

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA



PROYECTO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL QUÍMICO

AUMENTO DE PRODUCCIÓN EN PLANTA DE OXIGENO N°3, FUNDICIÓN CALETONES

Felipe Oróstica Olivares

Profesor Guía:
Jaime Fernández Celis

2013

Resumen

La Fundición Caletones, perteneciente a Codelco – Chile División El Teniente está desarrollando una serie de Proyectos cuya finalidad es aumentar su producción, mediante la modernización de sus unidades productivas, el cambio de algunos de sus equipos, y la realización de las reparaciones o modificaciones que los estudios de Proyecto determinen.

Uno de los aspectos que cobra importancia para conseguir el referido aumento de producción es la disponibilidad de O_2 gaseoso, que es uno de los componentes fundamentales en el proceso de fusión del concentrado de cobre.

Debido a lo anterior, se analizó la factibilidad de aumentar la producción de oxígeno gas en la Planta de Oxígeno número 3 de la Fundición Caletones. Dicha Planta posee una producción nominal de 800 toneladas / día, las que en el escenario de aumento de producción serían claramente insuficientes, dado que para la producción de cobre que se requiere, se necesitaría una producción de 1200 a 1300 toneladas/día de oxígeno.

Tomando en consideración esto, se realizó un análisis de los equipos, tanto en forma química, como mecánica, para poder determinar, si podrían funcionar con los cambios en la cantidad de aire de entrada, además, de un análisis a las tuberías asociadas a la Planta.

Para el análisis cuantitativo de los equipos de la planta, se tomó en consideración las condiciones ambientales a las cuales está expuesta, las cuales son: temperatura ambiente, calidad, humedad e impurezas del aire y temperatura del agua de enfriamiento.

Lo cual concluyo que la mejor alternativa para poder trabajar con la planta en las estaciones de primavera verano, era comprar equipos de transferencia de calor antes del ingreso a la sala de compresores, ya que estos disminuirían la temperatura logrando una mayor producción de oxígeno gas, para ello se deben comprar cuatro intercambiadores de placa, los cuales tienen un costo asociado de 7.300 euros, lo que significa que el costo total por esta innovación en la planta sería de 31.651 euros, esta inversión se recuperara alrededor de 2 años, lo cual generara un aumento de producción de 3.847 NM³/hora de oxígeno gas.

Lo que implica que la planta estaría llegando a las 1100 toneladas por día de oxígeno gaseoso.

Índice

Capítulo 1:

1. Breve Descripción del Proceso de la Fundición	2
--	---

Capítulo 2:

2. Introducción	5
2.1 Descripción del proceso de la Planta de Oxígeno número 3.....	7
2.1.1 El proceso de Obtención de oxígeno cuenta de 5 etapas:	7
2.2 Proceso de Compresión	8
2.2.1 Compresores.....	8
2.2.2 Intercambiador de tubo y carcasa C01.1E1/2.....	9
2.2.3 Torre de Enfriamiento E62.....	9
2.2.4 Bombas P62-1/2/3.....	10
2.2.5 Circuito Cerrado.....	10
2.2.6 Bombas P63-1/2/3.....	10
2.2.7 B60.....	10
2.2.8 Intercambiadores de placas E63-1/2/3	10
2.2.9 Proceso de Sub-Enfriado (E07.1/2).....	11
2.3 Proceso de Adsorción o Purificación total del aire	12
2.4 Proceso de Enfriamiento	13
2.5 Proceso de Licuación.....	14
2.5.1 Columna de Media Presión (K01; 6,1 bar)	14
2.5.2 Columna de Baja Presión (K02; 1,8 bar)	15
2.5.3 Columna de Mezclado (K04; 6,1 bar)	15
2.6 Resumen general del proceso de producción de oxígeno gaseoso (GOX)	17
2.7 Esquema de la Planta de Oxígeno	19

Capítulo 3:

3. Marco Teórico.....	21
-----------------------	----

Capítulo 4:

4. Situación Actual de la Planta de Oxígeno número 3 de la Fundición Caletones, División el Teniente.....	29
4.1 Filtros	29
4.2 Compresor	29
4.2.3 C01.1E1	32
4.2.4 C01.1E2	32
4.2.5 C01.1E3	33
4.2.6 E07.1	34
4.2.7 E07.2	34
4.3 Adsorción (Tamices R01 y R02)	35
4.4 Calefactores (E08).....	36
4.5 Turbocompresores	38
4.5.1 Compresor D01C.....	38
4.5.2 Turbina D01.....	39
4.6 Caja Fría.....	39
4.6.1 Sinóptico caja fría.....	40
4.7 Objetivo	43
4.8 Objetivos Específicos.....	43

Capítulo 5:

5. Análisis de la Planta de Oxígeno N°3	45
5.2 Desarrollo de los equipos de la Planta de Oxígeno Numero 3 con la nueva carga (130.000 Nm ³ /hr de aire seco).....	45
5.2.1 Filtros.....	46
5.2.2 Compresores.....	47
5.2.2.1 Etapa 1.....	49
5.2.2.2 Etapa 2.....	52
5.2.2.3 Etapa 3.....	52
5.2.3 Enfriadores Inter etapa y enfriador post compresor.....	52
5.2.3.1 C01.1E1	53
5.2.3.2 C01.1E2.....	53
5.2.3.3 C01.1E3.....	54
5.2.3.4 E07.1	55

