentes de combustibles fósiles se agotarían. [1]

La población humana sigue creciendo, y con ello las necesidades energéticas, por lo cual es de vital importancia independizarnos de las energías no renovables para dar lugar a una energía más limpia e inagotable. Siendo una buena alternativa el uso de energías limpias para así sustituir el declive de los combustibles fósiles. Sin embargo, el reto está en conseguir hacerlo de forma eficiente y rentable económicamente, por debajo del coste de producir esa energía como combustibles fósiles.

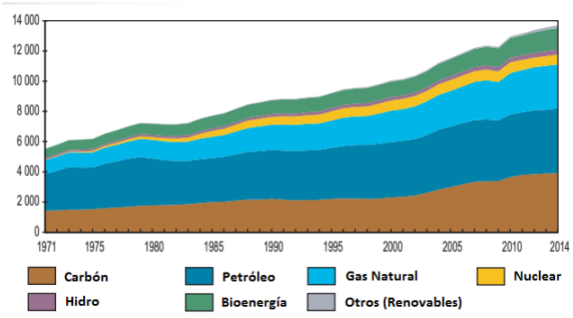


Ilustración 1 matriz energética mundial. Fuente: Key Worl Energy Stadistics, IEA, 2016 [2]

La matriz energética primaria en Chile muestra la participación de los energéticos obtenidos de recursos naturales, se determina tanto por producción, importación, exportación y variación de inventario. Al año 2015, según el balance nacional de energía [3], el petróleo crudo, carbón y biomasa lideran la lista de consumo, como se puede observar en el siguiente gráfico

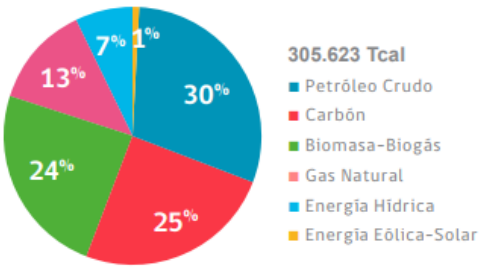


Ilustración 2 Matriz energética primaria, año 2015 [3]

Estas energías primarias se tienen que procesar para la obtención de la matriz energética de consumos finales. La mayor transformación de energía primaria se hace mediante centrales de generación de electricidad, tal como lo muestra el siguiente gráfico

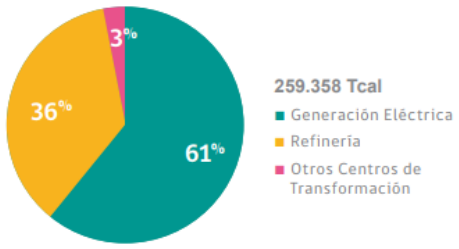


Ilustración 3 Consumo en centros de transformación, año 2015 [3]

La generación de energía eléctrica en Chile, según la matriz de insumos de generación eléctrica del año 2015, muestra que la combustión de energéticos fósiles alcanza alrededor de un 62% de la capacidad instalada y responsable de la generación eléctrica nacional encabezando la lista el carbón con un 44%, según muestra el siguiente gráfico:

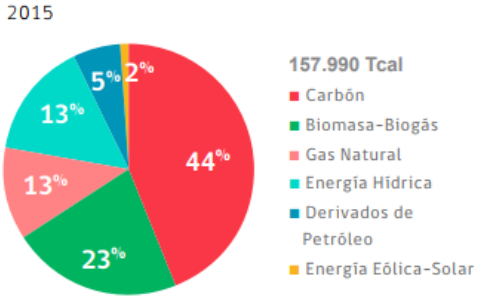


Ilustración 4 Matriz de insumo de generación eléctrica [3]

El carbón ha sido durante años el combustible más utilizado para la generación de vapor debido a sus bajos precios a nivel internacional y su amplia distribución geográfica haciendo de este hidrocarburo de fácil obtención, sumando a esto los costos predecibles y estables.

Para producir energía mediante el carbón es necesario pulverizarlo antes de iniciar el proceso de alimentación en la caldera, el carbón pulverizado es inyectado con aire primario en un quemador para luego ser quemado en la caldera y así realizar el ciclo termodinámico agua-vapor. Al pulverizar el carbón y mezclarlo con aire primario se convierte en un material abrasivo dificultando y provocando daños en las tuberías de transporte, componentes de los quemadores y pulverizadores. La abrasión ocasiona

desgaste y erosión a la superficie de contacto de la tubería, llegando incluso a romperlas. Como consecuencia se puede alejar el sistema de su funcionamiento óptimo. En primer lugar, el caudal de fuga a través de estas fallas representar una pérdida de combustible y ambiental, pues no sólo se está dejando de quemar parte de su producción, sino que también se está botando al ambiente polvo de carbón. Por otro lado, la presión interna de la tubería podría interactuar con la falla haciéndola crecer, debilitando así la resistencia estructural del tubo. Por último, una rotura en el tubo implica un gasto adicional para su reparación o posible cambio de material.

Con el fin de suplir esta falencia causada para la abrasión, la presente investigación creo un modelo en el programa CFD, Fluent para la simulación del degaste en la tubería. Además de analizar las variables operacionales que afectan al desgaste.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de este trabajo consiste en: Desarrollar un modelo de mejora continua y de proyección del desgaste por abrasión en ductos de transporte de carbón desde el pulverizador hacia quemadores de la unidad 1 y 2 de central termoeléctrica, específicamente en la planta Aes Gener Central Ventanas.

2.2. OBJETIVOS ESPECPIFICOS

Para cumplir con el objetivo general es necesario cumplir con los siguientes objetivos específicos:

- Analizar el Contexto Operacional.
- Identificar condiciones operacionales que afecten la durabilidad de los ductos de carbón y realizar propuesta de mejora.
- Analizar variables y factores identificados que afectan al desgaste.
- Evaluar variables y sus efectos en el desgaste de los ductos.
- Jerarquizar criticidad a objeto de identificar tramos más exigidos y que presenten una mayor tasa de desgaste.
- Desarrollar alternativas de solución para alargar la durabilidad de los ductos de transporte de carbón
- Proponer solución viable de mejora para la extensión de la vida útil de los ductos de transporte de carbón.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Generación de energía en termoeléctrica

La generación de energía de una termoeléctrica convencional a carbón tiene como principio transformar el calor en trabajo mediante un ciclo termodinámico a vapor, en donde la energía química adherida por el combustible fósil se transforma en energía eléctrica. El esquema básico de funcionamiento de las centrales termodinámicas convencionales difiere sólo en el tratamiento previo que recibe el combustible a utilizar para la inyección en la caldera y el tipo de quemador usado, que varía según el tipo de combustible empleado.

Para el caso de una termoeléctrica funcionando a base a carbón, el combustible primero se tiene que pulverizar, es decir reducir a un polvo fino, para poder ser bombeada dentro de la caldera por medio de un chorro de aire. Al combustionar el carbón en la cámara de combustión de la caldera, la energía liberada hace que el agua se evapore en el interior de los tubos de la caldera mediante el contacto con los gases calientes en la superficie externa de los tubos y produzca calor.

El vapor de agua se bombea a alta presión a través de la caldera, para así poder obtener un mayor rendimiento debido a que los esfuerzos desarrollados en los tubos por las altas presiones son de tracción

Luego de pasar por la caldera el vapor entra a gran presión a la turbina a través de un sistema de tuberías. La turbina consta de tres partes: Turbina de alta presión, turbina de presión intermedia y turbina de baja presión. Se ocupa este tipo de turbina para el máximo aprovechamiento de la fuerza del vapor. El vapor de agua a presión hace girar la turbina generada así energía mecánica.

El vapor luego de su paso por la turbina entra al condensador. El condensador a baja presión y temperatura hace que el vapor se convierta nuevamente en agua, el cual es reutilizado para empezar nuevamente el ciclo entrando en la caldera.

Para convertir la energía mecánica producida en la turbina en energía eléctrica es necesario el acoplamiento de un generador a la turbina.

3.1.1. Ciclo térmico

El ciclo de vapor ideal que sirve de base para el funcionamiento de las centrales termoeléctricas es el ciclo de Rankine. El ciclo de Rankine es un ciclo termodinámico cuyo objetivo es transformar el calor en trabajo, alternando entre un fluido de trabajo condensado y evaporado.

Este ciclo ideal simple está compuesto de 4 procesos internamente reversibles [4]:

- 1-2: Compresión a entropía constante en una bomba: El fluido de trabajo se encuentra en fase líquida como líquido saturado. Se aumenta la presión del fluido de trabajo hasta la presión de la caldera
- 2-3: Adición de calor isobárica en una caldera: Entra líquido comprimido a la caldera y en el primer proceso se calienta hasta su temperatura de saturación para luego pasar a un cambio de fase líquido-vapor y finalmente sale como vapor sobrecalentado en el estado 3. La caldera funciona como un intercambiador de calor en donde el calor originado por los gases de combustión se transfiere al agua a una presión constante para poder salir como vapor sobrecalentado de la caldera.
- 3-4: Expansión isotrópica en una turbina: El vapor que sale de la caldera entra a la turbina como vapor sobrecalentado para ser expandido y produce trabajo para poder hacer girar el eje de la turbina. La presión y temperatura en este proceso disminuyen para poder entrar al condensador
- 4-1: Rechazo de calor a presión constante en un condensador: vapor de condensa a presión constante y sale como líquido saturado para entrar a la bomba y continuar con otro ciclo termodinámico

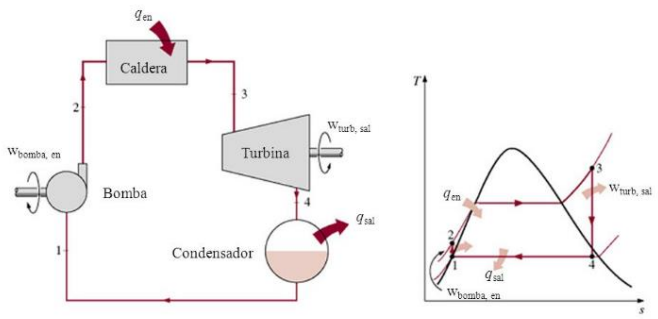


Ilustración 5 ciclo Rankine ideal simple (Cengel, 2009) [4]

3.1.2. Mejoras en el ciclo Rankine

Existen mejor en el ciclo Rankine que permiten aumentar su eficiencia lo que puede significar grandes ahorros es los requerimientos de combustibles. Para aumentar la eficiencia en un ciclo de potencia es necesario aumentar la temperatura media en la que es transferida al fluido de trabajo en la caldera, otra opción es disminuir la temperatura promedio en que es rechazado el calor en el condensador. La temperatura debe ser lo más baja posible la salida del condensador y la más alta posible en la entrada a la turbina. Algunas opciones para lograr el aumento de eficiencia son las siguientes [4]:

- Sobrecalentamiento de vapor en la entrada de la turbina
- Recalentamiento entre etapas de turbina
- Regeneración en agua de alimentación a caldera

3.1.2.1. Sobrecalentamiento

El objetivo del sobrecalentamiento es incrementar la temperatura promedio que el calor es transferido hacia el vapor sin aumentar la presión de la caldera.

El diagrama T-S en la figura 5 ilustra el aumento del trabajo neto, al área bajo la curva 3-3’ representa el aumento de la entrada de calor, ambos productos del sobrecalentamiento de vapor a una temperatura más alta.

El sobrecalentamiento, además de aumentar la eficiencia, disminuye el contenido de humedad a la salida de la turbina, la figura 5 se ve representado en el estado 4' que tiene mayor calidad que el estado 4

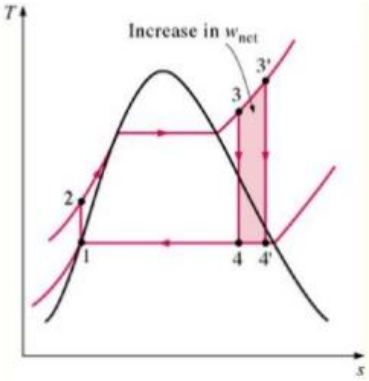


Ilustración 6 Diagrama T-S con sobrecalentamiento [Cengel.2009] [4]

La limitación de ésta opción es el tema metalúrgico, se puede elevar la temperatura hasta que el material a la entrada de la turbina la permita.

3.1.2.2. Recalentamiento

El recalentamiento consiste en expandir el vapor en la turbina en dos etapas y recalentarlas entre ellas. El sobre calentador llamado recalentador aumenta la temperatura y no la presión antes de ser conducido a la turbina de presión media.

El proceso de expansión, a diferencia del ciclo Rankine ideal simple, ocurre en dos etapas: primero, en la turbina de alta presión el vapor se expande isotrópicamente y regresa al recalentador de la caldera donde se recaliente a presión constante. En la segunda etapa el vapor se expande nuevamente isotrópicamente en la turbina de baja presión hasta la presión de entrada del condensador

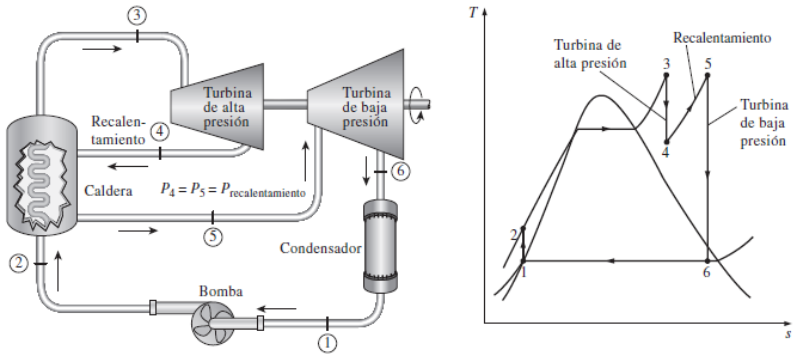


Ilustración 7 Ciclo Rankine ideal con recalentamiento [Cengel 2009] [4]

3.1.2.3. Regeneración

La regeneración busca aumentar la temperatura del líquido que sale de la bomba de agua de alimentación para entrar a la caldera. Esto se puede lograr haciendo una extracción del vapor de la turbina en diversos puntos para calentar el agua de alimentación mediante el regenerador o también llamado calentadores de agua.

La regeneración, además de aumentar la eficiencia, permite desairear el agua de alimentación para evitar que se produzca corrosión en la caldera.

3.2. Combustible: carbón

En el proceso de combustión el combustible es oxidado bajo ciertas condiciones termodinámicas, liberando energía.

Los combustibles sólidos son una fuente primaria de energía usados para la generación de electricidad y procesos industriales. Existe una amplia variedad de combustibles, tales como: carbones, distintos tipos de coques y petcoke, petróleo y derivados del petróleo, madera, biomasa, entre otros. Dentro de éstos combustibles sólido el carbón en uno de los más importantes.

El poder calorífico de un combustible está asociado al contenido de carbono e hidrógeno. Los demás componentes que posean los tipos de combustibles solo contribuyen a reducir la potencia calorífica y a complicar los procesos de combustión.

Los principales combustibles usados en las centrales termoeléctricas son:

- Gas natural
- Derivados del petróleo
- Carbón

El carbón es uno de los combustibles fósiles más complejos y abundantes en el mundo encontrándose presente en todos los continentes. Es un material comparativamente estable y no presente problemas de fugas y derrames asociados a otras combustibles fósiles tales como el petróleo y gas. La mayor desventaja del carbón es la contaminación que genera al ambiente productos de las emanaciones en la combustión.

Son rocas sedimentarias heterogéneas originadas a partir de restos vegetales, sometidos a altas presiones y temperaturas y movimientos de corteza terrestre. En los yacimientos de carbón se encuentran restos minerales ajenos que contribuyen a aumenta la variedad y calidad de los carbones. Inicialmente la turba, precursora del carbón, fue convertida en lignito o carbón pardo, que son los tipos de carbón con "madurez" orgánica baja. Luego de millones de años, la continuidad de los efectos de presión y temperatura produjeron cambios adicionales en el lignito, incrementando su madurez y transformándolo en un tipo de carbón conocido como sub bituminoso. A medida que este proceso fue ocurriendo, una serie de cambios químicos y físicos provocan que el carbón se vuelva más madura y duro hasta que se vuelven carbones bituminosos o carbones duros. Bajo las condiciones adecuadas, el incremento progresivo en la madurez orgánica continua, para finalmente formar la antracita.

Como ya se mencionó, existe una serie de variedad de tipo de carbones que, por su variación en la edad, era geológica y poder calorífico, se pueden ordenar en orden ascendente: turba, lignito, carbones sub-bituminosos, carbones bituminosos y antracita.

La antracita es la forma más avanzada en el proceso de carbonización, es el menos abundante, muy poco contaminante y de alto poder calorífico, 34 [MJ/Kg]. Es un carbón relativamente compacto de alta dureza, con un contenido de carbón de alrededor

del 75% al 95%. Tiene un bajo contenido de material volátil por lo que su combustión alcanza temperaturas de ignición mayores y tiempos mayores de quemado que los carbones bituminosos. Tiene un bajo contenido de cenizas que puede llegar al 1%, sin embargo, debido a la dificultad para realizar una rápida combustión no es el tipo de carbón más adecuado para la combustión industrial.

En cuanto a los carbones bituminosos, son los más abundantes y usados. Tienen un alto contenido de material volátil por lo que resulta ser de mejor y más rápida combustión que la antracita. El contenido de ceniza fluctúa entre un 5% y 10%.

Para el caso de los carbones sub-bituminosos son generalmente no aglomerantes, es decir, los trozos de carbón durante la combustión no forman masas cohesionadas. El contenido de oxígeno se encuentra entre un 10% y 20% para base seca y libre de cenizas. Tiene una elevada humedad intrínseca, tienden a desintegrarse al estar un tiempo expuesto al aire provocando que se genere polvo.

Los lignitos son carbones relativamente jóvenes, tiene una alta humedad del orden del 50% o más y al igual que los sub-bituminosos tienden a desintegrarse bajo una prolongada exposición al aire. Tiene una capacidad calorífica inferior a la del carbón común, 17.2 MJ/Kg.

Los carbones antracíticos y bituminosos son considerados de alto rango, en cambio los sub-bituminosos y lignitos como carbones de bajo rango.

Tabla 1 Principales características del carbón. Fuente: Elaboración propia

Tipo de carbón /características	**Contenido de carbono %**	**Poder calorífico [KJ/kg]**
Turba	52-60	8400
Lignito	55-65	17200
Bituminoso	60-80	30000-36000
Antracita	75-95	34000

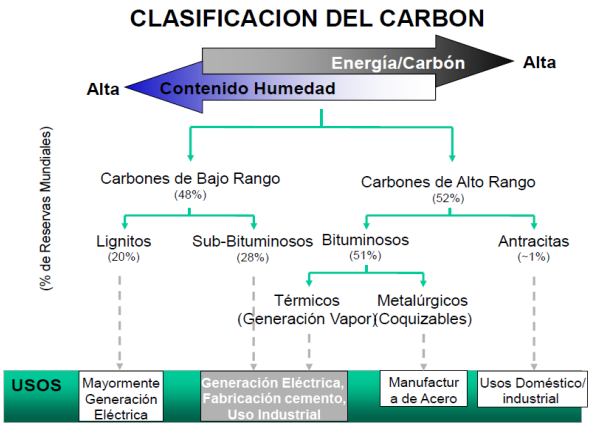


Ilustración 8 Clasificación del carbón. Fuente: Aes Gener, 2017

3.2.1. Propiedades

- Energía específica: También conocido como poder calorífico o energía interna. Es la cantidad de calor que se libera en combustión completa por unidad de material quemado. Es una propiedad importante que influye en los requisitos del equipo para manejo y pulverización, también para su almacenamiento
- Calor específico: El calor específico es la cantidad de energía requerida para elevar la temperatura de 1 gramo de carbón en 1°C. El calor específico depende del contenido de agua y cenizas, teniendo una relación lineal entre ellas.
- Humedad: La humedad se refiere al contenido de humedad inherente y libre de un carbón. La humedad inherente es la humedad combinada y la retenida en los poros de carbón, la cual es una función del rango o categoría del carbón. Por su parte, la humedad libre o externa, es la que se encuentra en la superficie del carbón y en los intersticios entre las partículas. Ésta última humedad se puede eliminar en los procesos de desaguado y secado del carbón.
- Tamaño: El tamaño del carbón es importante con respecto a la abrasión y obstrucciones en el sistema de manejo de carbón. También se tiene que tener en cuenta el tamaño para el caso de que se produzca combustión instantánea, para los problemas de polvo y rendimiento del pulverizador [5]. Los carbones finos son considerados de un tamaño de 3.35 mm o menos, cuando están mojados, y son la causa principal de obstrucciones. La granulometría del carbón

varía según el tipo de carbón, método de extracción, limpieza del carbón, equipo de trituración y el grado de manejo y manipulación.

- Estabilidad de tamaño: Capacidad del carbón para resistir roturas durante el manejo y transporte.
- Contenido de volátiles: La finura requerida en la molienda aumenta conforme el contenido de volátiles. Los carbones con bajo contenido de volátiles se inflaman fácilmente, necesitan menos tiempo para la combustión. En cambio, cuando poseen un alto contenido de volátiles no es necesario que sean molidos tan finamente.
- Triturabilidad: Es el factor que afecta la capacidad del pulverizador y los costos de trituración o molienda.
- Abrasividad: La Abrasividad del carbón afecta en forma directa el desgaste de materiales. Se debe tener en cuenta la utilización de materiales resistentes a la abrasión. El contenido de ion azufre pirítico en los carbones, es un indicador de la potencial abrasividad del carbón
- Densidad: La densidad del carbón varía según el tamaño, contenido de humedad y capacidad de asentamiento del carbón cuando se encuentra amontonado.
- Combustibilidad: El proceso básico de combustión incluye formación de CO_2, la formación y combustión subsecuente de CO_2 y la combustión de los volátiles. La combustión de carbón con elevada eficiencia proporciona bajas emisiones.

3.2.2. Carbón pulverizado.

Según Wood W.D. (2014) [6] La combustión del carbón en su forma natural es bastante ineficiente, debido a dos factores importantes: humedad y tamaño del mineral.

Para que el carbón pueda ser ocupado como combustible a gran escala es necesario primero ser molido hasta ser convertido en un fino polvo. La pulverización del carbón, permite una combustión más eficiente, ya que se consigue que el contenido de humedad baje y así tener un efecto positivo en la tasa de transferencia de calor; y el aumento de la superficie específica que permite una mayor exposición del carbón en la combustión

por unidad de volumen [6]. El carbón pulverizado suele tener un tamaño entre 19 y 75 µm. Éste se mezcla con aire para ser inyectado en una caldera a través de quemadores especiales que producen un flujo turbulento. El flujo turbulento en necesario para asegurar una rápida combustión y de forma eficiente, si el aire y el combustible fueran inyectados separados como corrientes paralelas, la tasa de difusión seria baja y la combustión se reduciría.

La etapa de pre-quemado de carbón pulverizado produce un cambio en la estructura del carbón, en forma y tamaño. Luego viene la etapa de la combustión de la materia volátil y luego la del residuo carbonoso.

El índice de Molibilidad Hardgrove (HGI) mide empíricamente las características del carbón para el proceso de pulverización, usando muestras de carbón estandarizados se les asigna un índice de Molibilidad HGI= 40, 60, 80,100. La facilidad de pulverización de los carbones está indicada por este índice. Cuanto menor sea el vapor HGI es mucho más difícil de moler el carbón. Por ejemplo, un carbón de 40 HGI es mucho más fácil de moler que un carbón de 59 HGI. Una reducción de 60 HGI a 40 HGI daría como resultado una reducción del 20% en la capacidad del pulverizador. El índice HGI es un buen parámetro para selección de molinos, cambio o elección del tipo de carbón.

3.2.2.1. Proceso de molienda

El molino tiene como función la trituración y pulverizador del carbón. El polvo de carbón tiene como objetivo mejorar la eficiencia de quemado de carbón, mejorar la salida de potencia y reducir las emisiones de gases peligrosos, entre otros. La capacidad del pulverizador depende de la dureza del carbón. Un carbón duro requerirá más unidades de pulverización individual que un carbón blando para producir un mismo porcentaje de combustible pulverizado.

Según Voloshyna Y (2015) [7] la dureza y triturabilidad del carbón, el contenido de humedad y el poder calorífico son los principales factores que se consideran para el diseño de la planta de carbón pulverizado.

En el proceso de molienda del carbón, el material es pulverizado hasta que una cantidad mayor o igual al 75% del material alimentado al molino tenga un tamaño menor a 75 µm, según norma ASTM D-408 [8], luego este polvo es llevado fuera del molino a través de un sistema de transporte neumático, en una mezcla aire-polvo de carbón. El aire es suministrado, además, para evitar la humedad del carbón ya que esto puede causar daños en la operación de los pulverizadores.

El caudal de carbón depende de la potencia requerida y de la regulación proveniente de los alimentadores de carbón. El caudal de aire suministrado debe ser proporcional al caudal de carbón para tener una adecuada relación aire/combustible y así obtener buenas condiciones de secado, finura de molienda, arrastre en tuberías hacia los quemadores y estabilidad de la llama en la combustión.

3.3. Transporte neumático

El sistema de transporte neumático es un sistema cerrado, es utilizado para transportar sólidos a granel a través de una tubería impulsado por un flujo de gas. Es capaz de transportar cualquier sólido a granel que sea relativamente fino y puede llegar a transporta rocas de hasta 50 [mm]. Los materiales más óptimos para poder ser transportados son los materiales secos, no abrasivos, no fibrosos, y no cohesivos. En cuanto a los materiales duros, abrasivos pueden desgastar y dañar las cañerías.

En la mayoría de los sistemas se utiliza aire para transportar el material, pero, por ejemplo, para el caso del carbón pulverizado, al ser un elemento abrasivo se recomienda usar dióxido de carbono, nitrógeno o aire con menor contenido de oxígeno para evitar que combustione.

Una de las grandes ventajas que posee este tipo de transporte es que es un medio cerrado, no contamina, el material no se ve expuesto al medio ambiente por lo que puede ser apto para transportar materiales peligrosos, explosivos y/o tóxicos.

3.3.1. Partículas transportadas

Es importante tener en consideración que el diseño de transporte neumático es distinto para cada tipo de material. Por ejemplo, el transporte de partículas pequeñas, no abrasivas son más fáciles de llevar que unas abrasivas y grandes. Cada material es necesario analizarlo en cuanto al tamaño, forma, densidad, velocidad de transporte, consumo de energía, entre otros, para hacer un buen diseño y operación de transporte neumático.

3.3.2. Tamaño de la partícula

Una de las características importantes para tener en cuenta a la hora de diseñar es el tamaño de la partícula y su distribución granulométrica, esto es necesario saber para calcular la velocidad mínima de transporte y el consumo específico de energía. También es necesario conocer el tamaño de la partícula para el diseño del diámetro de la cañería, en la que se recomienda como mínimo que sea entre 5 a 6 veces el tamaño de la partícula, siendo lo óptimo 10 veces el tamaño. [9]

3.3.3. Flujo de gas para el transporte neumático

El gas más utilizado para el transporte dentro de las cañerías es el aire, algunos sistemas especiales ocupan otros gases como el nitrógeno, dióxido de carbono, gases inertes, aire reducido en oxígeno, etc.

El aire suministrado puede ser tomado del ambiente o por medio de un soplador o compresor para alimentar el sistema.

Las propiedades del aire que hay que tener en cuenta para el transporte son la densidad y viscosidad, ya que ambos afectan la velocidad del aire de transporte, el número de Reynolds, caída de presión, energía cinética, entre otros. [9]

En cuanto a la densidad (ρ) del aire, ésta se determina mediante la ley de gases ideales [10] en valores absolutos tanto de presiones (P), como temperatura (T):

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (3.3.3)$$

Con R correspondiente a la constante del aire. R= 287 [J/kgK]

Por otro lado, la viscosidad dinámica, μ_a, del aire es casi independiente de la presión, no así con su dependencia con la temperatura como se explica en Anexo A

3.3.3.1. Flujos desarrollados dentro de tubería

En los flujos desarrollados al interior de una cañería, ducto, debe considerarse la capa límite y el perfil de velocidades desarrollado.

La capa límites es una capa próxima al contorno del interior de la tubería, el estudio del movimiento de un fluido de pequeña viscosidad se puede considerar un fluido perfecto, salvo en esta capa límite de espesor δ en donde se concentran los fenómenos de fricción. [11] En el exterior de la capa predominan las fuerzas de inercia sobre la viscosidad, mientras que en el interior el gradiente de velocidad es muy grande por lo que la tensión superficial también es muy grande. El espesor de esta capa límite depende del número de Reynolds y del diámetro de la cañería. [11]

Teóricamente en la pared de la cañería la velocidad del aire es 0 y el fluido se adhiere a la pared sin deslizar.

La capa límite a la entrada de la tubería normalmente es muy delgada, pudiendo considerarse el comportamiento del flujo como no viscoso, excepto en la zona que se encuentra cerca de la frontera, a medida que avanza el flujo existe un aumento en el espesor de la capa límite pudiendo ocupar toda su sección transversal, cuando ocurre esto último en la entrada el flujo se considera el flujo completamente viscoso. [11]

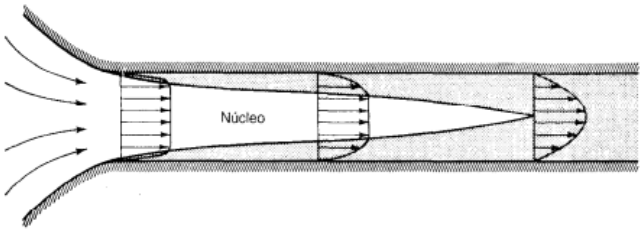


Ilustración 9 crecimiento capa límite al interior de una tubería. Irving h. Shames. 4ta edición. Mecánica de Fluidos [10]

3.3.3.2. Flujos laminares y turbulentos.

Se considera que un flujo es laminar cuando las líneas del flujo se deslizan ordenadas unos sobre otras paralelas entre sí, a una baja velocidad y con un perfil de velocidad desarrollado por al aire en forma parabólica [11]. En la mayoría de los sistemas neumáticos este flujo no se presenta ya que las velocidades son relativamente altas, en donde las partículas se mueven sin seguir un orden establecido, el perfil de velocidad que desarrolla es prácticamente plano. El flujo turbulento es ideal para el transporte neumático ya que al ser un flujo desordenado crea remolinos lo que ayuda a mantener las partículas en suspensión con un bajo arrastre.

Reynolds investigó el comportamiento de los flujos turbulentos y laminares y la transición entre ellos en una tubería. El criterio empleado se expresa bajo el número de Reynolds, el cual es un número adimensional que proporciona una indicación de perdida de energía causada por los efectos viscosos y se expresa mediante la siguiente fórmula:

$$R_e = \frac{\rho * U * D}{\mu_a} \quad (3.3.3.2.1)$$

En donde de D se refiere al diámetro interior de la tubería, U representa la velocidad media del aire, ρ es la densidad y μ_a la viscosidad dinámica

Para la velocidad media del aire se calcula dividiendo el caudal del aire Q, por el área de la sección de la cañería D:

$$U = \frac{Q}{\frac{\pi}{4} * D^2} \quad (3.3.3.2.2)$$

Cuando el número de Reynolds es inferior a 2300 corresponde a un flujo laminar, una vez alcanzado 2300 existe una transición y se conoce como un número de Reynolds crítico, y para el caso que el flujo que exceda un Reynolds de 2300 se conoce como régimen turbulento y se considera un flujo inestable.

3.3.4. Pérdidas de energía

- Ley conservación de la energía

La ecuación de la energía, determina la energía por unidad de peso en un determinado punto sobre el eje de una conducción. Para un fluido incompresible, la energía total Et, en cualquier punto se cuantifica como [11]:

$$E_t = z + \frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} \quad (3.3.4.1)$$

En donde,

- Z= cota geométrica con respecto a un nivel de referencia o energía potencial por unidad de peso de fluido
- $P/\rho g$ = carga de presión del fluido. Presión relativa o manométrica
- $v^2/2g$= carga de velocidad del fluido, o energía cinética por unidad de peso de fluido.

Ésta ecuación también es conocida como ecuación de Bernoulli, permite medir la energía de un fluido en una sección determinada de una conducción, pero también permite realizar balances de energía entre dos puntos distintos de la misma tubería.

En un caso ideal, la energía total de un fluido debería permanecer constante a lo largo de su recorrido, sufriendo solo transformaciones. Sin embargo, debido a factores como

el rozamiento del fluido con las paredes rugosas al interior de la conducción, reducciones o ampliaciones de la sección, presencia se válvulas, codos, curvas, entre otros elementos, parte de esa energía se transforma en calor que no se aprovecha. A esto se le llaman pérdidas de energía, y son necesarias incluirlas en el balance [11].

Entre una sección a y b de una conducción:

$$Z_a + \frac{P_a}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = Z_b + \frac{P_b}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + \Delta h_{ab} \quad (3.3.4.2)$$

Donde h_{ab} es el término que toma en cuenta las pérdidas de energía entre ambas secciones.

3.3.4.1. Pérdidas en tuberías

La caída de presión se debe a la fricción que causa la altura de elevación y la pérdida de altura, el aire al pasar dentro de la cañería requiere un suministro constante de energía para vencer el roce que ejercen las paredes.

La pérdida de altura depende del perfil de velocidad, el tipo de fluido y en algunos casos de la rugosidad de la superficie de la tubería. La pérdida de altura es independiente de la orientación de la tubería.

Para un flujo estable, completamente desarrollado y turbulento puede regir la ley de Darcy [12]:

$$\Delta h = f * \frac{L}{D} * \frac{\rho U^2}{2} \quad (3.3.4.1.1)$$

En donde f se conoce como el factor de fricción y se determina en función del número de Reynolds para diferentes condiciones de rugosidad encontrada en el Anexo B. Para el caso de un Reynolds laminar el factor de fricción es independiente a la rugosidad:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (3.3.4.1.2)$$

Para zonas hidráulicamente lisas del flujo turbulento, la ecuación empírica válida para $Re \leq 100000$, propuesta por Blasius es:

$$f = \frac{0.3164}{Re^{1/4}} \quad (3.3.4.1.3)$$

El diagrama de Moody, encontrado en el Anexo B, es la representación gráfica para determinar el valor del factor de fricción f para un flujo turbulento. Para esto es necesario entrar al gráfico conociendo los valores del número de Reynolds y la rugosidad relativa. Por lo tanto, es requerido tener datos básicos como lo son: diámetro interior, material de la cañería, velocidad y temperatura del flujo de aire.

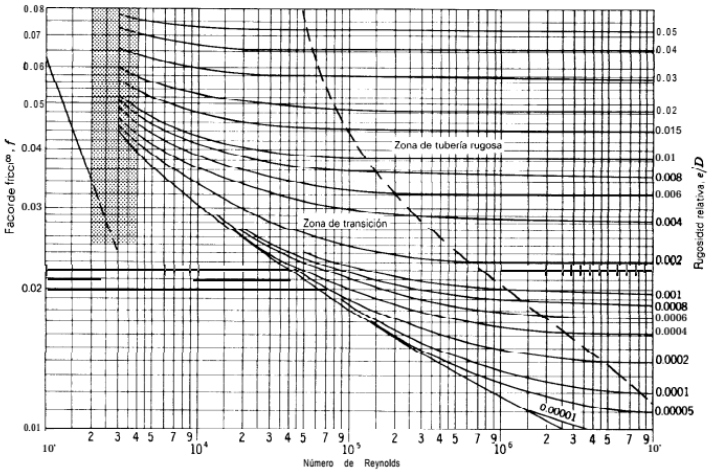


Ilustración 10 Diagrama de Moody, Irving H. Shames, 3era edición. Mecánica de Fluidos [10]

La ecuación más conocida para relacionar f en función de $^{e}/_{D}$ (rugosidad relativa) y Re es la ecuación de Colebrook, la cual expresa el diagrama de Moody en forma matemática:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.14 - 2.0log\left[\frac{e}{D} + \frac{9.35}{Re\sqrt{f}}\right] \quad (3.3.4.1.4)$$

Se debe tener en cuenta que log es en base 10.

Para el caso de una zona completamente rugosa, f no depende del número de Reynolds. La ecuación para obtener f de manera explícita es:

$$f = \frac{1}{\left[1.14 - 2.0\log\left(\frac{e}{D}\right)\right]^2} \quad (3.3.4.1.5)$$

3.3.4.2. Pérdidas menores en tuberías

Cuando la tubería tiene válvulas, codos, curvatura se tiene que considerar las pérdidas de altura a través de estos accesorios, además de las pérdidas por fricción en la cañería. La pérdida de carga se puede estimar según la siguiente fórmula:

$$\Delta h = k\frac{\rho U^2}{2} \quad (3.3.4.2)$$

Esta ecuación no hace distinción entre flujo turbulento y laminar.

Donde k representa el coeficiente de fricción específico del elemento el cual se puede calcular según el siguiente gráfico, y explicado en el Anexo C.

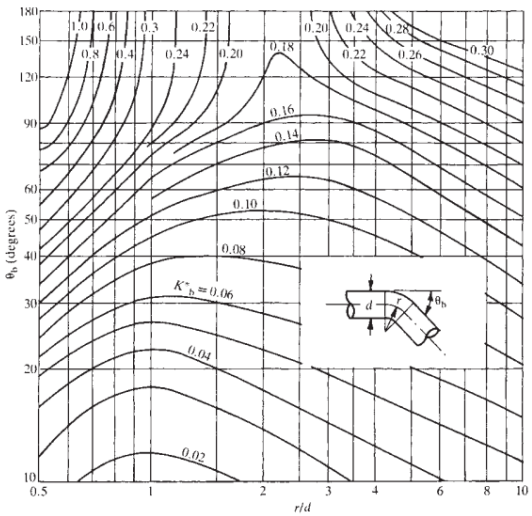


Ilustración 11 coeficiente de pérdida para curva de pared lisa Robert H. Perry, 7th edition. Perry´s Chemical Engineers´handbook [12]

Cuando la cantidad de accesorio en tuberías es de gran número es importante considerar éstas pérdidas para realizar un correcto diseño y operación del sistema.

3.3.4.3. Caídas de presión

La caída de presión es la energía requerida para transportar de un punto a otro un material. Para el transporte neumático las variables que componen esta caída de presión son:

$$\Delta P_{total} = \Delta P_{GAS} + \Delta P_{ACELERACIÓN+}\Delta P_{TUBERÍA} + \Delta P_{CURVAS} \quad (3.3.4.3)$$

Donde las diferentes caídas de presión representanta lo siguiente:

- El gas representa el consumo de energía del gas fluyendo por la cañería.
- La aceleración, es la energía usada para acelerar las partículas desde su velocidad inicial hasta la velocidad de transporte
- La tubería, representa la pérdida de carga en la tubería debido al trasporte de gas y sólido
- Curvas, es la energía usada para cambiar la dirección del flujo y cambios de velocidad producidos en la curvatura de la cañería.

3.3.5. Clasificación de Sistemas de transporte neumático

Existen diversos tipos de sistemas de transporte neumático en el mercado, por lo cual es importante saber elegir el más apropiado para el material a transportar. [13]

3.3.5.1. Clasificación según la concentración de sólido

Según este tipo de clasificación, en los sistemas de transporte neumático la concentración de sólidos puede estar en fase diluida o en fase densa.

- Fase densa

Se dice que el sólido se encuentra en fase densa cuando en la relación gas/sólido la velocidad del gas es menor que la de deposición y, al tener un menor flujo de gas las velocidades de transporte son más bajas y hay un menor desgaste en las tuberías y menos daños en el sólido transportado. Como desventaja, es un sistema que opera en zonas menos estables, por lo cual, es difícil obtener un flujo homogéneo y generan mayores caídas de presión

- Fase diluida

A diferencia de los sistemas de fase densa, la cantidad de gas ahora es mayor respecto a las partículas sólidas transportadas. Las ventajas que posee son que operan en un régimen estable de flujo, que es donde mejor actúan los modelos. Otra ventaja es que generan menor caída de presión que los sistemas de fase densa. La mayor desventaja en este tipo de sistemas es la alta velocidad de transporte, ya que las partículas al chocar con codos y obstáculos se genera un desgaste en estos elementos.

3.3.6. Clasificación según presión

En los sistemas neumáticos existen 3 tipos de presión de transporte: positiva, negativa y presión combinada [13]

3.3.6.1. Sistemas de transporte neumático de presión positiva

Este tipo de sistema es el usado en la industria porque tiene una mayor capacidad y distancia de transporte, esto es posible por el mayor diferencial de presión que se puede generar por sobre la presión atmosférica. Como configuración, el equipo que suministra aire y presión se encuentra en el inicio del sistema, antes del punto de alimentación, causando así que se puedan empujar las partículas sólidas al final de la tubería

3.3.6.2. Sistemas de transporte neumático de presión negativa

Para este tipo de sistemas la capacidad es menor y alcanza menor distancia de transporte, en comparación a los sistemas de presión positiva, esto debido a que la presión del aire dentro de la cañería es menor a la presión atmosférica. A diferencia de la configuración de sistemas de presión posita, el equipo que suministra presión y flujo de aire se encuentra al final del sistema de cañería, generando así una succión por vacío y el flujo necesario para que entre aire al sistema y no salga el gas con el material transportado hacia el exterior.

3.3.6.3. Sistema de transporte neumático combinado

Al ser un sistema combinado permite aprovechar las ventajas de ambos sistemas descritos anteriormente, permite transportar materiales desde varios puntos de alimentación y a varios puntos de descarga

3.3.7. Componentes básicos de un sistema de transporte neumático

Para todos los sistemas de transporte neumático existentes hay una configuración común de componentes y accesorios necesarios para su correcto funcionamiento, los cuales se detallan a continuación:

- Soplador: Es uno de los principales componentes para el transporte neumático, es el encargado de proveer el flujo y presión de aire necesario para el transporte del material de un punto a otro. Según el tipo de sistema y necesidad de presión, se utiliza un ventilador, soplador o compresor
- Alimentador: Es el elemento encargado de introducir las partículas sólidas a las cañerías de transporte.
- Cañería de transporte: Vía por donde se trasladan la mezcla partículas sólidas con gas desde el punto de alimentación hasta el punto de descarga. Su orientación puede ser horizontal o vertical que para efectos de cálculos son distintos. Pueden poseer codos y curvas para cambia la dirección del flujo, flanches de unión, válvulas.

- Codos y curvas: Necesario e inevitables para el cambio de orientación en la tubería, y así poder cambiar la dirección y esquivar equipos y/o estructuras que puedan cruzarse por el camino. Su principal característica al momento de elegirlos es el radio de curvatura en el que influye directamente la caída de presión. Los codos y curvas pueden causar problemas de atrición y desgaste.

3.4. Desgaste de material

El desgaste es el daño a una superficie. Esto se produce, generalmente, debido al movimiento relativo entre una superficie y un cuerpo de contacto. Y tal como lo dice su nombre, provoca un desgaste en el material y puede llegar a generar pérdidas. [14]

El desgaste es la principal causa de desperdicio de material y de la pérdida de rendimiento mecánico de muchas maquinarias que se utilizan en ingeniería y en la vida en general, y muchos son los mecanismos de desgaste que existen.

Los principales mecanismos de desgaste son 4, estos mecanismos o combinaciones de ellos están involucrados en todos los procesos de degaste:

- Desgaste por abrasión: Remoción de material debido a ralladuras. Ocurre cuando sobre un objeto sólido actúan partículas de material de igual o mayor dureza que el de la superficie sobre el cual están actuando.
- Adhesión: Mecanismo de desgaste que está asociado con la creación de una unión entre las superficies y la transferencia de material.
- Fatiga superficial: fatiga y formación de grietas en regiones superficiales debido a ciclos de esfuerzo que producen separación de partículas de material.
- Reacción triboquímica: Formación de productos de una reacción química como resultado de las interacciones químicas entre los elementos.

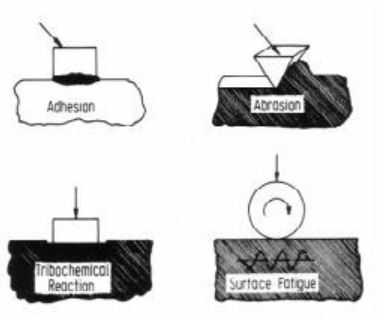


Ilustración 12 descripción esquemática de los principales mecanismos de desgaste

De éstos el más común es el desgaste debido a la abrasión

3.4.1. Mecanismos de abrasión

El desgaste abrasivo está definido por la ASTM G40-10b como el desgaste debido a partículas o protuberancias de alta dureza, las cuales son forzadas a desplazarse en contra de una superficie sólida (ASTM, 2013). [15]

Los principales mecanismos que generan abrasión son: abrasión a dos cuerpos y abrasión a tres cuerpos

En la *abrasión de dos cuerpos*, el desgaste es causado por protuberancias o partículas en una superficie que se deslizan sobre otra, siendo la segunda menos resistente que la primera. Este tipo de abrasión se puede dar en tuberías, en maquinarias de uso agrícola, en bombas manuales de aguas residuales, entre otras. Este tipo de comportamiento es el más común, y por tanto el más conocido y modelado.

La *abrasión de tres cuerpos*, en cambio, es la situación en la cual las partículas están parcialmente aprisionadas entre dos superficies sólidas. Y de esta forma, en algunos momentos están libres para rodar y deslizarse, y en otros transmiten los esfuerzos desgastando la superficie más débil. Esto es común en bombas verticales de aguas residuales y en situaciones de pulido de superficies

Es importante mencionar que la tasa de remoción de material de la abrasión de 3 cuerpos esta un orden de magnitud por debajo a la abrasión de dos cuerpos. Esto se debe a que, en la primera, las partículas abrasivas permanecen rodando y deslizándose libremente entre las superficies sólidas durante un 90% del tiempo. Teniendo en cuenta esta información, el tipo de abrasión más común, por lo general, es la de dos cuerpos [16]

3.4.2. Erosión

Erosión significa el desgaste de un material.

La pérdida de material debido a la erosión es dependiente de factores interrelacionados que incluyen las propiedades y la estructura de los materiales erosionados, las condicione del medio y las propiedades físicas y químicas de la partícula erosiva.

- Desgaste erosivo por partículas sólidas

El desgaste por partículas sólidas se puede presentar debido a los mecanismos de abrasión y erosión. En desgaste puede ser producido debido al impacto de las partículas sólidas sobre una superficie, donde las partículas pueden ser conducidas por un gas o un líquido. Este tipo de desgaste es el llamado erosión.

En el desgaste erosivo, fuerzas de distinto origen pueden actuar en la partícula que está en contacto con la pared. Y a su vez el flujo del fluido causa arrastre.

En la siguiente figura se muestra las fuerzas que actúan en la partícula

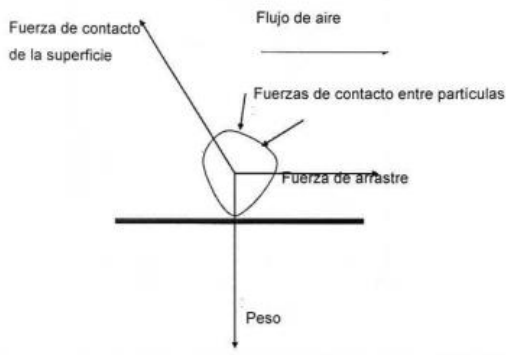


Ilustración 13: Fuerza contacto partícula- superficie. Fuente: Estudio de desgaste abrasivo en Tuberías [16]

3.5. Herramienta computacional Ansys CFD

El presente trabajo de título realizará las simulaciones de erosión de partículas de carbón transportadas mediante la técnica CDF, o más conocido como Dinámica de fluidos computacionales, a través del módulo Fluent

CDF es una herramienta de modelamiento numérico, que permite obtener el comportamiento del fenómeno de transporte de fluidos debido a la interacción de fuerzas o a su interacción con otros medios y con su entorno. El flujo y los fenómenos asociados a éste pueden describirse a través de ecuaciones diferenciales parciales que no pueden ser resueltas de manera analítica, implementado para su resolución las ecuaciones de Naviera-Stokes, acopladas a balances de masa y energía, agregando además el modelo de turbulencia en casos necesarios. [17]

CDF se basa en la resolución de ecuaciones de continuidad de momento y de energía, sobre volúmenes de control (malla) definidos en el sistema.

Las ecuaciones que rigen el comportamiento de un fluido en desplazamiento, se mencionan a continuación [17]:

- Ecuación de conservación de la masa

$$\frac{\delta\rho}{\delta t} + \frac{\delta(\rho_{ui})}{\delta x_i} = Sm \quad (3.5.1)$$

- Ecuación de conservación de momento

$$\frac{\delta(\rho_{ui})}{\delta t} + \frac{\delta(\rho uiuj)}{\delta xi} = -\frac{\delta P}{\delta xi} + \frac{\delta \tau ij}{\delta xj} + \rho gi + Fi \text{ (3.5.2)}$$

- Ecuación de la conservación de la energía

$$\frac{\delta e}{\delta t} + \frac{\delta}{\delta xj}(evj) = -Pe\frac{\delta vj}{\delta xj} \text{ (3.5.3)}$$

En donde,

Sm= masa añadida

u= velocidad en un eje, dependiendo de las condiciones que se esté trabajando

ρ = densidad del fluido

t= tiempo

x= coordenada espacial

Pe = presión estática

τij= tensor tensión

g = fuerza gravedad

F= fuerzas externas

e = energía

v= viscosidad cinemática

Los pasos genéricos que hay que seguir para poder resolver el problema son:

- Creación de la geometría del problema: Es la primera etapa, en donde se diseña la geometría por donde se traslada el fluido que se va a analizar.
- Creación de la malla para la geometría: Se discretiza el volumen diseñado en la etapa anterior, en pequeñas celdas llamadas volúmenes de control. Sobre cada cela el programa calculará en función de las ecuaciones de Navier-Stokes.
- Condiciones de borde: Se especifican las condiciones tanto, de entrada, como de salida de la geometría creada, ya sea velocidad, flujo másico, presión entre otros. También se define si por los volúmenes creados pasará un fluido o es un sólido

Los pasos definidos son los básicos para la creación del programa. Datos adicionales como si un fluido está en estado estacionario, turbulento, si es un fluido o varios fluidos los que son transportados por geometría, si al fluido se le inyecta un material sólido, si hay transferencia de calor entre el fluido y la materia. Estas y otras opciones están disponibles para el modelamiento correcto.

Las siguientes son las principales aplicaciones que se pueden realizar en FLUENT:

- ✓ Simulaciones 3D, 2D asimétrica, con turbulencia
- ✓ Mallado no estructurado
- ✓ Simulaciones en flujo estacionario o dinámico
- ✓ Cualquier régimen de velocidad
- ✓ Flujos laminares, turbulentos, no viscosos
- ✓ Flujo newtonianos y no newtonianos
- ✓ Variedad de modelos de turbulencia: K-epsilon, K-omega, RSM, DES, LES
- ✓ Mezclado y reacción de especies químicas
- ✓ Modelos multifase y de superficie libre
- ✓ Etc.