5.2.3.5 E07.2.....	55
5.2.4 Tamices.....	56
5.2.5 Turbocompresores	59
5.2.5.1 Compresor.....	59
5.2.5.2 Turbina.....	60
5.3 Caja Fría.....	62
Columnas de destilación	64
Columna de Media Presión	64
Columna de Baja Presión	68

Capítulo 6:

6. Modificaciones.....	72
6.1 Calculo de los intercambiadores de placas	73
6.1.1 Aire:	77
6.1.2 Agua:	78
6.2 Calculo de las caídas de presión por ambos lados:.....	79
6.2.1 Aire.....	79
6.2.2 Agua:	80

Capítulo 7:

7. Conclusión	82
Bibliografía.....	85
Glosario de Términos	86

Anexos:

Anexos	89
Anexo 1	89
Anexo 2	89
Anexo 3	90

Anexo 4	91
Anexo 5 Tabla de Robitszch's	92
Anexo 6	93
Anexo 7	97
Anexo 8.....	98
Constantes Usadas:.....	99
Intercambiador de Placas	100
Caída de presión	101
Anexo 9.....	103
Columna de Media Presión.....	103
Columna de Baja Presión	110

Índice de Tablas

Capítulo 4:

Tabla 4. 1	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 4. 2	32

Tabla 4. 3	33
Tabla 4. 4	33
Tabla 4. 5	34
Tabla 4. 6	34
Tabla 4. 7	36
Tabla 4. 8	36
Tabla 4. 9	37
Tabla 4. 10	41
Tabla 4. 11	42
Tabla 4. 12	43

Capítulo 5:

Tabla 5. 1	45
Tabla 5. 2	45
Tabla 5. 3	46
Tabla 5. 4	47
Tabla 5. 5	50
Tabla 5. 6	50
Tabla 5. 7	51
Tabla 5. 8	51
Tabla 5. 9	52
Tabla 5. 10	52
Tabla 5. 11	52
Tabla 5. 12	53
Tabla 5. 13	53
Tabla 5. 14	54
Tabla 5. 15	54

Tabla 5. 16	55
Tabla 5. 17	55
Tabla 5. 18	56
Tabla 5. 19	57
Tabla 5. 20	58
Tabla 5. 21	59
Tabla 5. 22	60
Tabla 5. 23	62
Tabla 5. 24	63
Tabla 5. 25	63

Capítulo 1: Descripción del Proceso de la Fundición

1. Breve Descripción del Proceso de la Fundición

La División El Teniente cuenta con tres procesos fundamentales para la obtención de cobre metálico, los cuales son: Mina, Concentrador y Fundición, las cuales operan con la ayuda de unidades anexas a ellas, Recursos Hídricos, Energía Eléctrica, Comunicaciones, Aseo Industrial, Prevencionistas de Riesgo, Mantenimiento de Equipos, Manejos de Escorias, etc.

El Proceso de producción de cobre, comienza con la extracción del mineral, en su forma natural; este mineral contiene alrededor de un 0,9 a 1,3% de cobre.

Luego de su extracción, el mineral es enviado a una chancadora primaria, la cual se encarga de realizar un proceso de molienda, de manera tal, de obtener un producto con un tamaño y diámetro de aproximadamente unos 1,2 cm, el cual es apto para su manejabilidad en los siguientes procesos.

El producto obtenido es vuelto a chancar, en una chancadora secundaria, de tal manera de obtener un producto de menor tamaño y diámetro de aproximadamente 0,18 milímetros.

En los estanques el concentrado (con una pureza del 30% de cobre) se separa del relave, con la ayuda de compuestos químicos, que se agregan a las dos fases generadas.

El concentrado obtenido de la separación de las dos fases, es llevado a un Espesador, donde se retira agua parte de la humedad que contiene. Luego de ello, es enviado a filtros, donde el agua es retirada casi en su totalidad.

Eliminada el agua en casi su totalidad (menor al 8% de humedad), el concentrado es enviado a la planta de Fluosolidos, donde la humedad es disminuida a valores bajo el 1%.

Finalmente el producto, casi sin agua, es enviado a los Convertidores Teniente, para el proceso de fusión.

En el proceso de fusión se trabaja con una temperatura promedio de 1500°C en el interior de los hornos, requiere de oxígeno de alta pureza (alrededor de 95% a 97%) y aire seco, para la obtención de cobre llamado metálico, el cual tiene un 99,6% de pureza.

Planta de oxígeno-aire-nitrógeno (POAN) es la encargada de suministrar tanto el aire seco como el oxígeno, usado en los Convertidores Teniente para la fusión del concentrado.

Para ello, POAN cuenta con una planta de aire y dos plantas de oxígeno, actualmente sólo una está operativa, planta número 3 (producción de 800

Toneladas métricas por día), dado que la planta número 2 (producción de 400 Toneladas métricas por día) se encuentra en reparaciones.

Capítulo 2: Descripción del Proceso de Separación de Aire para la Obtención de Oxígeno Gaseoso

2. Introducción

La Fundición Caletones ha iniciado un proyecto cuyo objetivo es aumentar su capacidad de fusión, elevándola desde 1.350.000 toneladas actuales a 1.500.000 toneladas anuales fundidas una vez terminado el proyecto. Una de las fases fundamentales de este programa, es el reemplazo de uno de los Convertidores Teniente, por uno de mayor capacidad de fusión.

Actualmente los convertidores Teniente, el cual se ve representado en la figura 1, tienen una capacidad de 80 toneladas métricas por hora, cada uno.