3.5.1. Erosión mediante CFD

El modelo de erosión utilizado por el programa CFD consta de tres principales partes: características del flujo a modelar, modelo de seguimiento de las partículas y un modelo de erosión.

A continuación, se detallan las opciones elegidas para modelar el problema:

3.5.1.1. Modelos de turbulencia

El módulo Fluent nos proporciona varios modelos de turbulencia, como lo son el K-epsilon, RNG k-epsilon, realizable k-epsilon, standard k-omega, SST k-omega, RSM, LES. Existe una diferencia de compensación entre la precisión y el costo

computacional para cada uno de estos modelos, como se muestra en la siguiente figura, obtenida del manual CFD, Fluent Ansys [17]

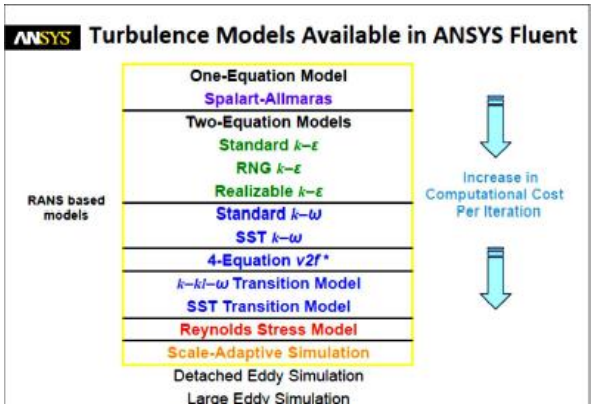


Ilustración 14 Descripción de los modelos de Fluent turbulencia. Ansys Fluent: Manual CFD, Fluent, Ansys [17]

El modelo k-épsilon con realizable k-épsilon han demostrado dar buenos resultados para diversas aplicaciones y ofrecen un buen equilibrio entre precisión y esfuerzo computaciones [17] Por lo tanto, esté modelo fue el empleado para modelar nuestro sistema de erosión.

3.5.1.1.1. Modelo Estándar K- épsilon

Es un modelo robusto que proporciona precisión razonable para una amplia gama de fluidos. Por lo tanto, se convierte en la primera elección para cualquier problema industrial. Es un modelo semi-empírico que se deriva a partir de ecuaciones matemáticamente exactas. Se supone que los efectos de la viscosidad molecular son insignificantes y, por lo tanto, solo son válidos para un flujo completamente turbulento.

La energía cinética de turbulencia k, y su velocidad de disipación ε, se obtienen de las siguientes ecuaciones de transporte:

$$\frac{\delta}{\delta t}(\rho k) + \frac{\delta}{\delta xi}(\rho k u_i) = \frac{\delta}{\delta x_j}\left(\left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} + \mu\right]\frac{\delta k}{\delta x_j}\right) - G_k + G_b - Y_M + S_K - \rho\varepsilon \quad (3.5.1.1.1.1)$$

$$\frac{\delta}{\delta t}(\rho\varepsilon) + \frac{\delta}{\delta xi}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\delta}{\delta x_j}\left(\left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} + \mu\right]\frac{\delta\epsilon}{\delta x_j}\right) - G_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k} + (G_k - c_{3\varepsilon}G_b) - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon$$

(3.5.1.1.1.2)

Donde G_k representa la generación de energía cinética de turbulencia debido a gradientes de velocidad media. G_b es la generación de energía cinética de turbulencia debido a la flotabilidad. Y_M representa la contribución de dilatación. Estos 3 números son constantes y representan los números de Prandt turbulentos. Por otro lado, $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}, \sigma_k, \sigma_\epsilon, S_{k,}S_\epsilon, \varepsilon, k$ son términos fuentes definidos por el usuario

Siendo la viscosidad turbulenta, μ_t, calculada como una combinación de κ y ε:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.5.1.1.1.3)$$

Donde C_μ es una constante.

3.5.1.1.2. Modelo Realizable k-épsilon

El modelo Realizable sigue el mismo principio teórico que el Estandar, diferenciándose en dos aspectos:

- Contiene una nueva formulación para la viscosidad turbulenta
- Nueva ecuación de transporte para la tasa de disipación ε.

Además, éste modelo predice con mayor precisión la velocidad de propagación.

Por lo que la ecuación mejorada de velocidad de disipación sería:

$$\frac{\delta}{\delta t}(\rho\varepsilon) + \frac{\delta}{\delta x_j}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\delta}{\delta x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\delta\varepsilon}{\delta x_j}\right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2\frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v\varepsilon}} + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(C_{3\varepsilon}G_b) + S_\varepsilon$$

(3.5.1.1.2.1)

En donde $G_k, G_b, Y_M, C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}, \sigma_K, K, \varepsilon, s_k, s_\varepsilon$, representan las mismas variables que el modelo Estandar, y con:

$$C_1 = \max[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5}, \quad \eta = S\frac{k}{\varepsilon}, \qquad S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \text{ (3.5.1.1.2.2)}$$

Y la formulación alternativa para la viscosidad turbulenta:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{K^2}{\varepsilon} \text{ (3.5.1.1.2.3)}$$

La diferencia entre el modelo Realizable y Estándar, es que C_μ ya no es una constante y se calcula a partir de:

$$C_\mu = \frac{1}{A_o + A_s \frac{U^* k}{\varepsilon}} \text{ (3.5.1.1.2.4)}$$

Donde Ao, As y U* son funciones de gradiente de velocidad

El término “Realizable” se asocia al hecho de que éste modelo satisface restricciones en las tensiones de Reynolds, y es consistente con la física de flujos turbulentos. La limitación de este modelo radica en que produce viscosidades turbulentas no físicas en situaciones cuando el dominio contiene tanto rotación como zonas con fluidos estacionarios.

Para nuestro análisis y estudio de erosión el modelo Realizable K-épsilon ha demostrado capturar la física con la mejor precisión.

Es un modelo de dos ecuaciones con las siguientes formulaciones matemáticas:

- La ecuación de transporte de energía cinética turbulenta es la misma que el modelo Estandar
- Ecuación de transporte de velocidad de disipación:

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\delta}{\delta xj}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\delta\varepsilon}{\delta xj}\right] + \rho c_1 S\varepsilon - \rho c_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v\varepsilon}} + c_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{K} c_{3\varepsilon}\text{Gb (3.5.1.1.2.5)}$$

3.5.1.2. Modelado de inyección partícula

Para el seguimiento de las partículas inyectadas (carbón pulverizado). La fase discreta se resuelve mediante el seguimiento de una gran cantidad de partículas. Fluent predice la trayectoria de una partícula en fase discreta integrando el balance de fuerzas en la partícula, que está escrito en un marco de referencia Lagrangiano. Este balance de fuerza iguala a la partícula, y puede escribirse como la ecuación de transporte de partícula, como se presenta a continuación:

$$\frac{P}{6} d_p^3 \rho_p \frac{\overrightarrow{\delta v_p}}{\delta t} = \frac{P}{6} d_p^3 \rho_p F_D (\vec{v} - \overrightarrow{vp}) + \frac{P}{6} d_p^3 \rho_p \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \text{F} \quad (3.5.1.2.1)$$

Donde

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_P d_p^2} \frac{C_D Re}{24} \quad (3.5.1.2.2)$$

Con C_D correspondiente al coeficiente de arrastre.

El modelo de inyección se aplica suponiendo remolinos turbulentos en partículas. El modelo asume que las partículas viajan a través de una sucesión de remolinos turbulentos que están presentes en el flujo.

La interacción de la pared con las partículas es un fenómeno importante que debe ser contabilizado. El momento de la partícula cambia durante la interacción entre las partículas y la pared.

3.5.1.3. Modelo de Erosión

En Fluent, las predicciones de erosión se pueden incorporar ya sea por una función de campo personalizado o por una función definida. Usaremos un campo personalizado para calcular la erosión, se tienen que incorporar datos como la velocidad o concentración.

La ecuación utilizada por Ansys para calcular la tasa de erosión es la siguiente [17]:

$$R_{erosión} = \frac{m_p C(d_p) f(\alpha) v^{b(v)}}{A\ face} \quad (3.5.1.3.1)$$

Donde $C(d_p)$ es una función del diámetro de la partícula, α es el ángulo de impacto de la trayectoria de la partícula con la pared, $f(\alpha)$ es una función del ángulo de impacto, b(v) es una función de la velocidad relativa de la partícula y A face es el área de impacto de la celda en la pared.

Como C (dp),$f(\alpha)$, y b son condiciones de contorno en una pared, sin considerar el material de la pared, los valores pre determinados no se actualizan para reflejar el material que se está usando.

Existe una variedad de modelos de erosión que se pueden modificar para que aparezcan en la forma de la ecuación general de Ansys que describe la tasa de erosión, la ecuación que ocuparemos para incluir el material de la pared es la siguiente:

$$ER = 1559 B^{-0,59} F_s v^{1,73} f(\alpha) (3.5.1.3.2)$$

En donde la ecuación puede ser reescrita con las siguientes sustituciones:

$$v^{1,73} = v^{b(v)} (3.5.1.3.3)$$

$$1559 B^{-0,59} F_s = C(d_p) \ (3.5.1.3.4)$$

Donde ER es la tasa de erosión, B es la dureza Brinell del material de la pared y Fs es el coeficiente de forma de la partícula.

4. CAPÍTULO: LA EMPRESA

El presente trabajo de título se limita al estudio de la planta termoeléctrica Aes Gener, central Ventanas, específicamente en las unidades 1 y 2

Este trabajo busca entregar una mejora en el transporte de carbón pulverizado que permita disminuir la criticidad en las cañerías de transporte y disminuir costos de reparación, y hacer una proyección de los daños en cañería causados por la abrasión del carbón.

4.1. Identificación del problema

El transporte de carbón pulverizado para ser llevado a la caldera para su combustión, se realiza mediante tuberías de transporte neumático. Estás tuberías tienes diferentes disposiciones, tramo horizontal, verticales, curvaturas, codos, necesarios para cambiar la dirección del ducto y esquivar equipos y/o estructuras existentes en el camino y así, poder llegar a los distintos niveles de quemadores de carbón. El problema de este transporte es la abrasividad del carbón pulverizado, que debido a las velocidades de transporte desgasta y erosiona cañerías, curvas y codos. Puede provocar una rotura en la tubería, principalmente en los codos. La solución actual a la rotura es aplicar masilla para cubrir el área desgastada, parchar o soldar el área para que no haya filtración de carbón hacia el exterior, y si es reiterativa la rotura ya no hay más solución que cambiar el tramo de ducto afectado.

El problema que provoca este desgaste de tubería, que se responde a ella como una emergencia de rápida de reparación, asociándose los gastos correspondientes a ella y las horas hombres implementadas en la reparación. Además, debido a la filtración, hay pérdida de carbón al ambiente llegando menor cantidad de combustible a la caldera.

4.2. Metodología

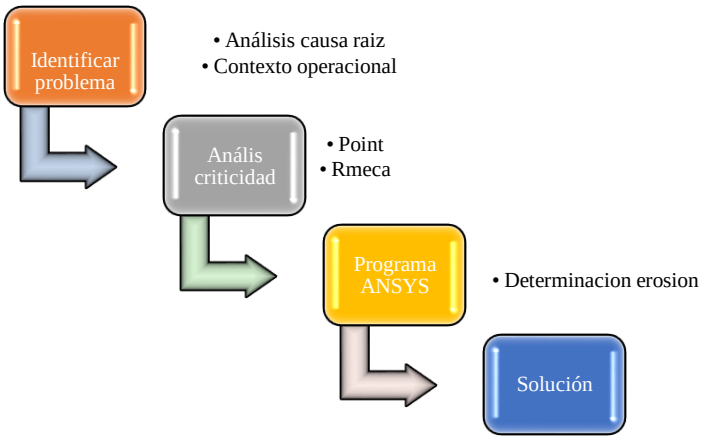


Ilustración 15: Metodología a seguir para solucionar problemática. Fuente: Elaboración propia

4.3. Proceso productivo

En una central térmica a vapor el fluido primario es el agua en estado de vapor y el motor primario es una turbina de vapor, la que transforma en energía mecánica la energía calórica del vapor obtenida de la caldera

Para describir el proceso se identificarán los equipos más relevantes dentro de la generación:

- Generador de vapor
- Turbina- Generador
- Sistema condensado
- Sistema agua de circulación
- Sistema agua de enfriamiento
- Sistema de combustible

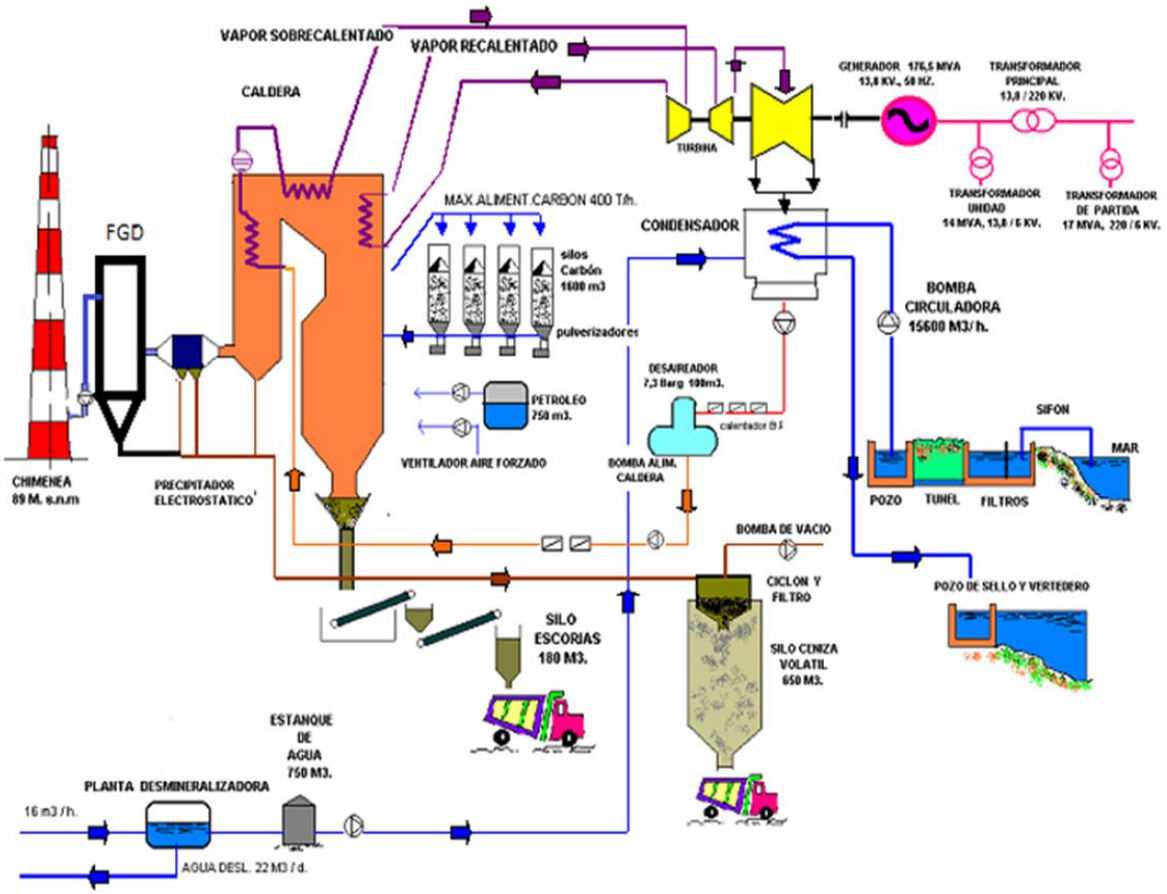


Ilustración 16 proceso de generación. Fuente: AES Gener, 2017

4.3.1. Generador de vapor

Una unidad generadora de vapor es una combinación de aparatos que consta de: calera, hogar, equipo de quemadores, equipo de suministradores de agua para la caldera; combustible y aire para la combustión, domo, intercambiadores de calor, economizadores, atemperadores, sobre calentadores, recalentadores, calentadores de aire, entre otros. Los cuales en conjunto producen el vapor necesario para alimentar la turbina según los requerimientos de generación.

La caldera cumple las funciones de quemar el combustible para producir calor, y usa el calor generado para convertir el agua en vapor.

En la planta termoeléctrica Aes Gener la caldera posee un domo, cuya función es almacenar el vapor generado por la caldera. Las paredes de tubos metálicos verticales dentro de la caldera están conectados al domo. A estos tubos se les llama tubos de pared y están llenos de agua. Aquí se genera el vapor que se usa para impulsar la turbina.

Los tubos rodean un espacio interior en la caldera llamado hogar, que es donde se quema el combustible. Este es suministrado al hogar por medio de los quemadores que se ubican en las esquinas del hogar.

Para tener una buena combustión, la caldera recibe un suministro continuo de combustible y de aire. Estos son entregados por dos sistemas: Sistema de combustible y sistema de aire de combustión. El sistema de aire de combustible impulsa el combustible desde los pulverizadores de carbón hasta los quemadores. En la caldera, el carbón se mezcla con más aire de combustión que se hace llegar por ductos envolventes que rodean la zona de quemadores. Este aire proviene del sistema de aire secundario, el cual asegura que exista la cantidad adecuada de aire en el hogar como para mantener la combustión.

El calor del hogar eleva la temperatura del agua en los tubos de la pared. Cuando la temperatura alcanza el punto de ebullición, se producen burbujas de vapor. Estas burbujas y el agua caliente suben hasta el domo en donde se separa el agua del vapor. El agua es recirculada de nuevo hacia los tubos de la caldera y el vapor que se acumula en el domo fluye hacia el sistema de vapor principal, el cual lo lleva a la turbina por medio de las líneas de vapor.

La caldera de la Unidad 1 posee las siguientes características:

- Producción de vapor: 362,9 [ton/h]
- Presión de vapor sobrecalentado: 140 [kg/cm²] a un T° de 538°C
- Temperatura de vapor recalentado: 538°C

Para el caso de la caldera de la Unidad 2, tiene las siguientes características:

- Producción de vapor: 646,8 [ton/h]
- Presión de vapor sobrecalentado: 140 [kg/cm²] a una T° de 538°C
- Temperatura de vapor recalentado: 538°C

En cuanto al domo de la calera posee las siguientes características técnicas:

Unidad 1:

- Diámetro: 1,7 [m]
- Presión operación: 151,2 $[\frac{kg}{cm}^2]$

Unidad 2:

- Diámetro: 1,67 [m]
- Presión de operación: $152{,}9\ [\frac{kg}{cm^2}]$

4.3.2. Turbina- Generador

La turbina está conectada a la caldera por líneas de vapor, y al generador por un eje el cual posee una serie de álabes. El vapor entra a la turbina a través de toberas y pasa por medio de la seria de álabes en donde el vapor entrega su energía térmica (calor) y su presión, haciendo que la turbina gire y, por lo tanto, arrastre el generador.

Las turbinas de las unidades 1 y 2 de la central termoeléctrica constan de tres partes:

- Turbina de alta presión
- Turbina de presión intermedia
- Turbina de baja presión

Para el caso de la Unidad 1 posee las siguientes características operacionales:

- Potencia nominal de 120 [MW]

- Diseñada para 140 [kg/cm²] de presión a 538°C de temperatura de vapor sobrecalentado
- Recalentamiento de 538 °C
- Flujo de vapor sobrecalentado de 337 [ton/h]

En cuanto a la Unidad 2:

- Potencia nominal de 210 [MW]
- Diseñada para 141 [Kg/cm²] de presión a 537,8°C de temperatura de vapor sobrecalentado
- Recalentamiento de 537,8 °C
- Flujo de vapor sobrecalentado de 616 [ton/h]

Contienen 6 extracciones de vapor cada turbina, las cuales alimentan con vapor los calentadores de aire y un flujo máximo de vapor de 354,2 [ton/h] de vapor se garantiza una potencia de 122 [MW]

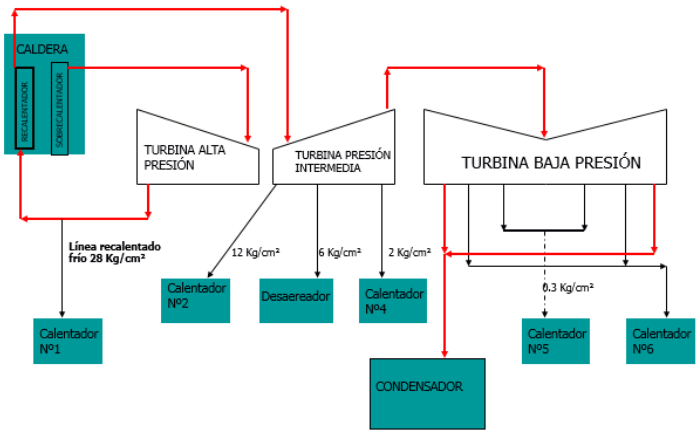


Ilustración 17 Extracciones de vapor en turbina

El vapor sobrecalentado que viene desde la caldera se introduce en la turbina de alta presión y causa la rotación del eje de la turbina. Luego el vapor sale de la turbina de alta para volver a la caldera y pasar por los recalentadores, para poder ingresar hacia la turbina de presión intermedia como vapor recalentado. Desde la salida de la turbina de

presión intermedia se alimenta la turbina de baja a presión A través de la salida de vapor se fluye hacia el condensador para expandir el flujo.

Los ejes de la turbina están conectados a uno o más ejes del generador, que a su vez giran y convierten la energía mecánica de rotación en energía eléctrica en el generador.

El generador está diseñado para una potencia de 135 [MW] enfriado por hidrógeno a una presión de 2,11 [kg/cm²], factor de potencia de 0,85, trifásico, 13,8 [kv] y 3000[rpm]

4.3.3. Sistema de condesado

El sistema de condensado consiste en tuberías, condensador, bombas, calentadores de agua de alimentación, intercambiadores de calor, válvulas, eyectores de aire y controles requeridos para suministrar condensado caliente y tratado químicamente al desaireador.

El sistema de condensado empieza en el condensador, en donde se extrae el calor de vaporización del vapor rechazado por la turbina de baja presión.

Un condensador es un intercambiador térmico, en el cual se pretende que el fluido que recorre cambie a fase líquida desde su fase gaseosa mediante el intercambio de calor con otro medio. El vapor que entra al condensador es enfriado por medio de agua de mar, ésta agua pasa a través de uno haces de tubos, absorbiendo el calor del vapor extraído que fluye a través de estos tubos. Se trata de un sistema de paso.

Una vez que el vapor pasa por el proceso de condensación, se convierte en vapor condensado.

El propósito del sistema de condensado es extraer condensado del pozo caliente y entregarlo al desaireador y mantener un nivel seguro en el estanque de agua de alimentación. Además, el condensador cumple la función de recibir el vapor que sale de la turbina de baja presión y transferir calor latente de vaporización del vapor del

agua para el enfriamiento del condensador. El vapor condensado se recoge para ser utilizado en el ciclo de vapor. Por otro lado, el condensador termodinámico, cumple el propósito de provocar el cambio de estado del vapor a la salida de la turbina para así obtener máxima eficiencia e igualmente obtener el vapor condensado en forma de agua pura de regreso al tren de generación de vapor.

Las razones para condensar el vapor son las siguientes:

- Se aprovecha el vapor a la salida de la turbina, cerrando el ciclo de agua
- Se reduce la presión a la salida, incluso por debajo de la atmosférica, con lo que el salto de presión es mayor y por lo tanto el rendimiento y la potencia de la turbina aumentan

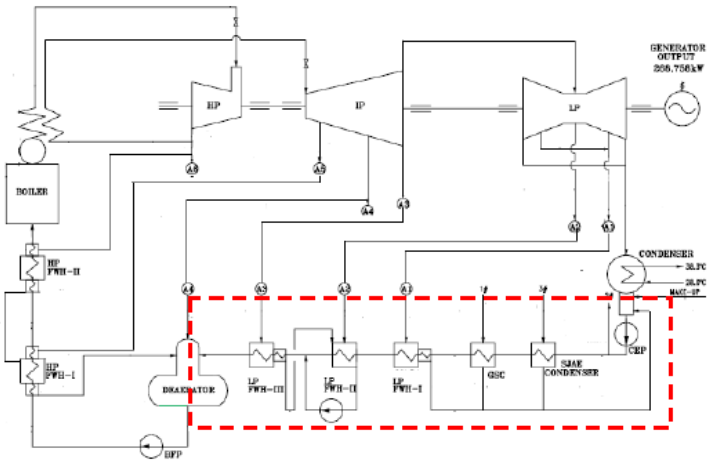


Ilustración 18 Ubicación sistema de condensado en el ciclo agua-vapor

El condensador aumenta la eficiencia de la unidad al crear un área de baja presión para evacuar el vapor de las turbinas de baja presión, extrayendo así más trabajo del vapor. En general, a menor presión en el condensador (mayor vacío), mayor será el aumento de la eficiencia del ciclo.

El condensador recibe flujos de los siguientes equipos:

- Purgas de los calentadores y otros elementos, que una vez enfriadas son incorporadas al sistema de condensado
- El aire que procede de entradas furtivas en los diversos elementos del ciclo agua-vapor, a través de los cierres de la turbina de vapor o con el agua de reposición al ciclo. Éste debe ser extraído y enviado al exterior mediante eyectores o bombas de vacío.
- El vapor procedente del escape de la turbo-bomba de agua de alimentación.
- El vapor de los bypass de las turbinas, que en determinados modos de operación transitorios (arranques, paradas, disparos, cambios bruscos de carga) conducen directamente al condensador todo el vapor generador en la caldera una vez atemperado.