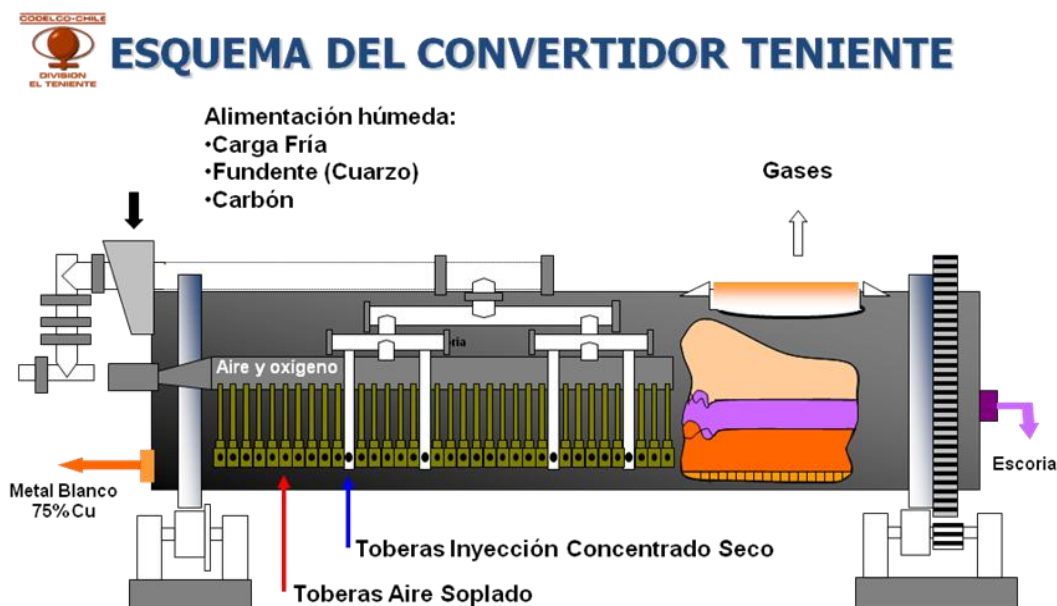


Figura 1

Los Convertidores Tenientes, utilizan aire enriquecido con oxígeno para la fusión, este enriquecimiento varía entre un 35 a 37%, dependiendo de la composición que tenga el concentrado de cobre a fundir.

El principal objetivo de ingresar aire enriquecido, es lograr que se produzcan reacciones isotérmicas, las cuales son capaces de generar energía en el interior de los Convertidores, obteniendo una elevación de temperatura considerable, la cual tiene una elevación promedio de 200° Celsius.

Los principales elementos que producen dichas reacciones, son: los sulfuros, el fierro y gran parte del oxígeno que va contenido en el aire.

Por lo tanto, la planta de producción de oxígeno gas de la Fundición Caletones, la cual tiene una ubicación cercana a los convertidores, como se muestra en la

figura 2, tendrá la necesidad de volver a poner en funcionamiento una de las plantas inactivas que posee, planta de oxígeno número 2 y ver la factibilidad de aumentar la producción de la planta de oxígeno número 3, la cual en la actualidad genera una cantidad de 800 toneladas métricas por día.

El principal problema que se genera al tratar de aumentar la producción de oxígeno, es que la planta que se tiene fue diseñada para una cantidad de aire de entrada específico, por ende, algunos equipos no podrían trabajar adecuadamente bajo estas nuevas condiciones.

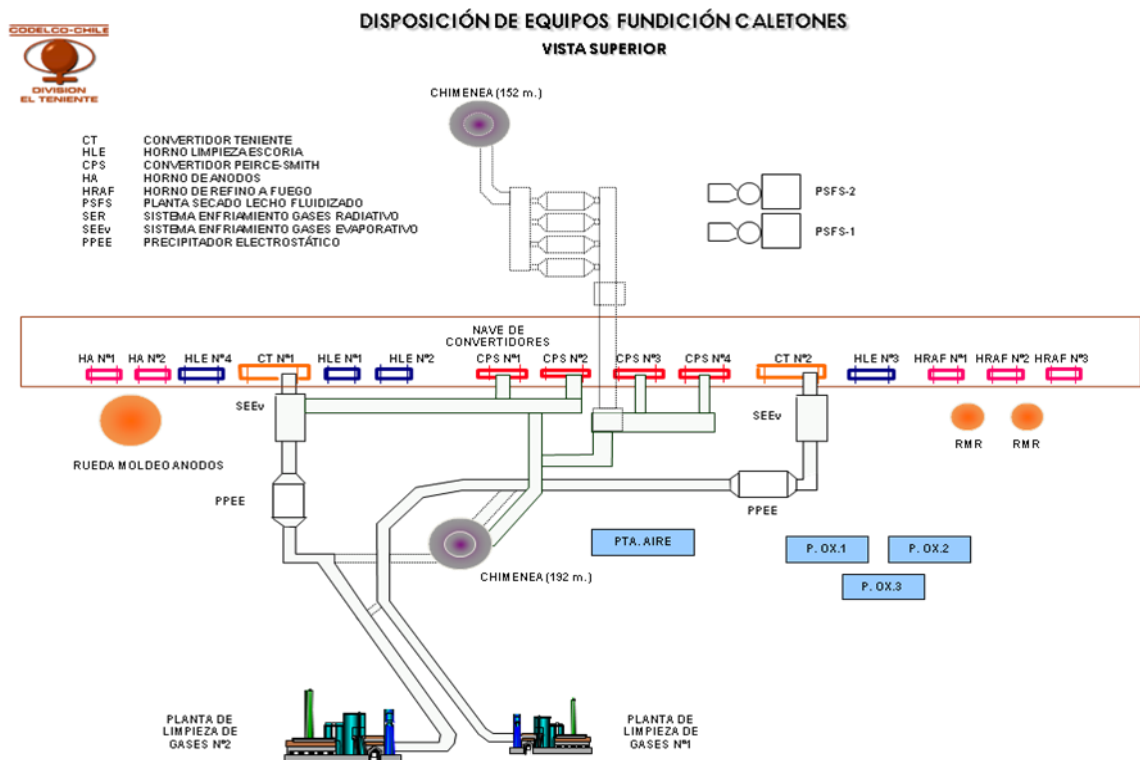


Figura 2

2.1 Descripción del proceso de la Planta de Oxígeno número 3

2.1.1 El proceso de Obtención de oxígeno cuenta de 5 etapas:

- Filtración del aire de entrada
- Compresión
- Adsorción
- Enfriamiento
- Licuefacción

El proceso de filtración que se usa en la planta de oxígeno se realiza mediante un filtro que cuenta con 6 etapas, el cual tiene una estructura de 4 filtros de panel, uno químico y un separador inercial de gotas.

La planta posee dos filtros de estas características, ya que cada filtro trabaja con su propio compresor.

El aire que se ingresa a estos filtros tiene una temperatura promedio de 25 °C y a presión atmosférica.

La estructuración de los filtros:

Separador inercial de gotas: filtra el 98% para partículas de 15 μ y mayores

Filtro de panel 1: filtra el 98% para partículas de 10 μ

Filtro de panel 2: filtra el 99.97% para partículas de 0.3 μ . Este se reemplaza cuando el $\Delta P \approx 4$ pulgadas Mercurio.

Filtro Químico: se constituye por Alúmina activada impregnada con Permanganato de Potasio en capsula de acero inoxidable A 304 que adsorbe el SO₂ y otras impurezas del aire.

Filtro panel Dollinger

Filtro panel: el cual está hecho de múltiples filtros en V. Este se reemplaza cuando el $\Delta P \approx 4$ pulgadas Mercurio.

2.2 Proceso de Compresión

2.2.1 Compresores

Se utiliza un compresor centrífugo e isotérmico, que es una maquina centrífuga (modelo vk 50-3) de tres etapas con enfriador después de cada etapa.

Utiliza un motor de 5,4 MW de potencia nominal.

Las condiciones con las cuales viene el aire son:

- Caudal: 56800 (Nm³/hrs) para cada compresor
- Temperatura: 25°C
- Presión: 0,845 bar(a)
- Humedad relativa: 70%

Condiciones de diseño de cada compresor:

	Etapla 1	Etapla 2	Etapla 3
Presión Inicial (Bar)	0,845		
Presión final (Bar)	1,786	2,969	5,291
Temperatura inicial (°C)	25	35	35
Temperatura final (°C)	109,1	91,5	99
T salida de enfriador(°C)	35	35	35

Cada compresor cuenta con un motor propio y un sistema de lubricación para este.

Además el motor de cada compresor cuenta con un sistema de refrigeración, para ello, se utiliza un intercambiador de tubo y carcasa, que se encuentra en la parte superior del motor.

2.2.2 Intercambiador de tubo y carcasa C01.1E1/2

Este compresor es isotérmico dado que después de cada etapa se encuentran intercambiadores de tubo y carcasa de las siguientes características:

El sistema de los intercambiadores de tubo y carcasa que están en los compresores utilizan agua que proviene de aguasin, el cual es un sistema de agua previamente filtrada con filtros de arena y carbón activado, estos quitan el olor, el cloro y objetos de mayor envergadura, esta agua es refrigerada por un sistema de circuito abierto.

Circuito abierto

El circuito abierto se encarga de refrigerar el agua que va a los equipos (compresores, turbinas y sistemas de lubricación), este circuito constas con dos equipos principales los cuales son:

- Torre de enfriamiento
- Bombas

2.2.3 Torre de Enfriamiento E62

La torre de enfriamiento cuenta con tres ventiladores en su parte superior, esta torre tiene una altura de 19,8 metros y cuenta con una capacidad de 190 m³.

Además de poseer rejillas que hacen que haya una mayor área de intercambio entre el agua y el aire frio que viene de los ventiladores.

La función de esta torre es enfriar el agua que va a los intercambiadores de placa, mediante aire previamente enfriado por los ventiladores.

Esta agua enfriada cae a una piscina que tiene una profundidad de 1,4 metros, desde esta piscina es sacada por medio de tres bombas hidráulicas (P62-1/2/3), teniendo dos en servicio y una no, esta medida se basa, en que si se tiene problemas con una, no se detenga el proceso de producción, aislando la bomba defectuosa y poniendo a trabajar la que estaba fuera de servicio.

Las bombas en servicio envían el agua enfriada a los intercambiadores de placa para enfriar el agua que se encuentra en el circuito cerrado de la planta (equipos en funcionamiento).

2.2.4 Bombas P62-1/2/3

Estas son bombas hidráulicas las cuales se encargan de enviar el agua enfriada de la torre hacia los intercambiadores y poseen una bifurcación hacia un filtro en caso de que el agua no se adecuada para el proceso.

2.2.5 Circuito Cerrado

En este circuito se trata de enfriar el agua que proviene de los equipos, esta línea se llena una vez al año, y se rellena cuando hay pérdidas por la misma línea de aguasin o agua de make up.