Las condiciones en el interior del condensador son de saturación, es decir, está a la presión de saturación correspondiente a la temperatura de condensación del vapor. Esta presión siempre es inferior a la atmosférica, es decir, presión de vacío.

- Condensador Unidad 1: Capacidad de condensado 5570 $[m^2]$. Contiene 7700 tubos diseñados para condensar 261000 [kg/h] de vapor, con una circulación de 3150 [l/s]de agua de enfriamiento, a una temperatura de entrada de 15.56°C
- Condensador Unidad 2: Capacidad de consensado 8402 $[m^2]$. Contiene 11556 tubos Los requerimientos de agua de enfriamiento son 303935 [l/min] a 14°C

Las bombas de condensado hacen que el agua condensada sea impulsada a un estanque pulmón de alimentación. Estas bombas deben aumentar la presión del agua lo suficiente para alcanzar el estanque de agua de alimentación, situado a gran altura, y para superar la pérdida de carga que produce atravesar diversos equipos.

- Bombas de condensado Unidad 1: Dos bombas diseñadas para entregar 3850[l/min] a una altura manométrica de 16.2 $\left[\frac{lk}{cm^2}\right]$
- Bombas de condensado Unidad 2: Dos bombas con capacidad de 100%, entregan 8516 [l/min] cada una a 198,1 metros de columna total.

El desaireador cumple le función de extraer tanto el CO_2 como el O_2 del agua que ingresa a la caldera, ya que estos gases pueden tener un efecto corrosivo y tener un impacto negativo en el rendimiento de la caldera. Además, actúa como calentador de agua-

Posee las siguientes características:

Unidad 1:

- Capacidad calentador: 400000 [kg/h]
- T° calentamiento agua: 134°C a 164,9° C
- Reducción contenido oxígeno agua: 0,005 [$\frac{cm^3}{L}$].
- Capacidad estanque: 59900 [kg]

Unidad 2:

- Capacidad calentador: 516052[kg/h]
- T° calentamiento agua: 127,2 °C a 174,1°C
- Reducción contenido oxígeno agua: 0,005 [$\frac{cm^3}{L}$].
- Capacidad estanque: 60000 [kg]

4.3.4. Sistema agua de alimentación

El propósito del sistema de agua de alimentación es transportar agua de alimentación a la caldera desde el desaireador, a través de los calentadores de agua de alimentación de alta presión y del economizador, al hogar de la caldera. El sistema suministra la cantidad requerida de agua de alimentación desaireada al hogar para cualquier condición operativa de la planta.

El sistema agua de alimentación mejora la eficiencia térmica de la planta pre-calentando el agua de alimentación antes de que entre al economizador. También

suministra agua para los atemperadores del recalentador y el sobre calentador que se usan para controlar las temperaturas del vapor.

El sistema consiste en tuberías, bombas, calentadores de agua de alimentación, válvulas y controles requeridos para suministrar agua de alimentación a la caldera desairada, pre calentada y de alta calidad a través del economizador

Las bombas de agua de alimentación tienen por finalidad suministrar el agua necesaria para el funcionamiento del generador de vapor, manteniendo un nivel de agua seguro y estable durante todo momento. Posee las siguientes características:

Unidad 1: Cuenta con dos bombas de agua de alimentación, cada una con:

- Capacidad bomba: 335700 [kg/h]
- T° entrada agua alimentación: 134°C
- Potencia: 2685 [HP]

Unidad 2: Cuenta con 3 bombas de alimentación

- Capacidad total bombas: 816091 [kg/h]
- T° entrada agua alimentación: 174°C
- Potencia: 3500 [HP]

El estaque de agua de alimentación se encuentra ubicado inmediatamente después del desaireador y tiene una capacidad de 60 [ton] de agua

4.3.5. Sistema agua de enfriamiento

El sistema de agua de enfriamiento está constituido por un circuito cerrado de agua desmineralizada, el cual cuenta en el caso de la unidad 1 con un estanque de 18,9 [m³] de capacidad, en tanto la unidad 2 posee un estanque más pequeño con capacidad para 2,8 [m³] Este circuito cuenta además con intercambiadores de calor que permiten

enfriar el agua de enfriamiento, estos intercambiadores son alimentados con agua de mar desde un arranque proveniente del circuito de agua de circulación que va al condensador.

Cuenta también con dos bombas de agua de enfriamiento de una capacidad de 145,1 [l/s] en la unidad 1 y 201,9 [l/s] en la unidad 2.

La finalidad de este circuito es proporcionar un medio de enfriamiento a descansos de equipos rotativos como son ventiladores, bombas, también es utilizada esta agua en enfriadores de aceite de la turbina, enfriadores de hidrogeno del generador, sistema aire acondicionado salas de control, enfriadores de muestra de agua de la caldera, enfriadores de aceite bombas agua de alimentación.

Ilustración 19: Sistema agua enfriamiento

4.3.6. Sistema de combustible

El carbón necesario para la combustión en la caldera es transportado desde el puerto de ventanas hacia la cancha de acopio, lugar donde se mezclan los distintos tipos de carbones, luego es transportado por correas transportadoras y almacenado en silos donde se alimentan los pulverizadores de carbón. El carbón en los pulverizadores, con la adición de aire primario, es transportador mediante tuberías hacia los quemadores de la caldera. En los quemadores se inyecta aire secundario necesario para la combustión.

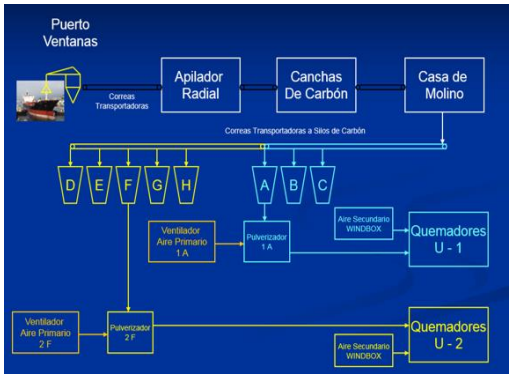


Ilustración 20 Sistema de carbón

4.3.6.1. Puerto Ventanas

Es el puerto de llegada de los carbones a combustionar para la generación eléctrica, llegan carbones de distintas partes del mundo: Nueva Zelanda, Australia, Indonesia, Colombia. Canadá. Chile.

Los barcos llegan 4 veces al mes para suministrar carbón a la plata, las naves tienen una capacidad aproximada de entre 50.000 toneladas a 70.000 toneladas, dependiendo de su tamaño,

4.3.6.2. Apilador radial

El apilador radial es el encargado de la recepción y acopio del carbón proveniente de las correas que vienen del puerto ventanas para organizarlo en las canchas de carbón. La función específica del Apilador es acopiar carbón en la cancha conformando una pila doble traslapada.

Ilustración 21: apilador radial

4.3.6.3. Cancha de carbón

La cancha de carbón tiene que tener un mínimo de stock requerido para que funcione la planta de 150.000 [ton] de carbón. La capacidad de carbón que puede contener es de aproximadamente 450.000 [ton] de carbón.

El carbón apilado en esta cancha es ordenado según tipo de carbón y mezclas que se usaran en la combustión.

Por ejemplo, en la siguiente imagen se muestra como está organizada la cancha de carbón en el mes de enero:

Ilustración 22: Carbones en cacha, Enero 2018

4.3.6.4. Casa de molino

La casa de molino es la encargada de la primera trituración que se somete el carbón. El carbón que llega al puerto de Ventanas tiene una granulometría de aproximadamente 4

pulgadas, la casa de molino tiene la función de bajarla a 2 pulgadas. Tamaño requerido para que pueda ingresar a los pulverizadores de carbón.

4.3.6.5. Silos de almacenamiento

Una vez obtenido el tamaño óptimo del carbón para el ingreso al pulverizador, por medio de correas transportadoras ingresa a los silos de carbón. En los silos se almacena el carbón para poder tener un suministro constante de carbón hacia los alimentadores de carbón, que alimentan al pulverizador.

En la Unidad 1 se encuentran 2 silos, uno para cada pulverizador. Para el caso de la unidad 2, se necesitan de 3 silos para alimentar a cada uno de los 3 pulverizadores.

Cada uno de los silos contienen las siguientes características:

- capacidad: 626,2 [m³]
- temperatura: 35°C
- presión: 250 [mmH2O]

Ilustración 23: silos de almacenamiento carbón

4.3.6.6. Pulverizadores de carbón: Molino de bolas

Una vez almacenado el carbón en los silos, por medio del alimentador de carbón es llevado el carbón hacia los pulverizadores.

En los sistemas de carbón pulverizado, el carbón crudo se alimenta en el pulverizador junto con aire caliente. El carbón se tritura y el aire caliente lo seca y sopla el polvo de carbón resultante a quemadores en la caldera para ser usado como combustible.

El objetivo de pulverizar el carbón es obtener el máximo contacto aire-combustible y así poder obtener una buena combustión en el hogar de la caldera, entendiéndose como buena combustión un mínimo presencia de CO en los gases y un porcentaje de materia combustible en las cenizas lo más bajo posible. Los valores deseables de materia combustible para calderas, como las presentes en la planta Aes Gener, es del orden de entre un 5% a un 7% siendo menor mientras más grande es la caldera.

Para obtener una buena combustión se requiere tener una distribución uniforme entre el combustible y el aire entre los quemadores.

Mantener igual la señal del ventilador aire primario, VAP, en los pulverizadores que se encuentran en servicio permite mantener una igual cantidad de combustible en cada piso de la caldera. Lo anterior se cumple si se ha ajustado la cantidad de carbón a moler por pulverizador. Efectuando sondaje a los tubos de bajada de cada pulverizador, manteniendo igual señal de VAP se puede corregir y emparejar la cantidad molida por el pulverizador

La operación apropiada de un pulverizador requiere la relación correcta de carbón y flujo de aire a través del pulverizador. Es necesario caracterizar el sistema de control del pulverizador para que siga una relación prescrita entre el flujo de carbón y el de aire primario. Esto requiere que el ingeniero de control se le proporcione una curva de carga, como la mostrada en el anexo D

Características de los pulverizadores de las Unidades 1 y 2:

- Motor: 350 HP
- Capacidad molienda 15 a 17 [ton/h]
- Unidad 1: 3 Unidades pulverizadores
- Unidad 2: 5 unidades pulverizadores

La calidad de molienda conseguida en los pulverizadores de anillo de bolas B&W de la central, fueron diseñados para moler 18 [ton/h] de carbón con un HGI de 50, y obtener una calidad de molienda del 70% molido que pasa por una malla de 200 mesh. (74µm)

Un parámetro que actúa sobre una mejora en la calidad de molienda, es variando la capa de carbón en el pulverizador. A mayor capa de carbón, se obtiene mayor finesa. En ciertos rangos lo anterior hace bajar la capacidad de molienda del pulverizador, al entregar una molienda superior al 75% que pasa por la malla de 200 mesh

Ilustración 25 Molino de Bolas

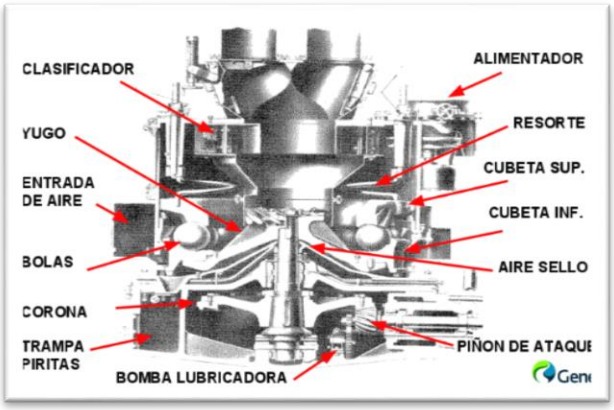


Ilustración 24 Elementos internos de un pulverizador

4.3.6.7. Aire primario

Debe tenerse en cuenta que la cantidad de aire primario requerida para el transporte del carbón molido afecta sobre varios parámetros:

- Temperatura de la mezcla aire/carbón: A mayor relación aire/carbón más temperatura se puede obtener, consiguiendo mejoras en la combustión. Valores deseables de mezcla aire/carbón al quemador entre 60°C y 75°C
- Relación aire/combustible: Según literatura una combustión deseable se consigue con una relación aire/combustible del orden de entre 1,5 Kg de aire por Kg de carbón. Ésta relación va cambiando según la carga del pulverizador, al aumentar el flujo de aire del VAP, la relación aire combustible disminuye. Y

a mayor flujo de aire, arrastra partículas de carbón de mayor tamaño, bajando la calidad de la molienda

El flujo de aire primario se debe ajustar bajo los siguientes conceptos:

- Tener un flujo mínimo que permita una velocidad de salida de la mezcla aire/combustible por el quemador a la velocidad de propagación de la llama, evitando así el riesgo de que la llama se propague hacia el quemador y/o pulverizador
- Flujo mínimo que evite la precipitación de partículas de carbón en los ductos que van hacia el quemador, evitando la obstrucción de ellos

4.3.6.8. Equipos asociados

- Ventiladores

El aire para la combustión se puede obtener a través de ventiladores de tiro forzado (VTF), ventiladores de tiro inducido (VTI) o una combinación de ellos.

El tiro forzado se obtiene soplando aire al interior del hogar de la caldera, a través de registros en los quemadores de carbón pulverizado. El aire es introducido a presión y atraviesa el lecho del combustible, o quemador, para llegar hasta la cámara de combustión del hogar.

El tiro inducido se consigue con un ventilador colocado entre la caldera y la chimenea. El efecto de este consiste en reducir la presión de los gases en la cámara de la caldera por debajo de la presión atmosférica y descargar los gases a la chimenea con una presión positiva

El aire de los VTF es usado como aire primerio y secundario para la combustión. El aire primario es frío (T° ambiente), y el secundario pasa por medio de calentadores de aire tomando una temperatura de aproximadamente 260°C, es extraído por los

ventiladores de aire primario (VAP) y enviado al correspondiente pulverizador donde es usado para el secado y transporte de carbón pulverizado.

- Ventilador de aire primario (VAP)

El ventilador provee el flujo de aire y presión necesaria para transportar el carbón desde los pulverizadores hasta los quemadores. Es uno de los principales componentes del transporte neumático, y debe dimensionarse adecuadamente, de tal manera que el sistema pueda funcionar de manera eficiente y a la capacidad de diseño

El ventilador de aire primario suministra un flujo de aire caliente con una temperatura adecuada al molino para poder secar el carbón para su mejor molienda y luego, una vez pulverizado, transportarlo hasta el quemador.

- Ventilador aire de sello a pulverizador (VAS)

Este ventilador aspira aire del ducto de aire frío del ducto de impulsión del VAP y lo suministra en los siguientes equipos:

Molinos: Para los pulverizadores el VAS cumple con las siguientes funciones:

- Aire de sello en la molienda: Evita que salga el carbón pulverizado hacia la parte inferior del molino en donde se encuentra el reductor
- Sellado en tuberías de carbón molido
- Aporta aire frío en la mezcla de carbón pulverizado con el aire primaria para regular la temperatura de la mezcla y evitar la combustión.

Alimentador de carbón: Evita que el carbón pulverizado se devuelva por la tubería de bajada hacia el molino

4.3.6.9. Ductos de transporte de carbón

Los ductos son los elementos por donde se transportan la mezcla gas + carbón pulverizado, desde el punto de alimentación, los pulverizadores, hasta el punto de

descarga, los quemadores. Incluye una zona de aceleración o tramo inicial, tramos horizontales, verticales, codos y curvas para cambiar la dirección, acoplamientos y flanches de unión.

Las partículas entran a la cañería con una baja velocidad de transporte, para luego tener que acelerarse hasta la velocidad de transporte determinada. Cuando empieza a acelerar el gas se produce la mezcla partícula/ gas con un elevado momentum, por lo cual es necesario estabilizar el flujo antes de que entre a la primera curva, algunas correlaciones recomiendas al menos 100 diámetros de cañería antes de que ocurra esto.

Algunas recomendaciones para mantener un buen funcionamiento y eficiencia son las siguientes: [9]

- Instalaciones con la menor cantidad posible de codos y curvas.
- Inspeccionar cada cierto tiempo que no haya fugas de material ni desgaste de cañería
- Diámetro interior de la cañería igual en todo el largo
- Alinear cañería a la estructura de soporte

Los codos y curvas son elementos necesarios, pero pueden causar problemas de desgaste y atrición si el consumo de energía es mayor al requerido y si el material a transportar es abrasivo o duro. Se recomienda que las curvas sean de radio de 6 a 8 veces el diámetro de la tubería, para minimizar las pérdidas. Después de cada codo y curva deber haber una zona de aceleración para las partículas.

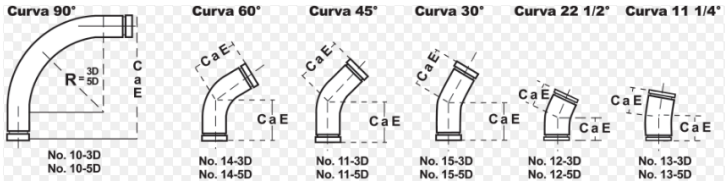


Ilustración 26 Diversos codos y curvas

4.4. Erosión en tubería transporte de carbón

El desgaste y la erosión son problemas que reducen la disponibilidad de la planta de energía, nos enfocaremos en la erosión causada en el transporte de carbón a través de tuberías.

Las principales variables que influyen en la erosión, son el tamaño, forma, velocidad, ángulo de impacto y composición de las partículas erosionadas, las propiedades de la superficie de los ductos y la temperatura del sistema. Según investigadores el factor más influyente en la erosión es la velocidad de impacto de las partículas sólidas: resultados experimentales indican que la velocidad de la partícula sólida o la velocidad del fluido que rodea a las partículas es directamente proporcional a la tasa de erosión [15]

El polvo de carbón es altamente abrasivo, por lo tanto, es importante mantener una velocidad de flujo admisible. Al pasar el polvo de carbón por tuberías a alta velocidad provoca, especialmente en las curvas, la erosión en las paredes.

4.5. Trayectoria del carbón

La mezcla aire- carbón a medida que sigue su trayectoria, desde los molinos hacia los quemadores, lo hace a través de una serie de giros y vueltas en la tubería de transporte de carbón. En consecuencia, las partículas de carbón que salen del molino distribuidas uniformemente a través de la sección transversal, a medida que van avanzando en su trayectoria el flujo se agrupa y fluye como una única corriente de partículas, que visto desde el exterior parece una cuerda, lo que es conocido como “Coal rope”.

El objetivo principal del transporte de carbón es equilibrar el flujo de carbón para llegar a los quemadores.

El carbón es suministrado a pulverizadores a través de alimentadores de carbón, luego la partícula es introducida dentro de la tubería de transporte donde se mezcla con aire de transporte a un flujo controlado y regulado para no sobrepasar la capacidad de la

línea. El elemento encargado de controlar el flujo de mezcla entrante a las tuberías es la placa orificio. La placa orificio se usa comúnmente para dividir el flujo en el sistema de tubería, para que salga uniformemente en cada salida. Si la distribución de las partículas no es uniforme las entradas a los quemadores no están equilibradas, por lo que la eficiencia de la combustión disminuye y las emisiones aumentan. Además, la distribución desigual del carbón puede tener un impacto significativo en la distribución de carbón dentro del horno y, por lo tanto, en el rendimiento del horno.

Para equilibrar el flujo de carbón por la red de tubería de carbón se requiere que la caída de presión en cada tubería de carbón se ajuste en base a las mediciones de flujo tomadas durante la operación de la caldera.

5. DESARROLLO DEL TEMA

Como ya se ha mencionado, el propósito de este trabajo de título es encontrar una mejora en los ductos de transporte de carbón, para lo cual es necesario definir la configuración del sistema de carbón, en cuanto a la cantidad de equipos usados, el tipo de carbón para la combustión.

Las redes de tubería de transporte de carbón de los pulverizadores hacia los quemadores pueden tener diferente ubicación geométrica y el número de pulverizadores y quemadores formando una compleja red de tuberías de carbón con diferentes longitudes, curvas y elevaciones. La distribución de los equipos genera resistencias de flujo del sistema, desequilibradas en las tuberías de carbón.

La unidad 1 de la central termoeléctrica ventanas cuenta con la siguiente configuración:

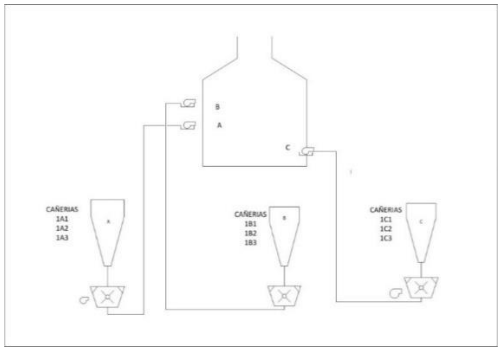


Ilustración 27 sistema de carbón unidad 1

Donde se cuenta con 3 pulverizadores circulares de bolas, cada uno con un silo de alimentación de carbón y un ventilador de aire primario. De cada pulverizador salen 3 cañerías las cuales llegan cada una a uno de los quemadores de la caldera, 3 por cada piso (piso A, piso B, piso C). Por ejemplo, para el caso del pulverizador C llega al piso C de quemadores de caldera. En Anexo E se encuentra plano general disposición tuberías.

Para el caso de la unidad 2, son 5 los pulverizadores necesarios:

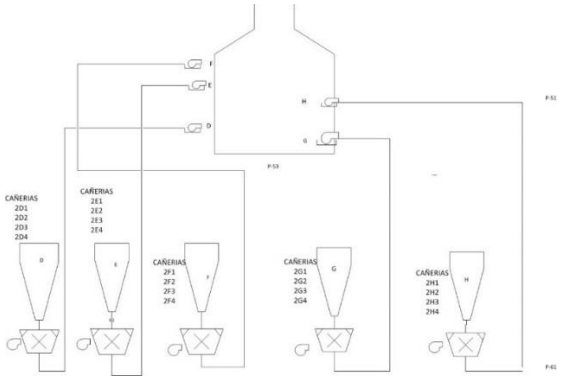


Ilustración 28 sistema de carbón unidad 2

Funciona de igual manera que la unidad 1, pero ahora hay 5 pulverizadores, cada uno con 5 cañerías que llegan a 5 pisos de la caldera y cada piso contiene 5 quemadores, un para cada cañería. Anexo E se encuentra plano general.

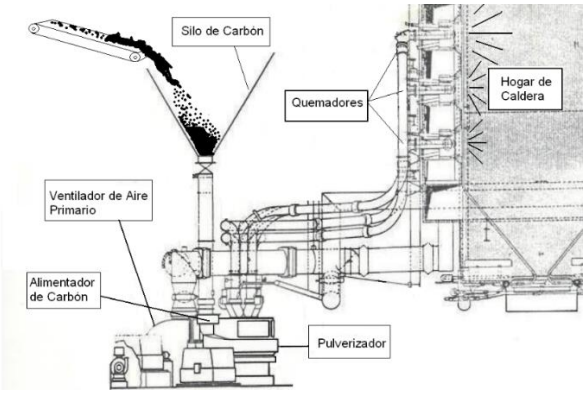


Ilustración 29 Sistema ilustrativo transporte de carbón

Cabe mencionar que tanto para la Ilustración 27 y 28 la configuración de los ductos es sólo para efecto de entender el sistema y no corresponde a la realidad.

En cuanto a los ductos de carbón, como se mencionó anteriormente, salen 3 de cada pulverizador en la Unidad 1, y 4 para el caso de la unidad 2. Tienen la siguiente configuración:

Unidad 1:

Tabla 2: Secuencia curvas, codos, tramos rectos y válvulas, desde pulverizador hacia quemadores. Unidad 1

Pulverizador A	Configuración (secuencia saliendo del pulverizador has quemador)
1 A1	Válvula-Codo 90° con curva 10°-curva 79°25'-recto 8'-válvula-curva 88°-curva 30°-válvula-
1 A2	Válvula- Codo 90°- curva 53°26'- tramo 10'- curva 88°-curva 30°-válvula-tramo recto 12"
1 A3	Codo 90°- curva 47°22'-tramo recto 10'-curva 88°- curva 30°-válvula-tramo recto 12"
1 B1	Curva 88°-válvula. -tramo recto 9'- curva 88°-curva 30°-válvula-tramo 12"
1 B2	Curva 88°- tramo recto 8'-válvula-curva 88°-curva 30°-válvula-tramo recto 12"
2 B3	Curva 88°- tramo 10'-válvula-curva 88°-curva 30°-válvula-tramo recto 12"
1 C1	Codo 90°- curva 61°08'- tramo recto 10'-válvula-curva 88°-válvula-tramo recto 12"
1 C2	Codo 90°-curva 60°55'- tramo recto 10'-válvula- curva 88°-válvula-tramo recto 12"
1 C3	Codo 90°- curva 88°- tramo recto 9'-válvula- curva 88°-válvula – tramo recto 12"

Unidad 2:

Tabla 3 curvas, codos, tramos rectos y válvulas, desde pulverizadores hacia quemadores, Unidad 2

Pulverizador	Configuración (Secuencia desde pulverizador hasta quemador)
2D1	Codo 90°-codo 90°- tramo horizontal 8"-codo 90°- válvula-tramo vertical 15"- curva 30°
2D2	Codo 90°- curva 32°32'-tramo recto 8'-codo 90°-válvula-tramo recto 15"-curva 30°
2D3	Codo 90°- curva 12°36'-tramo recto 8'-codo 90°-válvula- tramo recto 15"- curva 30°
2D4	Codo 90°-curva 34°12'-tramo recto 8"-codo 90°-válvula- tramo recto 15"-curva 30°
2E1	Codo 90°-tramo recto 8"-codo 90° curva 53°48'-válvula-curva 30°
2E2	Codo 90°-curva 22°54'-tramo recto 11'- codo 90°- válvula- tramo 8' Curva 30°
2E3	Codo 90°- curva 33°54'-tramo recto 8"- codo 90°- válvula- tramo recto 8'- curva 30°
2E4	Codo 90°- curva 25°30'-tramo recto 8"-codo 90°- válvula- curva 30°
2F1	Codo 90°- curva 24°24'-tramo recto 8"- codo 45°-válvula- curva 30°

2F2	Codo 90°- curva 48° 48°6'-tramo recto 8"- codo 90°-válvula- curva 4°54'- curva 30°24'
2F3	Codo 90°-tramo recto 8"-codo 90°-válvula- curva 4°54'- curva 30°24'
2F4	Codo 90°-curva 71°6'-tramo recto 8"-codo 90°-válvula- curva 30°
2 G1	Codo 90°- curva 73°54'- tramo recto 8"-codo 90°- válvula- tramo recto 15"
2 G2	Codo 90° con curva 72°- tramo recto 8"- codo 90°- válvula- tramo recto 15"
2 G3	Codo 90° con curva 35°- tramo recto 8"-codo 90°-válvula- tramo recto 15"
2 G4	Codo 90° con curva 64°-curva 18°30'- codo 90°-válvula- tramo recto 15"
2 H1	Codo 90°- codo 90°- tramo recto 8"-codo 90°-válvula-curva 30°24'- tramo recto 5'
2 H2	Codo 90°- codo 90°- tramo recto 90°-codo 90°-válvula- recto 8'- curva 30°24'
2 H3	Curva 88°-codo 90°- tramo recto 8"-codo 90°- válvula- tramo recto 8' curva 30°24'
2 H4	Codo 90°-codo 90°- tramo recto 5'-codo 90°- válvula- curva 30°

5.1. Análisis del problema

Una vez identificado el proceso termodinámico de la planta termoeléctrica Aes Gener, y situando el sistema de combustible con su interacción con otros procesos, nos podemos enfocar en él porque del problema de abrasión en ductos de transporte de carbón.

Como ya se ha mencionado el transporte de carbón es un proceso que se inicia desde la llegada del carbón al puerto ventanas, pasando por el acopio de carbón, las cintas transportadoras hasta llegar a los silos que alimentan los pulverizadores para el proceso de combustión en la caldera. Para efecto de este trabajo de título, nos centraremos en el proceso de transporte de carbón pulverizado, que se inicia en los pulverizadores para llegar a la caldera.

Para poder resolver la problemática, primero necesitamos conocer la raíz del problema. Para lo cual analizaremos las diferentes variables presentadas a continuación.

5.1.1. IPlanes de Mantenimiento

Una de las variables importantes que hay que tomar en cuenta, es el mantenimiento que se le realiza a la maquinaria.

Actualmente los planes existes son los siguientes:

- Mantenimiento preventivo: No existe un plan sistemático. Las medidas que se toman en éste tipo de mantenimiento consisten en que cada año al realizarse una detención de Unidad de planta proceden a medir espesores de diámetro de los ductos de carbón que han tenido mayor falla durante el periodo. Si el espesor de la pared del ducto es menor el 50% de la inicial, se toma la decisión si realizar una mantención que consiste en parchar el tramo, o, en realizar un cambio de ducto.
- Otra medida, y la más ocupada son por medio de observación visual. Los tramos que se visualicen más parches y soldaduras son los que se proceden a cambiar en las reparaciones, sin realizar el mantenimiento preventivo correspondiente.
- Mantención correctiva: Se actúa a la falla. Cuando se produce una filtración de carboncillo en el ducto, o éste presenta una rotura se procede a actuar como emergencia diaria para su reparación, la cual consiste en parchar el tramo dañado o la aplicación de masilla para reparar y sellar la fuga.

Ahora, basándonos en la Gestión de Riegos, en el marco de la ISO 31.000 [18], se distinguirán los siguientes puntos:

5.1.2. Contexto operacional

La termoeléctrica Aes Gener, central Ventanas, al funcionar con un combustible fósil, como es el carbón y, además, al estar situada en una zona industrial clasificada como zona saturada debido a la alta contaminación ambiental, tiene que tener altos estándares de prevención de cualquier tipo de contaminación.

Como nuestro trabajo de título se centra en el transporte de carbón, y la abrasión producida por este en las paredes de los ductos de transporte, se tiene que tener en consideración el tema medioambiental al haber una filtración de carbón pulverizado al ambiente por rotura de los ductos de transporte.

El carbón pulverizado al ser expulsado al medio por una rotura de ducto, genera un ambiente tóxico para los trabajadores, no así con el medio ambiente que ya al no combustionar no emite emisiones al medio.

Por otro lado, la configuración de la red de tuberías puede afectar la abrasión producida por las partículas de carbón al chocar con las paredes. Estas configuraciones no se pueden modificar dada la complejidad de diseño.

5.1.3. Identificación riesgos

Al producirse una alta tasa de erosión en las paredes, éstas se van desgastando hasta llegar al punto de sufrir una rotura de material. Los riegos que conlleva esta rotura es la expulsión del flujo aire- carbón al medio ambiente, la contaminación producida al ser un polvo tóxico para los trabajadores y personal que transite por el lugar, la inflamabilidad del carbón puede provocar amagos de incendio

Otro riesgo es los trabajos en altura que se realizar para reparar la rotura de material. Como todo trabajo en altura se tiene el riesgo caída de personal.

Además, para poder hacer la reparación no se detiene la máquina, lo que aumenta el ambiente tóxico para trabajadores y riego por la fuga de carboncillo.

Otro riesgo para los trabajadores es la utilización de un compuesto polimérico que repara los daños causados por la abrasión, rellenando el orificio o grietas en los ductos. Este compuesto puede provocar reacciones alérgicas al usuario.

Ilustración 30: Riegos de rotura de ducto de carbón

5.1.4. Diagrama causa- efecto

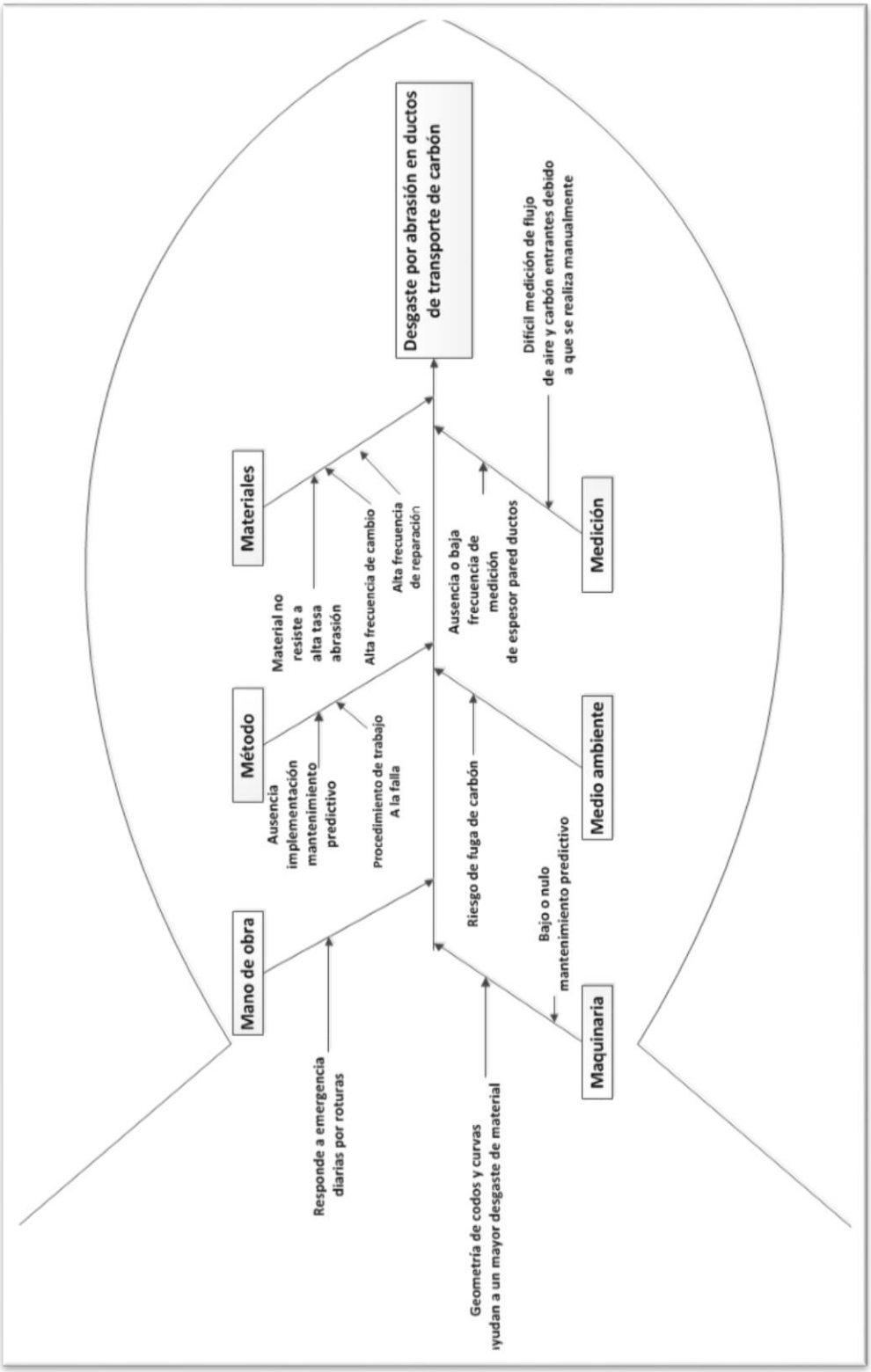
Este tipo de análisis se implementa una vez localizado donde, cuando y bajo qué circunstancias ocurre un problema, para así poder localizar la causa fundamental de falla.

El diagrama causa efecto o diagrama de Ishikawa, es un método gráfico que refleja la relación entre el efecto (problema) con sus causas potenciales.

5.1.4.1. Método de las 6M

Consiste en agrupar las causas en 6 ramas principales: Métodos de trabajo, Mano de obra, Materiales, Maquinaria, Medición y Medio ambiente. Estos 6 elementos definen todo proceso de manera global y cada uno aporta parte de la variabilidad del producto.

Ilustración 31: Diagrama de Ishikawa



Análisis diagrama:

En cuanto a los materiales, los ductos de carbón son de material acero A53, el cual sufre diversos daños debido al material que transporta. El material transportado no puede variar, pero si el material de las tuberías de transporte para disminuir los daños en éste.

Para el caso del método implementado, la ausencia de un plan de mantención preventiva puede ser causal de fallas reiteradas que se tienen que solucionar en el momento.

En cuanto a la mano de obra se puede sugerir llevar un control de falla e implementación de un plan de mantenimiento.

La geometría de la red de tuberías no se puede cambiar dado su complejidad, el material de la geometría de tuberías es el único punto que se podría modificar.

El medio ambiente se ve afectado por la fuga de carbón pulverizado cuando se produce alguna falla de filtración o rotura en los ductos.

Finalmente, en la medición, no se lleva a cabo un plan de medición de espesor de las tuberías de carbón para así actuar con anticipación a la falla. Y en cuanto a la cantidad de carbón con aire primario que ingresa a la red de tubería es un factor importante que genera erosión en las tuberías. Esta cantidad como medida óptima debiese ser 1,5 kg de aire por cada kg de carbón, no siempre cumpliéndose debido a la difícil medición de estos parámetros al ser de forma manual.

5.1.5. Análisis falla y criticidad

5.1.5.1. Causa raíz

El análisis causa raíz es una herramienta fundamental para determinar las causas fundamentales que generan una repetición de falla. Es una herramienta sistemática que se aplica con el objetivo de determinar las causas que originan las fallas, sus impactos

y frecuencia de aparición, para poder mitigarlas o suprimirlas totalmente. Esto se realiza por medio de un estudio de factores, condiciones, elementos y afines que podrían originarla

Luego de conocer cómo funciona el sistema de transporte de carbón, con cada uno de sus equipos y configuraciones, se debe comenzar con el análisis de fallas y criticidad. En primer lugar, se debe enfocar el análisis de falla y criticidad a los ductos de transporte de carbón, con su red de tuberías. Se consiguen históricos de fallas y cambios de ductos de la planta. Con estos datos es posible calcular la criticidad de las diferentes fallas.

En base a los históricos de falla, la experiencia de trabajadores y encargados se genera una matriz de criticidad basada en la implicancia que representa la frecuencia de falla. Por otro lado, se establece un orden de importancia del sistema en función a un riego asociado, en donde se define el factor riesgo como:

$$R = PxC \ (ecuación\ 5.1.5.1)$$

En donde el riesgo es el producto de la frecuencia de falla por sus consecuencias.

En este caso particular las consecuencias serán definidas por:

- El tiempo de reparación
- Impacto en la producción
- Costo implicado en reparación
- Impacto en seguridad
- Impacto ambiental

El tiempo de reparación dependerá del daño causado en la tubería, ya sea que se decida reemplazar por otra tubería, o reparar por medio de parches, en donde varía el tiempo según la magnitud del daño y tamaño de parche aplicado.

El impacto en producción fue medido según el criterio de emergencias diarias emitidas, por ejemplo, un ducto al tener mayor cantidad de emergencias en un lapso de tiempo, tiene un mayor impacto en la producción que otro con menor cantidad de emergencias diarias.

En cuanto al costo, se consideró el precio de comprar un ducto, el precio de parchado y el precio del trabajador.

Impacto en seguridad, se determinó por trabajos en altura y el riesgo asociado al trabajo con el ducto dañado emitiendo al ambiente carbón.

Finalmente, el daño ambiental se considera al igual que el impacto de producción, mientras más emergencias diarias se produzcan mayo impacto ambiental de obtendrá.

El resultado del análisis de criticidad es un conjunto de configuración y red de tuberías, para los cuales se realizará un análisis FMEA.

El FMEA corresponde a un análisis de modos y efectos de falla, que incluye una evaluación de criticidad de modo de falla. FMEA corresponde a las siglas en inglés Failure Mode Analysis and Effects. Es una herramienta que permite identificar los defectos en el equipo que deberían ser eliminados o reducidos. La meta del FMEA es la de delinear los pasos del proceso que están en riesgo de contribuir la falla

5.1.5.2. Análisis FMEA

Tabla 4: FMEA, ductos de carbón

Análisis FMEA Ductos de carbón								
equipo			grupo de sistema: Sistema de transporte de carbón			Equipo: tuberias transporte neúmatico carbón pulverizado		
			Sub sistema: Sistema equipo auxiliar caldera			material: acero al carbono A		
			componente	pieza	parte	Diámetro tubería: Unidad 1= 406,4 mm	Unidad 2= 355,6 mm	
ITEM	funcion	falla funcional	pulverizador	ductos	Tipo de tramo	modos de falla	causas potenciales	efectos potenciales
Ductos de transporte de carbón desde el pulverizador hasta los quemadores	suministrar carbón a la caldera mediante el transporte neumatico de carbón pulverizado con un flujo de carbon app de 17ton/hora	Desgaste tuberia transporte de carbón debido a la abrasión del carbón	1a	1a1	Codo saliendo del pulverizador	Filtracion o rotura	Velocidad de mezcla aire-carbón alta	Contaminarción debido a la liberación de carbón pulverizado al ambiente
				1a2				
				1a3			Relación aire/carbón inadecuada	
			1b	1b1			Angulo y forma del codo	
				1b2				
				1b3				
			1c	1c1	Codo llegando al quemador		Flujos turbulentos al interior de la tubería	
				1c2				
				1c3				
			2d	2d1			Altas velocidades al llegar al quemador, debido a la diferencia de presión que debe existir para el transporte neúmatico	Llegada de menos combustible a la caldera
		Filtración de carbón pulverizado por erosion de la tuberia producto del carbón pulverizado		2d2				
				2d3				
				2d4				
			2e	2 e1	Codos y curvas entre pulverizador y quemadores		carbón pulverizado es un material abrasivo	
				2 e2				
				2 e3				
				2 e4				
			2f	2f1			Distribución de la red de tubería	Tiempo y costos de reparación
				2f2				
				2f3				
		Rotura de ducto producto del carbón pulverizado		2f4	tramos rectos entre pulverizado y quemadores			
			2g	2g1			Inadecuada mantención	Aumento de emergencias diarias
				2g2				
				2g3				
				2g4				
			2h	2h1			Material no resistente a la tasa de erosión proporcionada	
				2h2				
				2h3				
				2h4				

Una vez identificado el modo de falla y los efectos que causa, se procede analizar los tramos más críticos según se explicó anteriormente.

5.1.5.3. Guía de criticidad Unidad 2

Se realiza tabla con guía de criticidad para obtener el riesgo asociado al sistema:

Tabla 5: Guía de criticidad Unidad 2

Guía de criticidad	
1.- Frecuencia de daño	Puntaje
cambio: 0 en dos años	0
cambio: 1 en dos años	200
cambio: 2 en dos años	300
entre 4 y 6 avisos de emergencia	100
entre 2 y 4 aviso emergencia	50
entre 1 y 2 aviso emergencia	25
2.- Impacto operacional	
2.1- Tiempo promedio reparación	Puntaje
más de 2 horas	4
entre 1 y 2 horas	3
Entre 30 y 60 min	2
entre 0 y 30 min	1
2.3 Impacto producción	Puntaje
No afecta	0
]0%- 25%]	1
]25%-50%]	2
]50%-75%]	3
]75%-100%]	4
Costo reparación	Puntaje
menos de US5000	10
entre US5000-US10000	20
entre US10000-US15000	30
más de US15000	40
Impacto seguridad	Puntaje

si	50
no	0
Impacto ambiental	Puntaje
No afecta	0
]0%- 25%]	10
]25%-50%]	20
]50%-75%]	30
]75%-100%]	40

5.1.5.4. Guía de criticidad Unidad 1

Tabla 6 Guía de criticidad Unidad 1

Guía de criticidad Unidad N° 1	
1.- Frecuencia de daño	Puntaje
Entre 1 y 2 parches	100
Entre 3y 4 parches	200
Entre 5 y 6parches	300
2.- Impacto operacional	
2.1- Tiempo promedio reparación	Puntaje
más de 2 horas	40
entre 1 y 2 horas	30
Entre 30 y 60 min	20
entre 0 y 30 min	10
2.3 Impacto producción	Puntaje
No afecta	0
]0%- 25%]	1
]25%-50%]	2
]50%-75%]	3
]75%-100%]	4
Costo reparación	Puntaje
menos de US25000	10
entre US 25000-US40000	20
entre US40000-US6000	30

más de US6000	40
Impacto seguridad	Puntaje
si	50
no	0
Impacto ambiental	Puntaje
No afecta	0
]0%- 25%]	10
]25%-50%]	20
]50%-75%]	30
]75%-100%]	40

Una vez calculada la criticidad correspondiente a cada ducto según la ecuación 5.1.5.1, tomando datos desde el año 2015 a la fecha se realiza una tabla de criticidad según el riesgo asociado.

5.1.5.5. Tabla de criticidad

Para el caso de la Unidad 2 de la planta termoeléctrica, recogiendo datos desde el 2015 a la fecha, sobre los cambios en los codos y tramos rectos realizados en los mantenimientos de la unidad, correspondientes a los años 2016 y 2017, y los datos de emergencias diarias por rotura y filtración de carbón en los ductos de transporte, desde el 2015 a la fecha, se realiza la siguiente tabla de criticidad:

Criticidad ductos de transporte de carbón- Unidad 2							
ducto	Frec.	Tiempo repar.	Impacto produc	costo repar.	Seguridad person.	daño amb.	criticidad
2D1	300	1	3	20	50	20	28.200
2D2	400	4	4	30	50	40	51.200
2D3	200	4	0	10	50	0	12.800
2D4	50	3	2	20	50	20	4.750
2 E1	0	3	0	20	50	0	-
2 E2	200	4	0	30	50	0	16.800
2 E3	200	4	0	30	50	0	16.800
2 E4	400	3	0	40	50	0	37.200
2F1	250	3	2	20	50	20	23.750

2F2	100	4	3	20	50	30	10.700
2F3	50	3	2	10	50	20	4.250
2F4	250	3	2	20	50	20	23.750
2G1	100	1	4	0	50	40	9.500
2G2	100	1	3	0	50	30	8.400
2G3	325	3	2	20	50	20	30.875
2G4	25	3	1	10	50	10	1.850
2H1	250	4	2	20	50	20	24.000
2H2	25	1	1	20	50	10	2.050
2H3	225	3	1	20	50	10	18.900
2H4	250	3	3	10	50	30	24.000

Tabla 7 Tabla de valores criticidad, Unidad 2

Para el caso de la Unidad 1, el procedimiento es distinto, ya que la empresa no tiene en su base de datos los cambios de ductos y codos realizados en las mantenciones de los años 2015 y 2016. En cuanto a la del 2017 no se realizó mantención de la Unidad.

Por lo tanto, sólo se recogieron datos sobre las emergencias diarias obtenidas desde el 2015 a la fecha, obteniendo así la siguiente tabla:

Tabla 8 Tabla de valores criticidad, Unidad 1

Criticidad ductos de transporte de carbón Unidad 1							
ducto	Frec.	Tiempo repar.	Impacto produc	costo repar.	Seguridad person.	daño amb.	criticidad
1A1	200	4	3	40	50	30	25.400
1A2	200	4	1	40	50	10	21.000
1A3	100	3	1	30	50	10	9.400
1B1	0	0	0	0	50	0	-
1B2	0	0	0	0	50	0	-
2B3	100	1	1	10	50	10	7.200
1C1	200	4	1	40	50	10	21.000
1C2	300	3	4	30	50	40	38.100
1C3	300	4	4	40	50	40	41.400

5.1.5.6. Tramos analizados

Una vez analizado el problema, con los diversos factores que se ven afectados y distinguiendo los tramos más críticos se tiene que proceder a encontrar una solución, para esto distinguimos los tramos que vamos a trabajar.

Unidad 2:

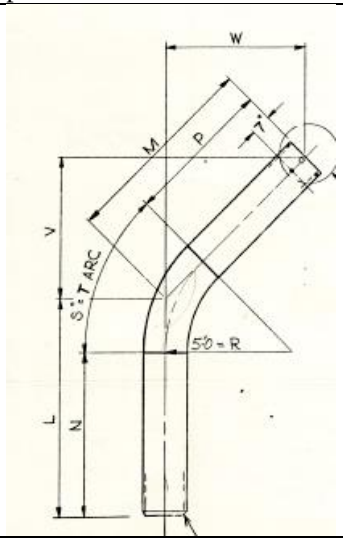
Se trabajará con los ductos que estén dentro de las 3 criticidades más altas, las cuales corresponden, en orden decreciente, a los siguientes ductos:

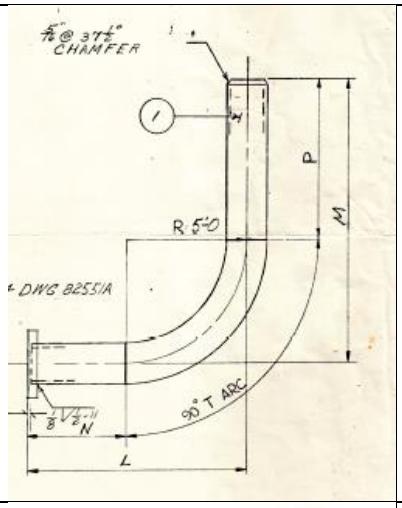
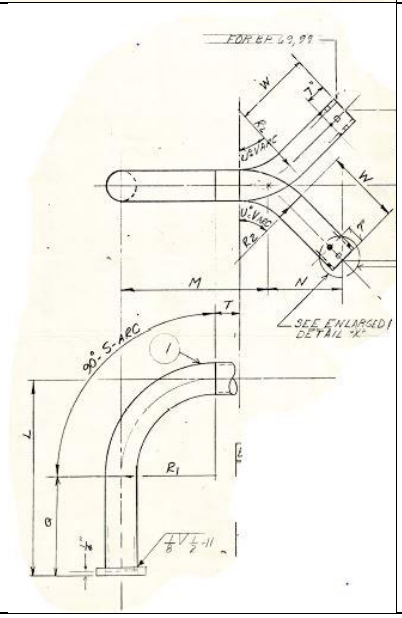
Tabla 9 Tramos críticos a analizar, Unidad 2

Ducto	Criticidad
2D2	51.200
2E4	37.200
2G3	30.875

Como no se tiene información de que tramo de los ductos críticos mencionados es en donde se produce el mayor daño, se requiere del histórico de fallas y de experiencia de trabajadores, en donde finalmente se obtienen los siguientes

Tabla 10 Configuraciones tramos críticos a analizar, Unidad 2

Ducto	Tramo	plano	Medidas
2D2	BP-10 – segunda curva saliendo pulverizador, orientación horizontal		Ángulo S°= 33° N= 5,03 [m] P= 0,762 R=1,524[m]

2D1	BP-40 Primer codo saliendo del pulverizador		Ángulo 90° L= 1,98 [m] M= 3,87 [m] R=1,524 [m]
2G3	BP-69 Primera curva saliendo del Pulverizador		Ángulos S= 90° U= 35° Q= 1.068 [m] T= 1.524[m] M=3.65 [m] W= 0.6 [m] R1=R2 =1.524 [m]

Unidad 1:

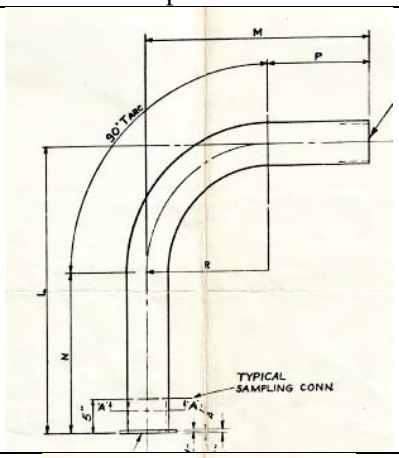
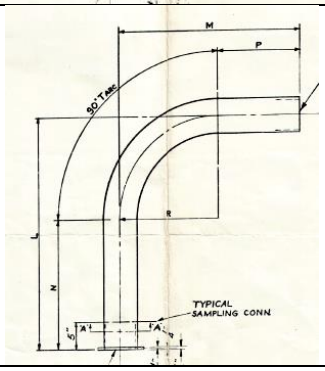
En el caso de esta Unidad se trabajar con las dos mayores criticidades, las cuales corresponden a los siguientes ductos:

Tabla 11 Tabla 10 Tramos críticos a analizar, Unidad 1

Ducto	Criticidad
1C2	38.100
1 C3	41.400

Al igual que el caso de la Unidad 2, por experiencia de trabajadores se determinó que curva es la que frecuentemente presenta mayores daños:

Tabla 12 Configuraciones tramos críticos a analizar, Unidad 2

Ducto	Tramo	plano	Medidas
1C2	BP-24		Ángulo 90° L=2.13[m] M=2,13[m] R=1,828
1 C3	BP-20R		Ángulo 90° L=2.13[m] M=2,13[m] R=1,828

Ahora que ya están distinguidos los tramos que trabajaremos, en el siguiente capítulo se explica la metodología a seguir para resolver el problema

6. CÁLCULO Y CONDICIONES OPERACIONES DE LA LÍNEA DE TRANSPORTE

6.1. Características del material a transportar

El tipo y cantidad de carbón a pulverizar, cambia cada día según requerimientos de la unidad. La tasa de alimentación de carbón, normalmente se determina automáticamente mediante un sistema de control de combustión, teniendo en cuenta la demanda de MW en la unidad, la cantidad de carbón y el número de pulverizadores en servicio. Puede ser mezclas de distintos tipos de carbón traídos de distintas partes del mundo, como Nueva Zelanda, Colombia, Australia, Chile, entro otros.