Este circuito constas con dos equipos principales los cuales son:

- Bombas
- B60
- Intercambiadores de Placa

2.2.6 Bombas P63-1/2/3

Estas bombas son hidráulicas al igual que las P62, y se encargan de enviar el agua enfriada en los intercambiadores de placa a los equipos (sistema de aceite de las turbinas, sistema de intercambiadores de las turbinas y sistema de intercambiadores de los compresores).

Además de enviar agua al tanque B60 para mantener el nivel de este.

2.2.7 B60

Este tanque se encarga de presurizar la línea de descarga que va a los equipos de la planta y además de mantener el nivel de agua dentro del circuito cerrado.

Este tanque se presuriza con nitrógeno que proviene del estanque E60 (enfriador de agua para intercambiadores de tubo y carcasa E07.1/2).

Además proporciona aspiración a las bombas para evitar la cavitación, por lo que la corrosión que pueda ocasionarse por el oxígeno estancado en la línea.

2.2.8 Intercambiadores de placas E63-1/2/3

Estos reciben el agua tratada en la torre de enfriamiento y el agua que viene de los equipos tanto de intercambiadores como los lubricadores.

El agua que se usó para enfriar el agua caliente que proviene de los equipos en reingresada a la torre de enfriamiento por una cañería que llega alrededor de los 2/3 de altura de esta.

2.2.9 Proceso de Sub-Enfriado (E07.1/2)

El proceso de sub-enfriado ocurre después de la etapa de compresión, pero se considera que esta dentro de esta, ya que en esta se enfría definitivamente el aire antes de ser enviado a los tamices para la adsorción de CO₂ y H₂O.

Estos son intercambiadores de tubo y carcasa, el agua usada para el intercambio en este caso no proviene del circuito cerrado anteriormente indicado, viene del ablandador que se encuentra en la planta de aire de la fundición Caletones de forma que esta llegue al estanque de almacenamiento E60, como agua blanda y no dura como la que va al circuito abierto o cerrado. A este estanque se ingresa nitrógeno gaseoso proveniente del enfriador principal (E01) para la disminución de temperatura del agua blanda.

El agua dentro de este estanque mantiene un cierto nivel, si este disminuye es rellenado por agua blanda.

Esta es bombeada por dos bombas (P60-1/2) hacia los dos intercambiadores de tubo y carcasa (E07.1/2) para el intercambio de calor con el aire que viene de la sala de compresores.

Torre de Enfriamiento de Agua por Nitrógeno (E60)

El circuito de enfriado de los intercambiadores de tubo y carcasa (E07.1/2) proviene de la torre de enfriamiento de agua por nitrógeno (Tower Chiller), donde existe un contacto directo entre el agua que viene de los intercambiadores y el nitrógeno gaseoso que proviene de la caja fría.

Esta torre debe mantener un nivel de líquido en la torre, que es alrededor del 45% del estanque, lo que significa que son alrededor de 42750 litros de agua, por lo tanto tiene una entrada de agua blanda o en caso necesario agua de make up, si este nivel está por debajo de la torre.

En caso opuesto que este tenga un nivel muy alto, alrededor del 60% de estanque, posee un despiche a la altura que este alcance dicho porcentaje del volumen de la torre.

Si no hay nitrógeno en la caja fría, partida en cero de la planta, se usa aire que proviene de los compresores, obviamente éste ya ha pasado por las etapas de

enfriamiento y los intercambiadores de tubo y carcasa que están fuera de la sala de compresores.

Esta se conecta antes de ingresar a los tamices a la línea de nitrógeno gaseoso para ingresar de la misma manera que el nitrógeno.

Además antes de ingresar a la torre E60 se hace una bifurcación en la línea de nitrógeno para enviar este mismo a la planta de aire (compresores de nitrógeno en la planta de aire).

Los equipos auxiliares como bombas, evaporadores, sistema de refrigeración y almacenamiento de la planta (almacenamiento de oxígeno líquido, estanques B40) se ubican en la planta como lo muestra la figura 3.

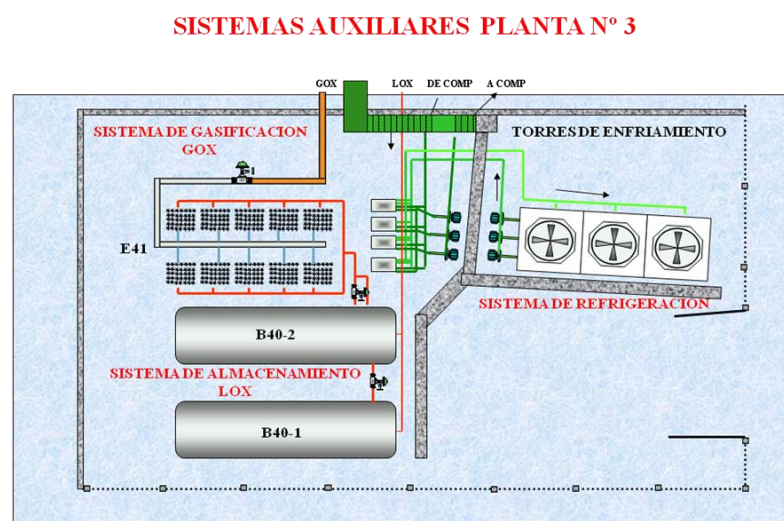


Figura 3

2.3 Proceso de Adsorción o Purificación total del aire

En esta etapa se adsorben principalmente agua (H_2O) y dióxido de carbono (CO_2), dado que el CO_2 tiene una solubilidad muy alta en el oxígeno líquido, lo cual sino se retira ocasionaría incrustaciones pudiendo obstruir el intercambiador principal y el evaporador.