Para el año 2017 los tipos de carbón y mezclas más utilizadas, para la Unidad 2, fueron las siguientes:

- 100% cerrejón
- 80% cerrejón +20% Premium Ash
- 90% CMC+ 20% Premium Ash

Todos correspondientes a carbones bituminosos.

Para el caso de la Unidad 1, fueron los siguientes:

- 40% cerrejón + 50% Scota Premium + 10% Premium Ash
- 90% cerrejón + 10% Premium Ash
- 60% cerrejón + 40% CNR

Para poder analizar las propiedades del carbón, se elige el tipo de carbón más usado en los meses de septiembre y octubre:

- Unidad 1= 60% cerrejón Dracopulus+ 40% CNR M. Pissarek
- Unidad 2 = 100% Cerrejón Dracopolus

Para encontrar las características del material a transportar se obtuvo la información de la sala de operaciones de la Unidad 1 y 2:

Tabla 13 Características del carbón

Material	Cerrejón Dracopolus	Premium Ash
Cenizas [%]	9.89	9.6
Poder calorífico superior [kcal/kg]	6123	5719
Humedad total [%]	12.94	9.89
Material Volátil [%]	44.9	26.48

6.2. Cálculo caídas de presión en las líneas de transporte

Para poder transportar el carbón pulverizado por tuberías horizontales y verticales es necesario determinar la caída de presión de la línea.

La caída de presión del sistema es la suma de las caídas de presión individuales en cada componente, según se explicó en el punto 3.3.4.3

$$\Delta P_{total} = \Delta P_{GAS} + \Delta P_{ACELERACIÓN} + \Delta P_{TUBERÍA} + \Delta P_{CURVAS}$$

Para el cálculo de las caídas de presiones de cada componente se usaron las siguientes fórmulas:

- Caída de presión en fase gaseosa:

$$\Delta P_{gas} = f_g \frac{L}{D} \frac{\rho_g U^2}{2} \quad (6.2.1)$$

- Caída de presión por aceleración

$$\Delta P_{ACELERACIÓN} = \rho_g U_g U_p \mu \quad (6.2.2)$$

- Caída de presión en tubería

$$\Delta P_{tubería} = \Delta P_{gas} + \Delta P_{sólido} \quad (6.2.3.1)$$

$$\Delta P_{gas} = f_g * \frac{L}{D} \epsilon \frac{\rho_g U_g^2}{2} \quad (6.2.3.2)$$

$$\Delta P_{sólido} = f_p * \frac{L}{D} (1 - \epsilon) \frac{\rho_P U_P^2}{2} (6.2.3.3)$$

$$\epsilon = 1 - \left(\frac{\rho_g}{\rho_p}\right)\left(\frac{U_g}{U_P}\right) \mu \ (6.2.3.4)$$

$$\mu = \frac{W_{\mathrm{p}}}{W_g} \ (6.2.3.5)$$

- Caída de presión en curvas

$$\Delta P_{curvas} = k * \frac{\rho_g U_g^2}{2} \ (6.2.4)$$

Para determinar el coeficiente de fricción fg se ocupa el diagrama de Moody que se encuentra en el Anexo B, para lo cual es necesario conocer el número de Reynolds, y la rugosidad de la tubería:

- N° de Reynolds es del orden de 3*10^5, para la Unidad 2 y de 4*10^5, para la Unidad 1
- Rugosidad acero al carbono = 0.046
- ε/D =0,000136681 Unidad 2. ε/D = 0,00011876 para el caso de la Unidad 1

- El factor de fricción del gas: fg = 0.085 Unidad 2. fg = 0.09 Unidad 1

En cuanto al coeficiente de fricción en sólido fp se ocupa la correlación de Stemerding [], una de las cuantas encontradas en la literatura

- Fp= 0.012

Para el coeficiente de pérdida de carga en codos y válvulas “K” se obtienen mediante el anexo C, al igual que las pérdidas por válvulas.

Es necesario calcular estas pérdidas de presiones para conocer las velocidades y densidades en la entrada de cada codo o curva a analizar.

Antes de empezar a realizar cálculos, es necesario recoger todos los datos necesarios para poder calcularlos. Ya se conoce los datos de la capacidad requerida de la empresa en cada pulverizador, las características del material a transportar y las distancias horizontales, verticales, codos, curvas variables y válvulas. Por lo tanto, los datos iniciales serían los siguientes:

- Unidad 1

Tabla 14 Parámetros de entrada ductos de carbón, Unidad 1

Datos iniciales	Unidad	PULV. A	PULVC B	PULV. C
Flujo másico gas	$W_g[\frac{kg}{s}]$	8,165	6,577	6,577
Velocidad entrada gas (1 ducto)	U_g [m/s]	14,68	12,1	12,1
Temperatura	T [°C]	66	66	66
Diámetro interno	D [mm]	386,95	386,95	386,95
Presión interna pul	P [pa]	11767,98	11767,98	11767,98

- Unidad 2

Tabla 15 Parámetros de entrada ductos de carbón, Unidad 2

Datos iniciales	Unidad	PULV. D	PULV. E	PULV. F	PULV. G	PULV. H
Flujo másico gas	$W_g[\frac{kg}{m^3}]$	7,03068	7,18188	7,03068	9,955	7,7866
Velocidad transporte gas	U_g [m/s]	16,7	17,06	16,7	23,6	18,5
Temperatura pul	T [°C]	60	60	60	60	60
Diámetro interno	D [mm]	336,55	336,55	336,55	336,55	336,55
Presión interna pul	[pa]	11767,98	11767,98	11767,98	11767,98	11767,98

Para el cálculo de la caída de presión, se siguen los siguientes pasos:

Parámetros de entrada:

- Presión: Presión en Pulverizador 11767.98 [Pa]
- Temperatura constante: T= 60[°C], Unidad 2. T= 66°C Unidad 1
- Densidad del gas: $\rho_1 = \frac{P}{R(273+T)}$
- Velocidad gas: $U_{g1} = \frac{W_g}{\frac{\pi}{4}D^2\rho_g}$

Siendo R la constante de gases ideales = 287

- Velocidad partícula: $U_{p1} = U_{g2}\left(1 - 0.68d_p^{0.92}\rho_p^{0.5}D^{-0.54}\rho_g^{-0.2}\right)$

Siendo: - d_p el diámetro de la partícula = 0,000074

- ρ_p la densidad de la partícula = 800 $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$

- $\Delta P_{total1} = \Delta P_{GAS1} + \Delta P_{ACELERACIÓN1} + \Delta P_{TUBERÍA1} + \Delta P_{CURVAS1}$

Siguientes parámetros

Una vez calculados los parámetros de entrada es posible calcular los parámetros siguientes mediando la ecuación de continuidad de Bernoulli, incluyendo las pérdidas de presiones

- $P_2 = \rho g[(Z_1 - Z_2) + \left(\frac{V_1^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g}\right) - \Delta P_{total\ 1}]$

Siendo $(Z_1 - Z_2)$ la diferencia de altura entre el punto 1 y 2. (Solo se consideran las distancias verticales)

Para los parámetros: ρ_2, U_{g2}, U_{p2}, ΔP_{total2} se ocupan las mismas fórmulas anteriores.

Luego se van calculando los parámetros, 3,4,5, etc. Hasta llegar al último tramo de la tubería

Como ya se mencionó, la caída de presión es usada para calcular las presiones, densidades y velocidades a la entrada de codos y curvas para, mediante una simulación, ocupando el programa Ansys Fluent CFD, poder determinar la erosión ocasionada en la pared de la tubería.

La erosión en tuberías de transporte será calculada en los tramos más críticos.

6.3. Erosión por Ansys, CFD

Para el uso del programa, como ya se ha mencionado es necesario obtener las velocidades, presiones y densidades de entrada en cada tramo crítico. Los tramos críticos a analizar según el análisis realizado, considerando las siguientes suposiciones de diseño:

- Temperatura constante
- Relación aire carbón constante a lo largo del ducto de carbón
- Flujo incompresible
- Presiones al interior de la tubería igual a 0 al ser presiones de vacío, el programa no tiene mayores cambios.

Para obtener resultados y comparar entre ellos, se usarán distintos parámetros que se han usado en la planta durante el año 2017-2018

Los parámetros a entrar, un ducto, en los tramos críticos son los siguientes:

Tabla 16 Parámetros de entrada programa CFD, Ansys Unidad 1-2

Pulv.	**razón aire/carbón [-]**	**μ** $[\frac{kg}{ms}]$	**ρ** $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$	V_g $\left[\frac{m}{s}\right]$	V_p $\left[\frac{m}{s}\right]$	**Flujo de carbón [Kg/s]**	**Flujo aire [Kg/s]**
Pulv. D 2D2 BP10	1,39	0,0000204	1,910128	22,42	23,096	1,3638	1,8899
	1,46	0,0000204	0,98885	17,65	18,173	1,10208	1,6064
	1,55	0,0000204	0,95014	20,04	20,641	1,1368	1,7576
	1,60	0,0000204	0,93211	21,16	21,801	1,14167	1,82382
	1,65	0,0000204	0,90199	23,05	23,748	1,1680	1,9277
	1,74	0,0000204	0,936119	20,97	21,601	1,0423	1,81437
	1,93	0,0000204	0,91585	22,28	22,957	0,977	1,8899
Pulv. E 2 E4 BP 40	1,5	0,0000204	1,1407	17,61	17,7	1,2069	1,8143
	1,55	0,0000204	1,14097	17,61	17,7	1,1736	1,8143
	1,58	0,0000204	1,1418	17,41	17,5	1,1368	1,79547
	1,62	0,0000204	1,14127	17,6	17,696	1,1215	1,81437
	1,74	0,0000204	1,14020	17,98	18,076	1,0645	1,85217
	1,81	0,0000204	1,14663	16,45	16,53	0,9382	1,7009
	1,85	0,000021	1,14127	17,4	17,5	0,97014	1,79547
Pulv. G G3 BP69	1,37	0,0000204	1,09706	16,77	16,862	1,29375	1,77468
	1,49	0,0000204	1,02285	23,52	23,647	1,67142	2,48877
	1,51	0,0000204	1,078642	18,75	18,856	1,3138	1,9844
	1,53	0,0000204	1,098	16,79	16,88	1,1576	1, 77657
	1,59	0,0000204	1,08097	18,58	18,676	1,2368	1,9655
	1,64	0,0000204	1,08127	18,58	18,676	1,19583	1,9655
	1,69	0,0000204	1,09558	17,15	17,239	1,07361	1,81437
Pulv. C C2/3-BP24/BP20R	1,49	0,0000201	1,183	19,526	19,430	1,828	2,7220
	1,52	0,0000201	1,183	18,795	18,703	1,725	2,6204
	1,56	0,0000201	1,183	16,358	16,277	1,469	2,2806
	1,65	0,0000201	1,183	18,798	18,706	1,5944	2,6208
	1,68	0,0000201	1,183	19,924	19,827	1,649	2,7778

7. RESULTADOS CFD, FLUENT ANSYS

Una vez ingresados los parámetros al programa, para poder simular la trayectoria del carbón, y con esto determinar la erosión ocasionada en las paredes de la tubería, se procede a comparar el comportamiento de los distintos datos ingresados.

Los datos ingresados por tramos a analizar corresponden a 7 distintos parámetros reales utilizados en los pulverizadores de AES Gener.

Entre los parámetros se puede encontrar 3 tipos distintos de mezclas:

- Mezcla aire/ carbón enriquecida: corresponde al tipo de mezclas con mayor cantidad de aire que de carbón
- Mezcla aire/ carbón empobrecida: mezclas con menor cantidad de aire que de carbón
- Mezcla óptima aire/carbón: mezcla que contiene una razón de 1,5 aire/ carbón, siendo la mezcla más óptima para un mejor rendimiento de combustión.

Analizando estos 3 diferentes tipos de mezclas, los resultados obtenidos fueron los siguientes:

- Ducto 2 D2-BP 10, pertenecientes a la segunda curva saliendo del pulverizador:

Tabla 17: Resultados de Tasa Erosión obtenidos, ducto 2D2-BP10

2D2-BP 10				
Carbón [Kg/s]	aire [kg/s]	razón aire/carbón [-]	Tasa erosión [Kg/m²-s]	Ventrada [m/s]
1,364	1,889967	1,39	6,44E-07	23,096
1,102	1,606472	1,46	4,6098E-07	18,173
1,137	1,75767	1,55	5,94E-07	20,64
1,142	1,82382	1,60	6,02E-07	21,801
1,168	1,927767	1,65	6,15E-07	23,48
1,042	1,81437	1,74	4,49E-07	21,601
0,978	1,889967	1,93	4,13E-07	22,957

La gráfica obtenida de los datos:

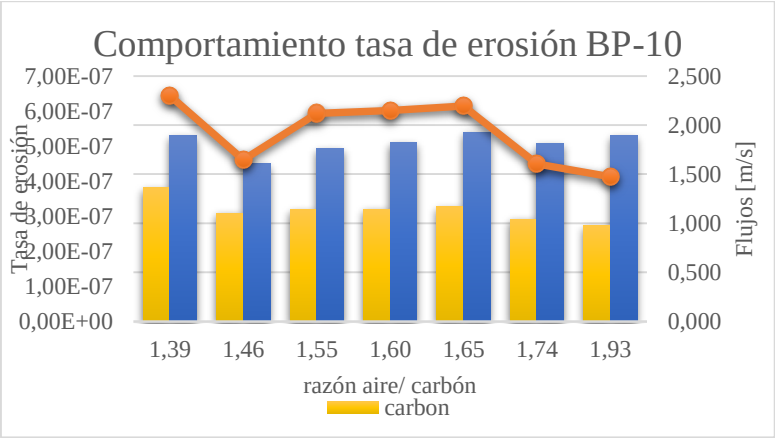


Gráfico 1: Gráfico de comportamiento según variables de la tasa de erosión, BP 10

Las gráficas de las tasas de erosión obtenidas, para los 3 tipos de mezclas, anteriormente mencionada, son las siguientes:

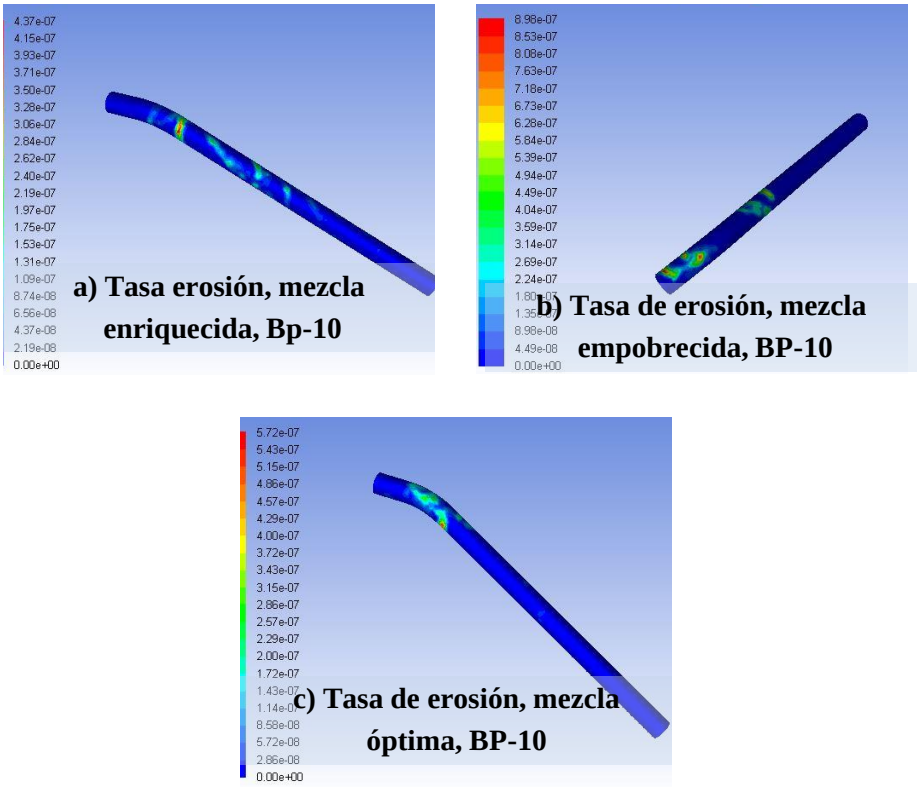


Ilustración 32 Tasas de erosión BP10: a) Mezcla enriquecida b) mezcla empobrecida c) mezcla óptima

- Ducto 2E4- BP 40, correspondiente a la segunda curva saliendo del pulverizador:

¿Tabla 18 Resultados de Tasa Erosión obtenidos, ducto 2E4-BP40

2E4 BP40				
carbón [kg/s]	aire [kg/s]	razón aire/carbón [-]	Tasa erosión [Kg/m²-s]	V.entrada [m/s]
1,206944	1,81437	1,50	5,7117E-07	17,61
1,173611	1,81437	1,55	4,6474E-07	17,7000
1,136805	1,79547	1,58	3,6647E-07	17,5
1,121527	1,81437	1,62	5,94E-07	17,7
1,064583	1,85217	1,74	3,6047E-07	18,07
0,938194	1,70097	1,81	3,3585E-07	16,53
0,970138	1,79547	1,85	3,5852E-07	17,5

Al graficar los datos obtenidos:

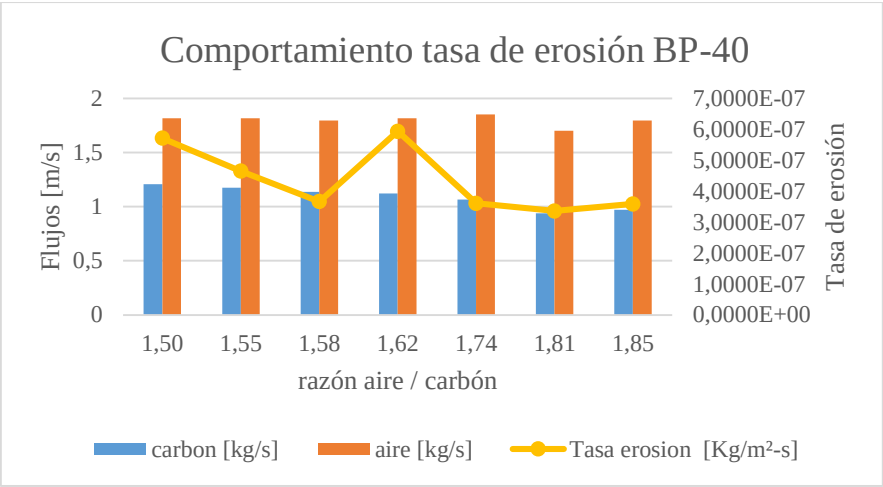
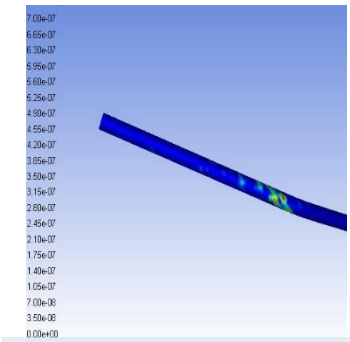
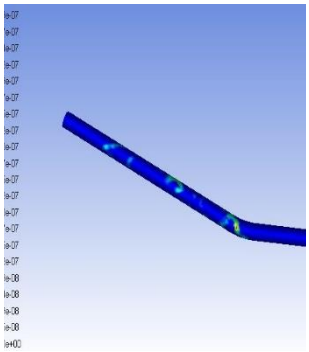


Gráfico 2 Gráfico de comportamiento según variables de la tasa de erosión, BP 40

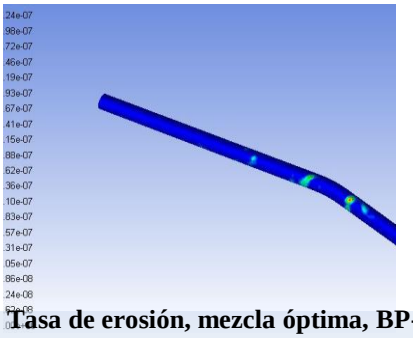
Las gráficas de las tasas de erosión obtenidas, para los 3 tipos de mezcla, son las siguientes:



a) Tasa de erosión mezcla enriquecida, BP-40



b) Tasa de erosión, mezcla empobrecida, BP-40



c) Tasa de erosión, mezcla óptima, BP-40

Ilustración 33 Tasas de erosión BP 40: a) Mezcla enriquecida b) Mezcla empobrecida c) Mezcla óptima

- Ducto 2G3-BP69, correspondiente a la primera y segunda curva saliendo del pulverizador

Tabla 19 Resultados de Tasa Erosión obtenidos, ducto 2G3-BP69

2 G3-BP 69				
carbón [kg/s]	aire [kg/s]	razón aire/carbón [-]	Tasa erosión [Kg/m²-s]	V.entrada [m/s]
1,2937	1,7746	1,37	6,96E-07	16,862
1,6715	2,4887	1,49	7,87E-07	23,64
1,313	1,9844	1,51	7,12E-07	18,85
1,157	1,7765	1,53	6,26E-07	16,88
1,2368	1,9655	1,59	6,82E-07	18,676
1,19583	1,9655	1,64	6,75E-07	18,67
1,07361	1,8143	1,69	5,74E-07	17,23

Al graficar los datos obtenidos:

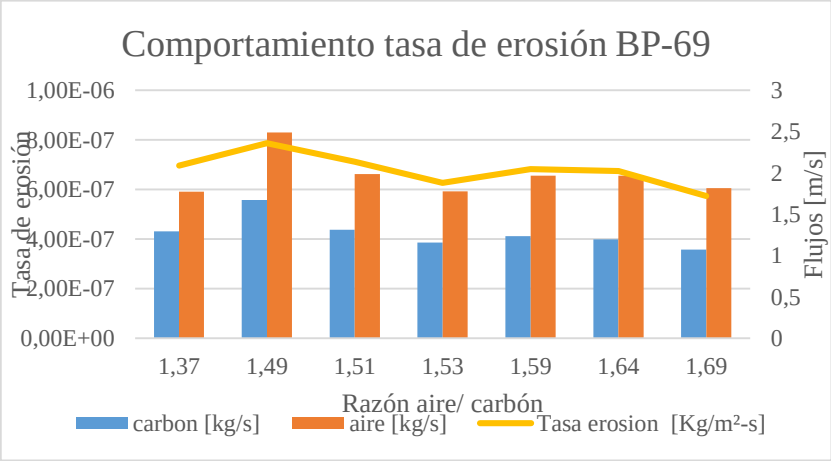


Gráfico 3 Gráfico de comportamiento según variables de la tasa de erosión, BP 69

Las gráficas de las tasas de erosión obtenidas, para los 3 tipos de mezcla, son las siguientes:

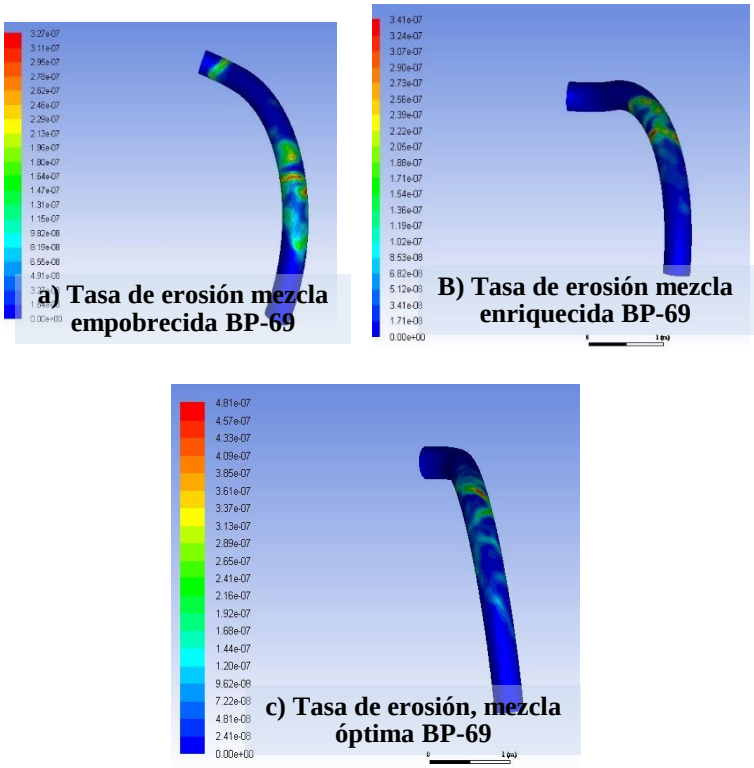


Ilustración 34 Tasas de erosión BP-69 a) Mezcla empobrecida b) Mezcla enriquecida c) Mezcla óptima

- Ductos 1 C23-BP 24/1 C3 BP20R, correspondientes a las primeras curvas saliendo de los pulverizadores 1C2 y 1C3

Tabla 20 Resultados de tasa de erosión obtenidos, ductos 1C2/3-BP24/20R

1C2-BP 24/ 1C3-BP20R				
carbón [kg/s]	aire [kg/s]	razón aire/carbón [-]	Tasa erosión [Kg/m²-s]	V.entrada [m/s]
1,828	2,722	1,49	7,83E-07	19,556
1,725	2,62037	1,52	7,53E-07	18,795
1,46944	2,28056	1,55	6,66E-07	16,358
1,5944	2,62075	1,64	6,73E-07	18,706
1,649	2,7778	1,68	7,18E-07	19,924

Al graficar los datos obtenidos:

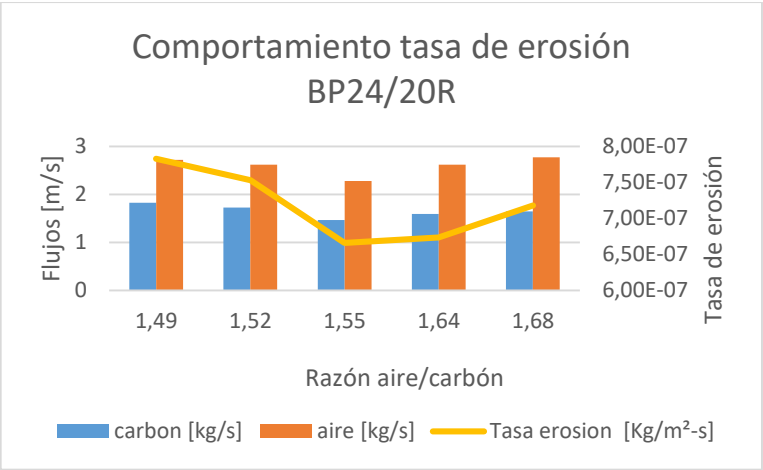


Gráfico 4 Gráfico de comportamiento según variables de la tasa de erosión, BP 24/20R

Las gráficas de erosión obtenidas, para los 3 tipos de mezclas, son las siguientes:

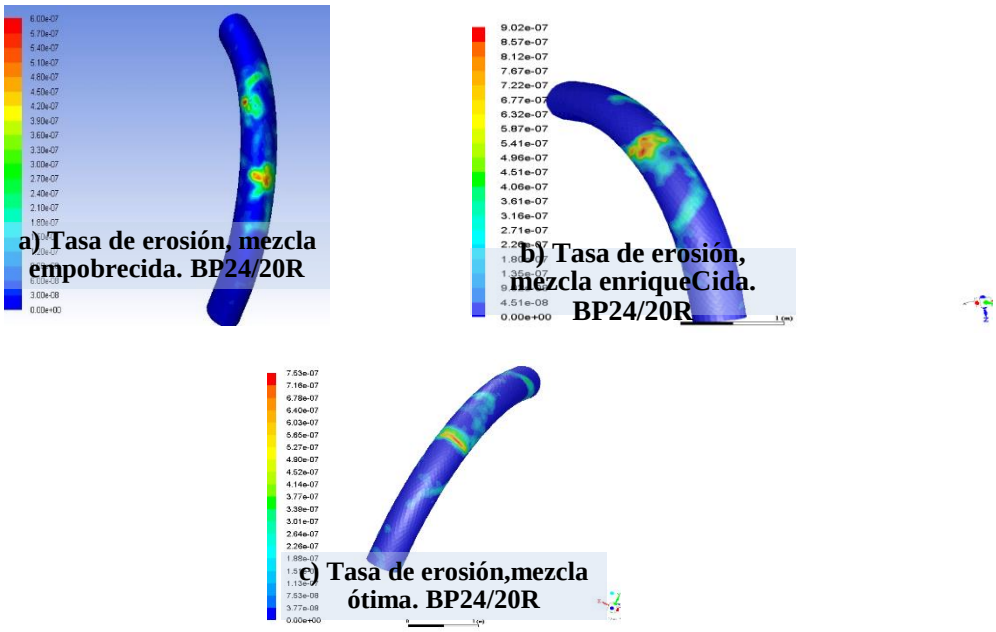


Ilustración 35 Tasas de erosión BP24/20R a) Mezcla empobrecida b) mezcla enriquecida c) mezcla óptima

8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez obtenido los resultados, se procede a analizar las variables más relevantes en las tasas de erosiones.

Primero, se observan los gráficos y tasas de erosiones obtenidas, y para los 4 ductos distintos se llega a la misma conclusión: Mientras más carbón contenga la mezcla aire/ carbón mayor es la tasa erosión y el lugar físico de erosionamiento es más amplio. Al contener más aire que carbón se nota una disminución en la tasa y mayor localización de erosión de pared y, por último, la razón 1,5 aire/ carbón demuestra, que si bien no es la menor tasa de erosión es menor el erosionamiento en la pared de la tubería de carbón. Caber recordar que, aunque la erosión en el óptimo de 1,5 aire/carbón no es la menor, este valor es el indicado para una buena eficiencia de combustión.

Por otro lado, de comparan las 4 configuraciones analizados respecto al ángulo de la geometría y su contenido de carbón:

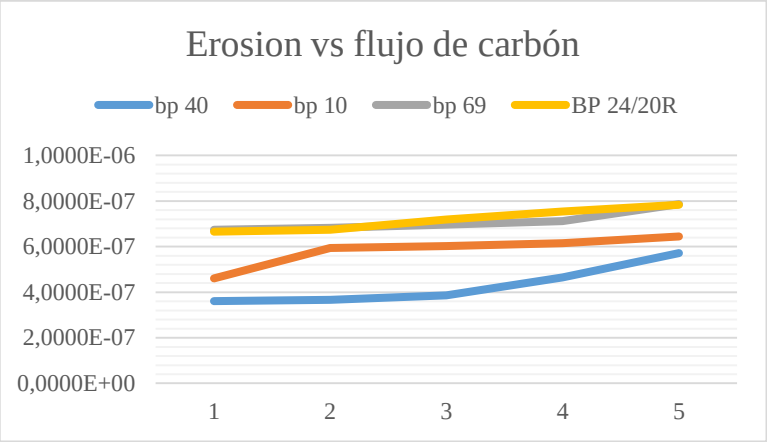


Gráfico 5: Gráfico comparativo tasa de erosión v/s flujo de carbón para los 4 distintos ductos analizados

Según los resultados obtenidos, las configuraciones de los ductos BP-69 y BP24/20R, ambos con un ángulo de 90°, contienen valores similares de tasa de erosión y arroga mayores erosiones, luego en segundo lugar se encuentra el ducto BP 10, con un ángulo de 122° y, por último, la erosión menor corresponde al ducto BP 40 con 115°

9. SOLUCIONES PROPUESTAS

Las soluciones que se propondrán en este trabajo de título son las siguientes:

- Elaboración de un plan de mantenimiento preventivo
- Mayor control de variables
- Cambio de material en zonas más críticas y con mayor tasa de erosión, ésta última obtenida por el programa CFD, Fluent

9.1. Plan de mantenimiento predictivo

Como se mencionó en el capítulo 5, actualmente no existe un plan de mantenimiento predictivo. El plan de mantención con el cual se actúa cuando hay una falla en los ductos de transporte de carbón se rige por lo correctivo, es decir, se actúa a la falla. Además, una vez al año se realiza una parada de planta para hacer las reparaciones correspondientes, ya sea parchar el tramo dañado o cambiarlo.

Al actuar a la falla se corre el riesgo de trabajar en un ambiente tóxico, con la fuga de carbón reparándola al momento, también trabajo extra al estar limpiado el carboncillo arrogado, dejar de hacer otros trabajos para reparar la falla en los ductos, entre otros problemas que se puedan ocasionar.

Por estas razones se ideó un plan de mantenimiento predictivo, el cual consiste en medir los espesores de pared de los codos y curvas de la red de tuberías de transporte de carbón, para así poder determinar el gasto de material de la pared del tubo y tomar una decisión: parchar el tramo si el espesor se encuentra en menos del 50% del espesor inicial, cambiar el ducto para la parada de planta realizada una vez por año.

El método usado para medir espesores de paredes, es mediante un instrumento de medición ultrasónico, Krautkramer DM4 y DM4 DL. Son medidores de espesores fáciles de usar, son adecuados para llevar a cabo mediciones del espesor de pared y del espesor remanente de pared, especialmente en componentes o piezas que son susceptibles a la corrosión y erosión.

Ilustración 36: Instrumento medición de espesores, Krautkramer familia DM4

Las características generales del instrumento son:

- Resolución digital de 0.01 mm para espesores de hasta 99.99 mm
- Resolución digital de 0.1 mm para espesores mayores a 99.99 mm
- Se puede realizar mediciones a través de recubrimientos.

Para operar el instrumento es necesario calibrarlo con la velocidad del ultrasonido en el material a medir y, que esta velocidad sea constante a lo largo del material. Además, hay que tener en consideración la temperatura a la cual se encuentra el material, ya que, bajo ciertas condiciones, puede causar errores considerables en le medición.

Para el caso de mediciones en superficies curvas, el transductor tiene que estar acoplado al centro de la superficie para que el haz sea radial cuando la superficie curva es convexa. La barrera acústica del transductor debe ser perpendicular al eje longitudinal del objeto inspeccionado.

Especificaciones técnicas:

- Principio de operación: Método ultrasónico pulso eco con transductores duales (transmisor/receptor)
- Unidades de medición: mm o pulgadas
- Rango de velocidad del ultrasonido: 1000-9999 m/s resolución 1 m/s)
  30,000-393,700 pulgadas/s
- Frecuencia para la medición: 25 Hz
- T° de operación: -10°C a +50°C

Los planes de mantenimiento creados, se basan en la medición de espesores de pared de los codos y curvas y algunos tramos rectos. La frecuencia de medición depende la criticidad del tramo.

Se deberán realizar 5 mediciones radiales y axiales, en el sentido del transporte de carbón, en donde el arco del ángulo debe estar situado en la zona crítica del ducto, tal como se muestra en la siguiente ilustración:

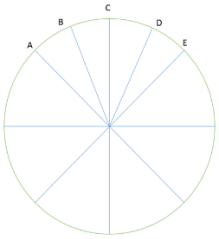


Ilustración 37 Diagrama de medición de espesores a lo largo del ducto

Las mediciones axiales se medirán, empezando a un metro antes del radio de curvatura inicial, y se medirá cada 300 mm en el sentido de flujo de carbón, hasta un metro después del radio de curvatura final, tal como se muestra en la siguiente figura:

Como ejemplo del plan de mantenimiento llevado a cabo:

Tabla 21 Ejemplo de plan de mantenimiento

PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO- V1-V2										
Ductos de transporte de carbón desde pulverizadores hasta quemadores			ANDAMIO		TÉCNICO		Material: Acero A53 Diámetro:Unidad 1:16” Diámetro Unidad 2: 14”			
crit	Frec	Unidad	HH	N° pers	HH	N° pers	Requiere reemplazo: < 50% espesor	Requiere parchar	Material sistema SAP	cantidad: soldadura/ tramo
A	1	AÑO	2	4	20 [min]	1				
B	2	AÑOS	2	4	20 [min]	1				
C	3	AÑOS	2	4	20 [min]	1				
D	4	AÑOS	2	4	20 [min]	1				

Los ductos correspondientes a cada criticidad se muestran a continuación:

- Criticidad A

Tabla 22 Criticidades A de componentes ductos de carbón, Unidad 1-2

Criticidad	Ductos	Descripción	Texto adicional
A	2 D1-BP 2	primera curva saliendo del pul.	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
A	2 D2-BP 10	Segunda curva saliendo del pul.	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
A	2 E4 -BP 100	primera curva saliendo del pul.	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
A	2 E4- BP 40	Segunda curva saliendo del pul.	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
A	2 G3- BP 69	primera y segunda curva saliendo del pul.	Tramo con dos curvas
A	1 A2- BP 10	última curva	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
A	1 C2- BP 24	primera curva saliendo pul	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
A	1 C3- BP 20 R	primera curva saliendo pul	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva

- Criticidad B

Tabla 23 Criticidades B de componentes ductos de carbón, Unidad 2

Criticidad	Ductos	Descripción	Texto adicional
B	2 D1- BP 1	primera curva saliendo del pul.	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	2 D2- BP 9	Primera curva saliendo del pul.	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	2 D1- BP 4	Tercera curva saliendo del pul.	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	2 D1- BP 6	Última curva	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	2 D2- BP 11	tercera curva saliendo del pul.	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	2 D3- BP 16	Segunda curva saliendo del pul.	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	2 D3-BP 17	tercera curva saliendo del pul.	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	2 D3-BP 13	Última curva	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	2 E1- BP 24	Segunda curva saliendo del pul.	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	2 E2- BP 29	Segunda curva saliendo del pul.	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	2 E2- BP 31	tercera curva saliendo del pul.	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	2 E2- BP 33	Última curva	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	2 E3- BP 36	Segunda curva saliendo del pul.	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	2 E3- BP 37	tercera curva saliendo del pul.	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	2 E3- BP 33	Última curva	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	2 E4- BP 41	tercera curva saliendo del pul.	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	2 E4- BP- 42	Última curva	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	2 E4-BP 39	Primer tramo recto saliendo pul.	tramo de 4' realizar 2 mediciones
B	2 F1-BP 44	Segunda curva saliendo del pul.	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	2 F1- BP 45	tercera curva saliendo del pul.	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	2 F1- BP 46	Última curva	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	2 F2- BP 58	Segunda curva saliendo del pul.	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	2 F2- BP 97	tercera curva saliendo del pul.	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	2 F2- BP 60-61	Últimas dos curvas llegando quemador	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva

B	2 F3- BP 98	Segunda curva saliendo del pul.	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	2 F3- BP 103	Última curva	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	2 F4- BP 49	primera curva saliendo del pul.	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	2 F4-BP 50	Segunda curva saliendo del pul.	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	2 F4- BP 51	tercera curva saliendo del pul.	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	2 F4- BP 104	Última curva	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	2 G1- BP 53	Segunda curva saliendo del pul.	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	2 G1- BP 54	Última curva	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	2 G3-BP 75	Última curva	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	2 G4- BP 99	primera curva saliendo del pul.	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	2 G4-BP 71	Segunda curva saliendo del pul.	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	2 G4-BP 81	Última curva	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	2 H1- BP 73	primera curva saliendo del pul.	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	2 H1- BP74	Segunda curva saliendo del pul.	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	2 H1- BP 76	tercera curva saliendo del pul.	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	2 H1- BP 77	Última curva	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	2 H2-BP 83	primera curva saliendo del pul.	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	2 H2 BP 82	Segunda curva saliendo del pul.	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	2 H2 BP 80	tercera curva saliendo del pul.	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	2 H3- BP 85	Segunda curva saliendo del pul.	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	2 H3- BP 86	tercera curva saliendo del pul.	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	2 H3- BP 95	Última curva	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	2 H4- BP 93	Segunda curva saliendo del pul.	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	2 H4- BP 91	tercera curva saliendo del pul.	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva

Tabla 24 Criticidades B de componentes ductos de carbón, Unidad 1

Criticidad	Ductos	Descripciones	Texto adicional
B	1 A1 BP 2	segunda curva saliendo pul	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	1 A1- BP 5	última curva	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	1 A2- BP 7	primera curva saliendo pul	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	1 A2-BP 8	segunda curva saliendo pul	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	1 A3- BP1L	primera y segunda curva saliendo pul	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	1 A3-BP 11	tercera curva saliendo pul	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	1B1-BP 14	última curva	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	1 B3- BP 4	segunda curva saliendo pul	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	1 C1- BP 20L	primera curva saliendo pul	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	1 C1- BP 21	segunda curva saliendo pul	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	1 C2-BP 23	segunda curva saliendo pul	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	1 C2- BP 26	última curva	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
B	1 C3-BP18	segunda curva saliendo pul	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva

- Criticidad C

Tabla 25 Criticidad C de componentes ductos de carbón, Unidad 2

Criticidad	Ductos	Descripción	Texto adicional
C	2 D2- BP 13	Última curva	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
C	2 D3- BP 15	primera curva saliendo del pul.	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
C	2 D4- BP 18	primera curva saliendo del pul.	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
C	2 D4- BP 6	Última curva	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
C	2 E1- BP 23	Primera curva saliendo del pul	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
C	2 E1-BP 25	Última curva	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
C	2 E2- BP 28	primera curva saliendo del pul.	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
C	2 E3- BP 35	primera curva saliendo del pul.	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
C	2 F1- BP 43	primera curva saliendo del pul.	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
C	2 F2- BP 57	primera curva saliendo del pul.	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
C	2 F2- BP 3	Tramo recto saliendo de la 2da curva	3'4 de la 2da curva, tramo de 8'. Realizar 3 mediciones
C	2 F3- BP 59	primera curva saliendo del pul.	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
C	2 F4- BP 3	Tramo recto saliendo de la 2da curva	6' de la 2da curva, tramo de 8'. Realizar 3 mediciones
C	2 G1- BP 52	primera curva saliendo del pul.	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
C	2 G2- BP 64	primera curva saliendo del pul.	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
C	2 G2-BP 68	Última curva	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
C	2 G3- BP 3	Tramo recto saliendo de la 1 era curva	23" de la 2da curva, tramo de 8' realizar 3 mediciones
C	2 H1- BP 3	tramos rectos saliendo 2da curva	8' de la 2da curva, tramo de 8' realizar 3 mediciones
C	2 H2 BP 78	Última curva	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
C	2 H2 BP 3	Tramo recto saliendo 2da curva	8' de la 2da curva, tramo de 8' realizar 3 mediciones
C	2 H3- BP 84	primera curva saliendo del pul.	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
C	2 H4- BP94	primera curva saliendo del pul.	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
C	2 H4- BP 89	Última curva	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
C	2 H4- BP 90-92	Tramos rectos entre 2da y 3 era curva	17' 7 de la 2da curva. Tramo total de 5'. Realizar 3 mediciones

Tabla 26 Criticidad C de componentes ductos de carbón, Unidad 1

Criticidad	Ductos	Descripciones	Texto adicional
C	1 A1-BP 1R	primera curva saliendo pul	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
C	1 A2- BP 17	tercera curva saliendo pul	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
C	1 A3-BP 5	última curva	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
C	1 B1 -BP 12	primera curva saliendo pul	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
C	1 B1-BP 4	segunda curva saliendo pul	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
C	1 B2-BP 18	primera curva saliendo pul	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
C	1 B3-BP 19	primera curva saliendo pul	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
C	1 C1-BP 22	última curva	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
D	2 D4- BP 19	Segunda curva saliendo del pul.	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
D	2 D4- BP20	tercera curva saliendo del pul.	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
D	2 E2-BP 30	Tramo recto saliendo de la 2da curva	2’ de la 2da curva tramo de 11' realizar 3 mediciones en tramos equivalentes
D	2 E3- 3	Tramo recto saliendo de la 2da curva	3'8 de la 2da curva, tramos de 8' realizar 3 mediciones en tramos equivalentes
D	2 F3- BP 60	tercera curva saliendo del pul.	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
D	1 A1- BP 4	tercera curva saliendo pul	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
D	1 A3- BP 4	cuarta curva saliendo pul	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
D	1 B2-BP 4	segunda curva saliendo pul	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
D	1 B2-BP 16	última curva	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
D	1 B3- BP 14	última curva	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva
D	1 C3-BP 27	última curva	5 mediciones axiales y radiales a lo largo de la curva

9.2. Variables que influyen en la erosión.

Una vez obtenidos los resultados ya se saben las variables que influyen en el aumento o disminución de las tasas de erosión. Aunque, si bien, no se pueden hacer cambios en las configuraciones geométricas de los ductos de transporte, ya que los resultados fueron que ángulos de 90° favorecían a la erosión, mientras que más obtuso sea el ángulo, menor es la erosión. Sí se puede tener un mayor control de las variables, tanto de aire como de carbón que entran al pulverizador. Actualmente las válvulas de entrada de aire y carbón se abren y cierran manualmente, dificultando el proceso de obtener el óptimo de mezcla aire/carbón.

Por ejemplo, para el ducto BP- 10 la diferencia de erosión entre el máximo y el óptimo es de 7,7% de aumento de erosión. Para el ducto BP-40 es de 18,63% de aumento. Y para el ducto BP-69 el aumento es de un 10%. Y para el caso de la Unidad 1, los ductos BP-24 y BP-20R la disminución de erosión corresponde a un 18%.

Estas diferencias en la erosión se podrían disminuir accionando automáticamente las válvulas para tener un control preciso de la cantidad de aire y carbón que entren al pulverizador.

9.3. Propuesta de mejora

Como propuesta final en este trabajo de título se estudiará la posibilidad de disminuir la tasa de erosión que afecta a los ductos de transporte. Como ya se mencionó, el material con el cual están diseñados éstos ductos no es el más propicio para soportar la tasa de carbón pulverizado que circulan por ellos, por lo cual es necesario una mejora.

Para ser factible la disminución en la tasa de erosión se analizará la opción de implementación de un recubrimiento interior, resistente al desgaste y a la abrasión, a los ductos de mayor criticidad.

Los recubrimientos en general, son depósitos de materiales de alta dureza, aplicados sobre una superficie con el fin de reducir el desgaste abrasivo.

Se eligió un recubrimiento ya que es de fácil aplicación y, al estar identificadas las zonas que más afecta la erosión, con los tramos estudiados en el programa CFD, no se asociará un gasto innecesario en recubrir toda el área interna que abarca la longitud total del tramo.

Para la aplicación del recubrimiento será necesario implementar un arreglo en la estructura de la tubería, que consistiría en hacer un corte en el área a recubrir y luego con uniones flangeadas volver a unir los componentes. Este arreglo servirá para desmontar el área para futuros arreglos sin operaciones destructivas.

La opción de recubrimiento seleccionada, dadas las características operacionales del sistema, tiene las siguientes características:

1. Pasta polimérica que protege de abrasiones agresivas. Compuesto polimérico con dureza Shore de 86

La dureza del componente es una variable importante que nos permite asociar la tasa de erosión calculada en el programa CFD con el material de la tubería y así obtener una razón de erosión de mejora

Ahora según las ecuaciones 3.5.1.3.1, 3.5.1.3.2, 3.5.1.3.3 y 3.5.1.3.4 se puede reemplazar las variables para incorporar la dureza del material de pared, lo que no da una tasa nueva de erosión de:

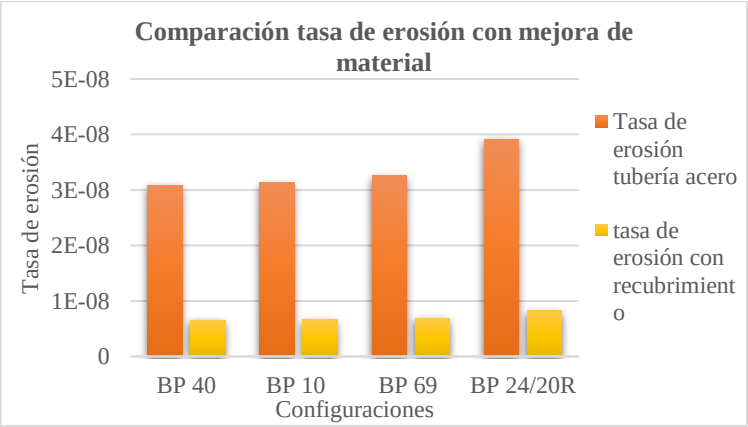


Gráfico 6: Disminución tasa de erosión con aplicación de mejora de material en las distintas configuraciones

Por lo tanto, al recubrir con la pasta polimérica, el porcentaje de disminución de erosión sería de un 269% lo que quiere decir, que, si antes estos ductos críticos se tenían que cambiar cada dos años, con esta mejora se cambiarían cada 8 años.

El recubrimiento se realizará a lo largo de toda la curva y a la mitad superior del tubo circunferencial, de los ductos con criticidad A, los que corresponden a los siguientes tramos:

- Unidad 2: 2D2 BP10-2 E4 BP40-2G3 BP69-2D1 BP2- 2E4 BP100
- Unidad 1: 1C2 BP24-1C3 BP20R-1A2 BP10

Los que en total cubren una superficie que requiere recubrimiento de aproximadamente: 20 m².