Para ello se cuenta con dos columnas de adsorción o tamices (R01 y R02), cada tamiz esta relleno con dos tipos de relleno, los cuales son la alúmina activada y tamiz molecular 13x (Anexo 2).

Los cuales dentro del tamiz son separados por una criba, que es una malla agujereada.

Por otro lado tanto la alúmina como el 13x, son separados por otra criba de forma horizontal.

El tamiz desde la parte más cercana a las paredes se encuentra la alúmina y hacia el interior el tamiz molecular 13x.

Así el aire, que está a una temperatura aproximada de 10°C, que entra al tamiz lo hace desde las paredes hacia el interior, para luego salir por una cañería en la parte superior de cada tamiz.

La temperatura de entrada del aire depende de la estación del año en la que se esté, porque la planta tiene una baja considerable en primavera-verano, ya que las temperaturas en el área de Caletones alcanzan los 27 ° Celsius aproximadamente.

2.4 Proceso de Enfriamiento

En el proceso de enfriamiento, se utiliza un intercambiador principal en el cual ingresan las corrientes de los turbocompresores (D01C-D01 y D02C-D02), de la columna de mezclado (K04) y de la columna de media presión, con una temperatura de servicio de 6,1 bar (K01).

El aire que viene de los tamices se separa en tres corrientes antes de ingresar al intercambiador principal, de estas tres corrientes, una va al compresor de los turbocompresores, para ser expandida y luego ser enfriada en el intercambiador ,posteriormente este aire previamente comprimido y enfriado se dirige a la turbina que está en el turbocompresor, terminado el aire expandido se dirige a la columna de baja presión, con una presión de servicio de 1,8 bar (K02), la segunda y la tercera corriente son enfriadas en el intercambiador con la salvedad que una se dirige a la columna de mezclado (K04) y la otra se dirige a la columna de media presión (K01) .

El intercambiador principal se encarga de disminuir la temperatura del nitrógeno que viene de la columna de baja presión (K02), pero antes de ingresar al intercambiador principal es previamente enfriada en un enfriador (E03), que enfría el agua de los Intercambiadores de tubo y carcasa (E07.1/2) y el oxígeno gaseoso que sale de la columna de mezcla antes del enviarlo a fundición.

2.5 Proceso de Licuación

El proceso de separación del aire se hace por medio de tres columnas, una de estas tiene un evaporador en su parte superior.

Estas columnas son:

- Columna de Media Presión (6,1 bar)
- Columna de Baja Presión (1,8 bar)
- Columna de Mezcla (6,1 bar)

La columna de Media presión consta con un evaporador principal en su parte superior.

2.5.1 Columna de Media Presión (K01; 6,1 bar)

En esta columna se hace una destilación de aire a media presión el cual fue previamente enfriado en E01. El líquido descendente es nitrógeno condensado en E02 o LL líquido pobre el cual va al estanque de nitrógeno líquido (B08) para luego ser pasado por el subenfriador (E03).

Finalmente este líquido es llevado a la parte superior de la columna de baja presión (K02).

Por otro lado el líquido rico en oxígeno se envía al enfriador E03 para que este pueda ser enviado a la columna de baja presión (K02).

Evaporador Principal tipo cubeta (E02)

Se utiliza como condensador de la columna K01 y como evaporador de la columna K02.

El oxígeno líquido alimentado a la cubeta, desde el fondo de la columna de baja presión, se evapora parcialmente, lo que genera un flujo ascendente en K02.

2.5.2 Columna de Baja Presión (K02; 1,8 bar)

Se utiliza para la destilación de aire a baja presión, el nitrógeno líquido y líquido enriquecido en oxígeno y nitrógeno residual.

Se alimenta con líquido enriquecido en oxígeno de K01, nitrógeno líquido de E02 (estas dos corrientes son enfriadas previamente en E03 antes de ingresar a esta columna) y con líquido enriquecido en oxígeno de la mitad y el sumidero de K04.

Además hay otra alimentación que viene de los turbocompresores, esta corriente es aire gaseoso de baja presión.

El nitrógeno gaseoso residual que sale de la parte superior de K02 es enviado a E01 y E03 para ser enfriados y reutilizados, ya que este nitrógeno es usado para la regeneración de los tamices o unidad de purificación del aire.

El oxígeno líquido obtenido en el fondo es enviado como alimentación a E02.

2.5.3 Columna de Mezclado (K04; 6,1 bar)

Se alimenta con oxígeno líquido crudo que proviene de las bombas (P02.1/2), previamente enfriado en E04 antes de ingresar a la columna de mezclado.

El flujo de gas ascendente que se genera en la columna viene del aire a media presión de E01.

Los líquidos enriquecidos en oxígeno que se extraen por el fondo y mitad de K04 son llevados a E04, para luego ser enviados a un separador, la corriente de fondo es enviada a B07 y la corriente que sale por la mitad de la columna va al separador B05.

Pasadas las corrientes por los separadores son enviadas a la mitad de la columna K02.

El oxígeno gaseoso generado en la columna es enviado a E01 para su calentamiento.

En la figura 4, se muestra como se distribuyen los equipos de la planta de oxígeno número 3 y sus siglas respectivas.