La aplicación del recubrimiento se realizará en la mantención correspondiente a la Unidades estudiadas.

9.3.1. Otras soluciones existentes en el mercado

En otras plantas termoeléctricas que funcionan a base de carbón, con características similares a las estudiadas en éste trabajo de título, no todas presentan en mismo problema de abrasión constante en el transporte de carbón, esto se da porque las configuraciones de las redes de tuberías, las velocidades de transporte, la calidad del carbón, material de la tubería, entre otras, difieren entre ellas proporcionando estas variables distintos niveles de abrasión y erosión.

Existen variadas opciones en el mercado para alargar la vida útil de tuberías expuestas a la abrasión. Algunas soluciones aplicadas en plantas termoeléctricas de similares características son las siguientes:

- Codo de desvío: previene la falla del codo al evitar el impacto del material mediante una cámara esférica que sobresale parcialmente permitiendo el desvío del material entrante alrededor a la curva sin golpear la pared del codo, evitando así la tasa de desgaste que impactaría en la curvatura.

-

Ilustración 38 Codo de desvío

- Materiales resistentes a la abrasión en codos y curvas: Otra opción implementada es la utilización de un material anti abrasivo de mayor dureza en las zonas más vulnerables al desgaste.
- Recubrimientos: El uso de recubrimientos aplicados al interior de la tubería tiene el mismo propósito que el punto anterior, con la diferencia que no es necesario el cambio completo de la tubería, sino, una mejora en el material origen de la tubería con el propósito de disminuir la tasa de desgaste.

La solución elegida para ser aplicada en este proyecto, como ya se mencionó, es el recubrimiento. Está opción fue elegida debido a que ya se conocen los puntos de mayor tasa de erosión por lo que se consideró la más adecuada.

9.3.2. Análisis económico, mejora de material

Una vez realizada la propuesta de mejora de material, es necesario estudiar si es factible económicamente, por lo cual es necesario confeccionar un análisis económico.

Dado que la criticidad en los ductos de transporte de carbón es calculada mediante la fórmula de frecuencia por consecuencia, el factor más influyente es la frecuencia de reparación. La consecuencia no tanto así, ya que como se ha mencionado, los ductos transportadores es un medio comunicante entre el pulverizador y los quemadores que van hacia el hogar de la caldera, al haber una rotura en los ductos ningún equipo es

detenido y un pequeño flujo de carbón pulverizado es liberando al ambiente, lo cual no afecta de gran manera el combustible necesario para la generación de energía.

Por lo tanto, el análisis económico se realizará comparando el ahorro con la inversión:

- Inversión reparación ductos de carbón año 2017: 150.000 USD
- Inversión con propuesta de mejora: 110.459 USD

Los indicadores económicos a 8 años, que es lo que duraría el ducto con la mejora, son:

Tabla 27 Flujo de caja

	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Ahorro		50.551	50.551	50.551	50.551	50.551	50.551	50.551	50.551
Valor Residual									
Inversion	- 110.459								
Flujo Neto	- 110.459	50.551	50.551	50.551	50.551	50.551	50.551	50.551	50.551
F. Act Acu		- 64.504	- 22.726	15.253	49.780	81.168	109.703	135.644	159.226

Tabla 28 Indicadores económicos

VAN	159.226
TIR	43,2%
Payback	3 años

Obtenido un ahorro de 50.551 USD

10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este estudio y análisis permitieron establecer los parámetros que afectan la erosión en los ductos de transporte de carbón pulverizado, en la planta termoeléctrica AES Gener, logrando determinar las siguientes conclusiones:

En primer lugar, se recomienda la implementación de un plan de mantenimiento preventivo, lo cual, si bien no mejora el problema de la erosión, actúa antes de la falla para evitar los riesgos asociados a una ruptura de ductos.

Por otro lado, se determinó que las variables más importantes en la tasa de erosión y el desgaste sufrido en las tuberías corresponde al flujo de carbón transportado, al tener el carbón pulverizado una dureza mayor al material de la tubería. La dureza del carbón, ni su transporte se puede mejorar ya que son parámetros necesarios para una buena combustión. Pero si se recomienda llevar un mayor control de los flujos de aire-carbón transportados, con esta medida se puede reducir la erosión entre un 7,7% y 18,63%. Además, otra variable influyente en una mayor tasa de erosión es la geometría de la curva, siendo un ángulo de 90° un 80% más alta la tasa de erosión con respecto al ángulo más obtuso analizado. Por lo tanto, mientas más obtuso sea el ángulo menor es la tasa de erosión.

Por último, se concluyó que el material con el cual están fabricados las tuberías de transporte de carbón no es el más adecuado. Para evitar los problemas de erosión se recomienda mejorar el material de tubería que presenten una mayor criticidad, en las zonas de mayor erosión que corresponden, según análisis efectuado en el programa CFD, a zonas de cambio de dirección en los codos y curvas de tuberías. Con este cambio y mejora de material propuesto se obtiene un ahorro monetario de 50.551 USD, versus el cambio de ductos completos implementado en el 2017. Considerando el resultado obtenido en la evaluación económica, se puede concluir que la opción de cambio y mejora de material, con una vida útil de 8-9 años, resulta rentable al obtener un valor actual neto (VAN) de 159.226 USD y una tasa interna de retorno (TIR) de 43,2% mayor a la tasa de descuentos del 10% aplicada y recuperando la inversión inicial al 3er año de implementación.

11. BIBLIOGRAFÍA

[1] Universidad de Vallidolid 82015). www.eis.uva.es/energíasostenible

[2] Key World Energy Stadistics IES (2016). http://datos.energiaabierta.cl/dataviews/111638/bne-2014-consumo-bruto-energia-primaria/

[3] Balance Nacional de Energía (2005), Ministerio de Energía. Capt 1. Pag [29-54]

[4] Yunus Cengel (2006).Termodinámica (3er Ed.) Mc Graw Hill.

[5] Rosales (2017).Equipo de procesos térmicos. Combustibles Sólidos- carbón

[6] Wood, W. D. (2014, November). El uso del carbón pulverizado y el porvenir de la provisión de combustible en Chile. In *Anales del Instituto de Ingenieros de Chile* (No. 5, pp. Pág-234).

[7] Voloshyna, Y. (2015). Estudio del carbón y su homogeneización mediante análisis de sensibilidad para menor afección en la central térmica.

[8] "ASTM D-408" Grindability of Coal by Bal- Mill Method (Withdrawn 1950)

[9] Francisco Cabrejos (2013). Transporte Neumático (1° Ed). Editorial USM

[10] Irving H.Shames (1995). Mecánica de Fluidos (3era Ed.) Mc Graw Hill

[11] Robert H. Perry, 7th edition.Perry´s Chemical Engineers´handbook

[12] Pneumatic Conveyng Design Guide, 2da Editon

[13] Bayer, Raymond G. (2002). *Wear Analysis for Engineer*. New York: United States- HBN Publishing

[14] ASTM, A. (2013). Standard Terminology Relating to Wear and Erosion. G40.

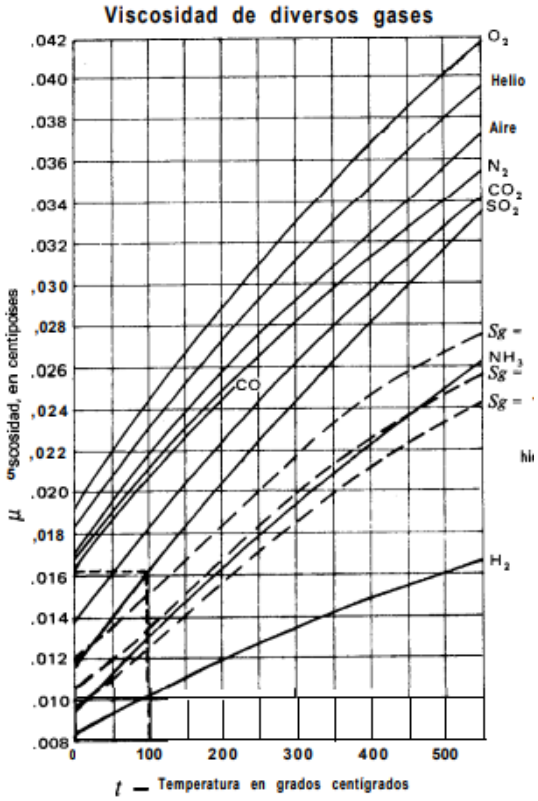
[15] Clayton A. Erikson. Coal pip erosion Predictions,

[16] Ansys Inc. (2010) ANSYS CFD- Solver. *Modeling guide*

[17] ISO, N. T. C. N. 3100. (2011). Gestión del Riesgo, Principios y Directrices.

12. Anexo A

Viscosidad [crane]



Ley de Sutherland: $\mu = \mu_o \left[\frac{T_o+C}{T+C}\right] \left[\frac{T}{T_o}\right]^{3/2}$

Donde,

μ= viscosidad a la temperatura T que se desea, [centipoises]

μ_o = viscosidad a la temperatura conocida T_o, [centipoises]

T= temperatura para la cual se requiere conocer μ, [°K]

T_o= temperatura para la que se conoce la viscosidad, [°K]

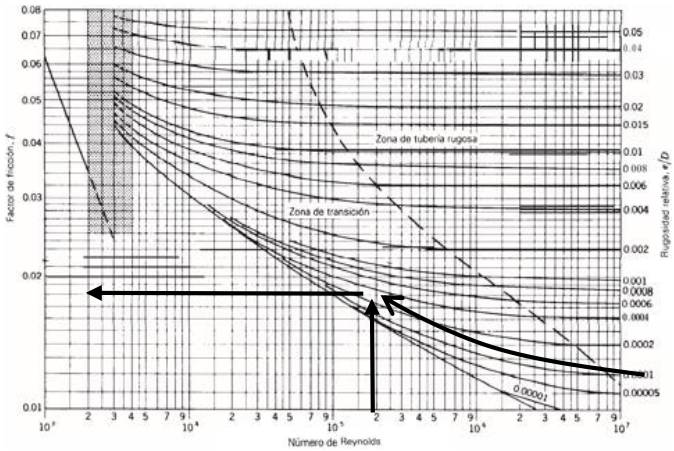
C= constante de Sutherland

C= 120 [°K] para el aire

13. Anexo B

Diagrama de MOODY

Para entrar al diagrama de Moody se necesita conocer la rugosidad del material sobre el diámetro de tubería. La rugosidad del acero que saca por tabla, siendo de un valor de 0,046 [mm]



Rugosidad promedio de tubos comerciales

Material (nuevo)	e pies	
Vidrio		0.0003
Tubería es tirada		0.001s
Acero, hierro forjado		0.046
Hierro fundido asfaltado	0.0004	0.12
Hierro galvanizado	0.0005	0.15
Hierro fundido	0.00085	0.26
Maderacepillada	0.0006-0.003	0.18-0.9
Acororemachado	0.003-0.03	(),9-9.()

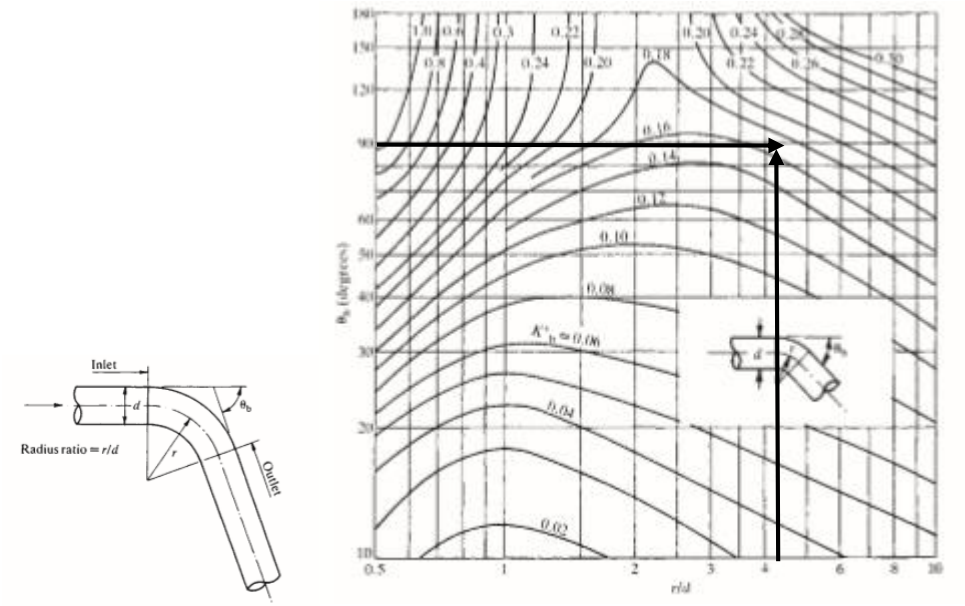
$\frac{\varepsilon}{D} \approx 0.00013$, para el caso de la Unidad 2

$\frac{\varepsilon}{D} \approx 0.00011$, para el caso de la Unidad 1

Luego con el N° de Reynolds y rugosidad se obtiene el valor del factor de fricción.

14. Anexo C

Pérdidas en codos y curvas



Por ejemplo, en la Unidad 2, entrando con r/D = 4,28 y tomando un codo de 90° se obtiene una intersección cercana a la curva de k=0,16

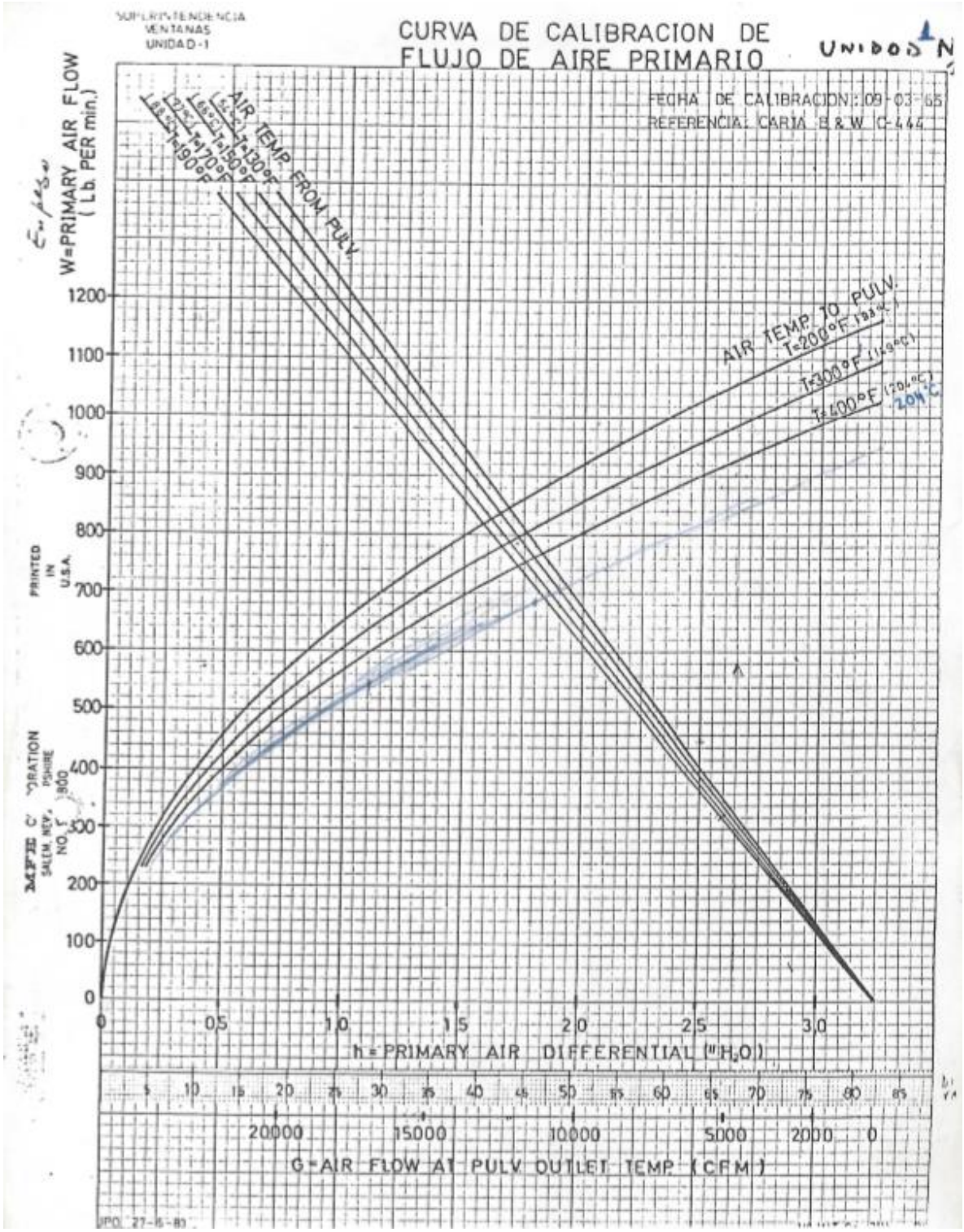
Pérdidas en válvulas

Válvulas presentes en la tubería: Válvula compuerta, válvula check disco y válvula contraflujo

Type of fitting or valve	Additional friction loss, equivalent no. of velocity heads, *K*
Globe valve,[e,m]	
Bevel seat, open	6.0
½ open[a]	9.5
Composition seat, open	6.0
½ open[a]	8.5
Plug disk, open	9.0
¾ open[a]	13.0
½ open[a]	36.0
¼ open[a]	112.0
Angle valve,[b,e] open	2.0
Y or blowoff valve,[b,m] open	3.0
Plug cock[p]	
θ = 5°	0.05
θ = 10°	0.29
θ = 20°	1.56
θ = 40°	17.3
θ = 60°	206.0
Butterfly valve[p]	
θ = 5°	0.24
θ = 10°	0.52
θ = 20°	1.54
θ = 40°	10.8
θ = 60°	118.0
Check valve,[b,e,m] swing	2.0[g]
Disk	10.0[g]
Ball	70.0[g]

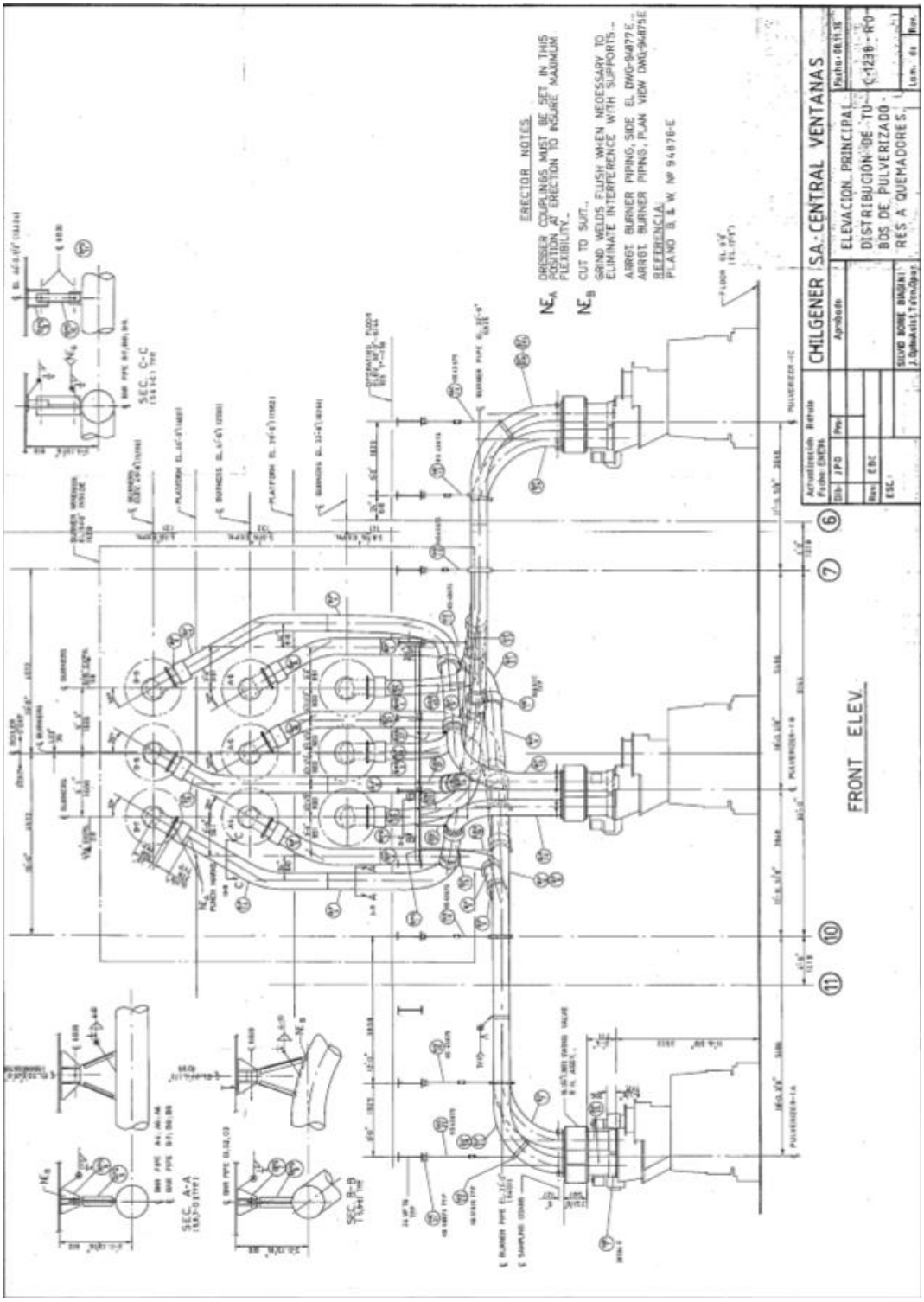
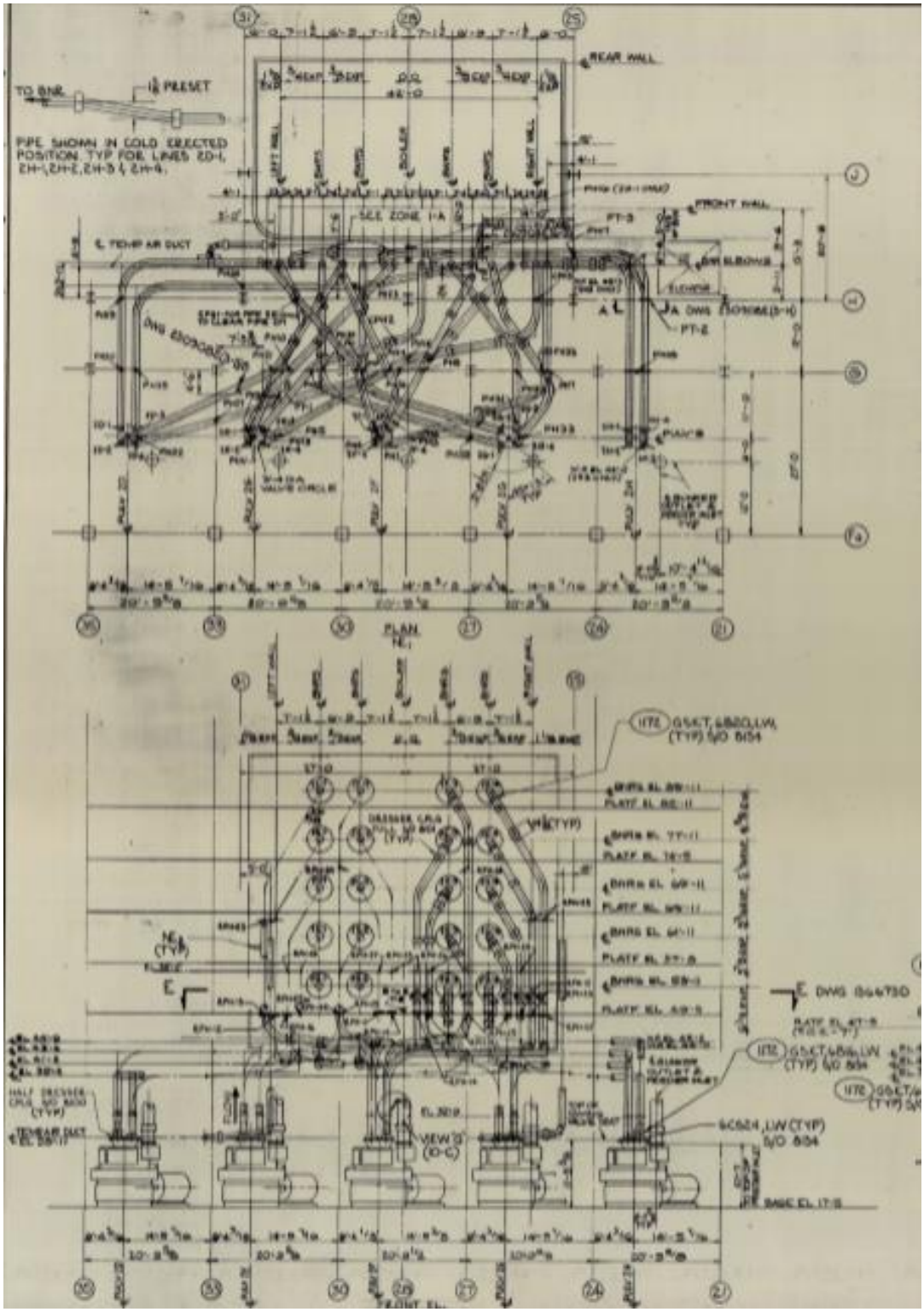
15. ANEXO D

Curva de calibración de flujo de aire primario



16. Anexo E

Plano Unidad 1



Plano Unidad 2