DISTRIBUCION EQUIPOS PLANTA N° 3

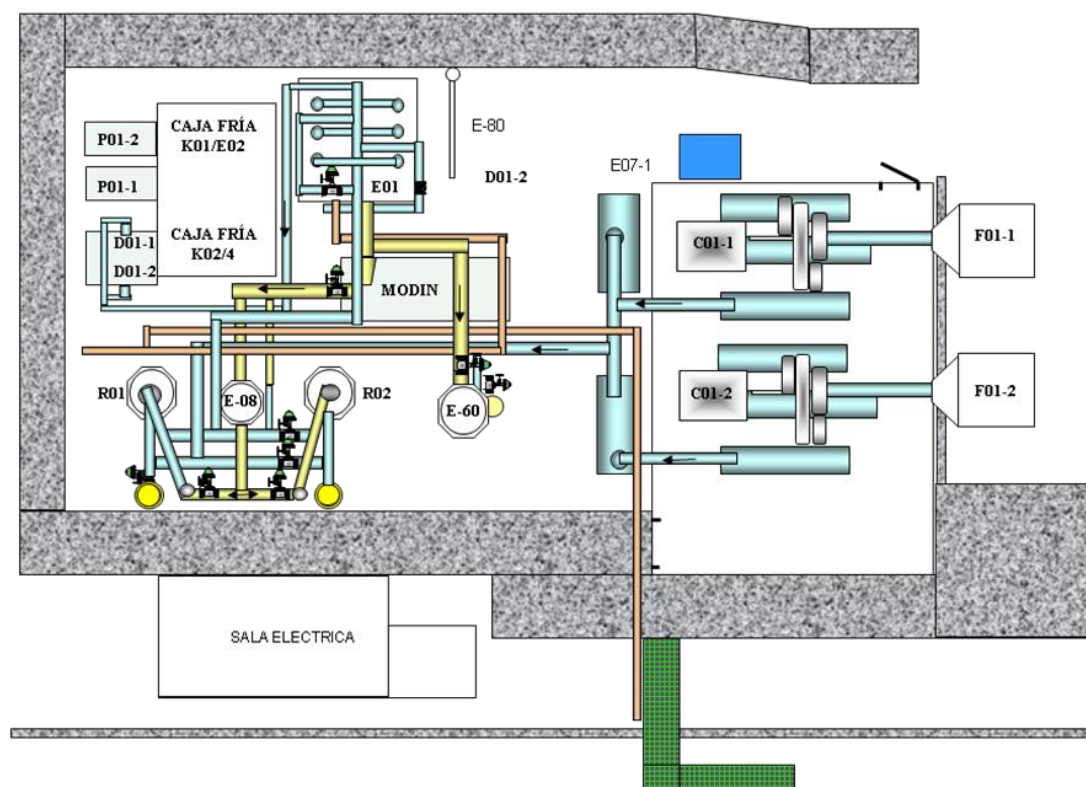


Figura 4

2.6 Resumen general del proceso de producción de oxígeno gaseoso (GOX)

En la figura 5 se muestra el esquema de la planta de oxígeno número 3, proceso el cual comienza con la entrada del a un filtro para la eliminación de partículas y la adsorción de SO_2 , luego el aire pasa a un compresor de 3 etapas con refrigeración intermedia, los compresores son isotérmicos.

Las etapas de refrigeración de los compresores usan agua, provenientes de un circuito cerrado para disminuir la temperatura del aire antes de cada etapa.

El circuito cerrado a su vez es enfriado por un circuito abierto que posee intercambiadores de placas para su enfriado.

Después de esto el aire pasa a un tamiz de adsorción con alúmina con permanganato de potasio y tamiz 13x, para la disminución de CO_2 y H_2O .

Posteriormente el aire se divide en tres corrientes dos de estas pasan directo a un intercambiador principal y una tercera se dirige a los turbocompresores.

Una de las corrientes que paso por el intercambiador es enviada a la columna de media presión, la siguiente a la columna de mezcla y la tercera que viene de los turbocompresores al tope de la columna de baja presión.

De la columna de media presión sale una corriente de líquido rico en oxígeno, esta se dirige a un separador de humedad (B02), antes de ingresar a la columna de baja presión.

Del rehervidor salen dos corrientes una es nitrógeno líquido que va a un estanque de almacenamiento (B08), y la otra corriente es llevada a un intercambiador secundario (E03), para finalmente ingresar en la columna de baja presión.

La corriente restante es de oxígeno líquido, esta es enviada por una bomba a otro intercambiador secundario (E04), siguiente ingresar a la columna de mezcla, antes de esto tiene una bifurcación que va al tope del rehervidor. Además ingresa una línea de oxígeno líquido que provienes de la columna de baja presión.

En la columna de baja presión sale una corriente, que es la de nitrógeno líquido, esta es enfriada en un Intercambiador secundario, antes de que ingrese al intercambiador principal.

Luego el nitrógeno se va al E60 para el intercambio de calor con el agua de los E07.

Otra es la línea de oxígeno líquido que va al E02.

A esta columna ingresan en su totalidad corrientes con líquido enriquecido en oxígeno y una de nitrógeno líquido proveniente de E02.

De la columna de mezcla sale el oxígeno gaseoso la cual pasa por el intercambiador principal para luego ir a fundición.

2.7 Esquema de la Planta de Oxígeno

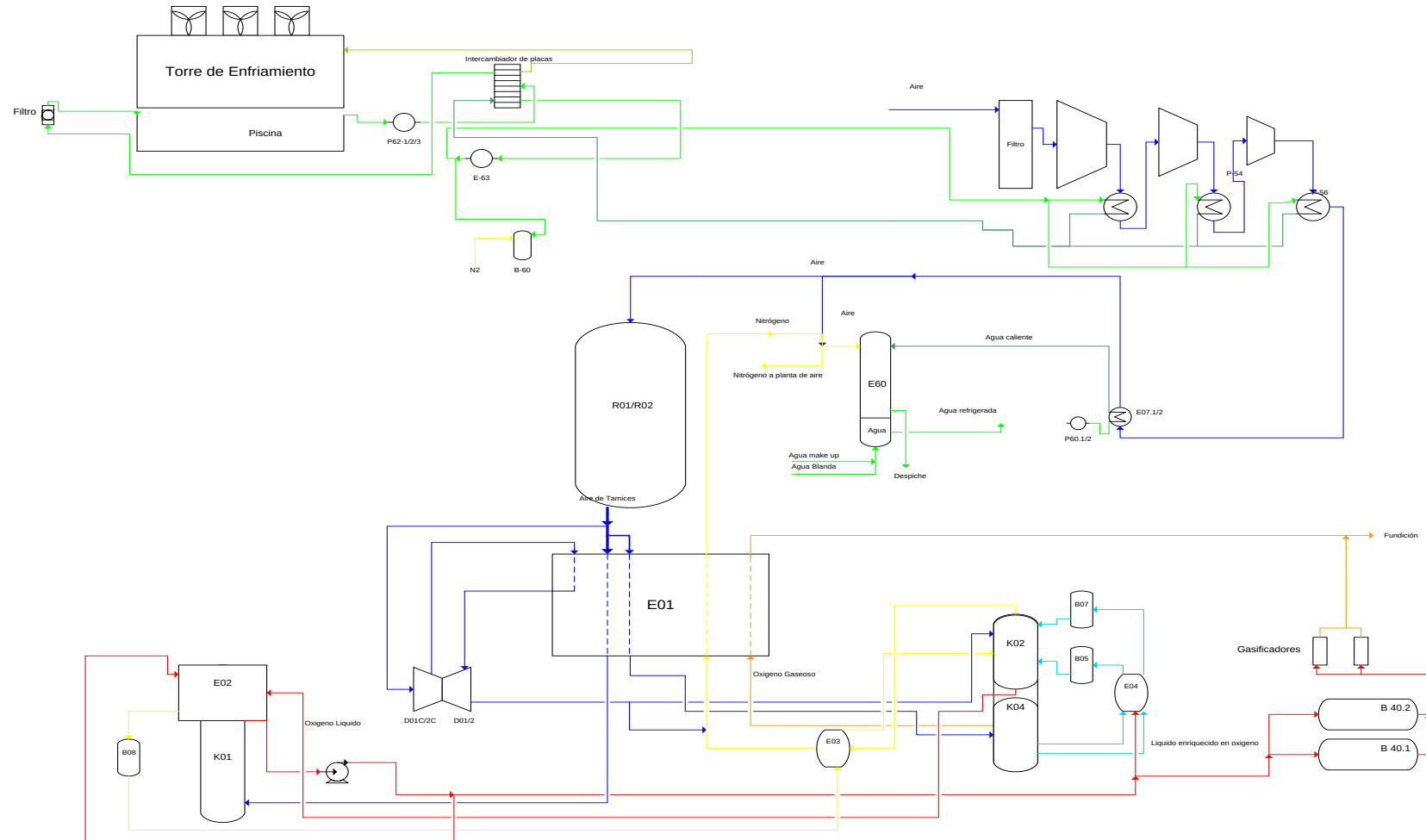


Figura 5

Capítulo 3: Descripción de la Evolución del Proceso de Separación de Aire

3. Marco Teórico

La composición del aire varía de acuerdo a muchos factores, los cuales son; altura con respecto al mar, condiciones climáticas, condiciones ambientales del lugar (Barrio industrial o Comercial), etc.

Dado esto, la composición promedio que posee el aire es, de un 78% de nitrógeno, un 21% de oxígeno y un 1% de argón, como componentes mayoritarios.

Existen componentes minoritarios, entre los cuales tendríamos, el neón, el helio, el criptón, hidrogeno, xenón, dióxido de azufre, óxido nitroso, dióxido de carbono, metano e hidrocarburos, por mencionar algunos.

El nitrógeno es usado en la industria química y en las afines (alimentación, farmacia, etc.) para inertizar atmósferas, o lugares que se encuentren con mezclas de gases (aire) que podrían provocar una explosión ("blanketing" o barrido con nitrógeno de depósitos, reactores, equipos varios y tuberías en la industria del refino de petróleo, petroquímica y de la polimerización) o a degradaciones de oxidación (envasado en atmósferas inertes).

También es usado en estado puro como diluyente en las reacciones químicas, o puede estar mezclado con oxígeno para dicha tarea.

Por otro lado, el nitrógeno es usado como refrigerante, tanto en su estado líquido como gaseoso.

El oxígeno es usado mayoritariamente como comburente en la producción de reacciones por combustión.

A diferencia del nitrógeno, que se produce sin especiales dificultades en estado de alta pureza (contenido de oxígeno inferior a 10 ppm), el producir oxígeno resulta caro, cuanto mayor pureza se requiera.

Oxígeno del 85% se considera como aire enriquecido; de baja pureza es la del 95% y de alta pureza estándar a partir del 98,5% e, incluso, por encima del 99% hasta el 99,9%, en cuyo caso debe haberse separado el argón que le puede acompañar en una proporción superior al 1%.

El argón se utiliza en la soldadura "bajo argón" de aceros inoxidables y otros metales como el aluminio, donde la presencia de oxígeno produciría óxidos y la de nitrógeno nitruros, ambos indeseables. También se utiliza para llenar lámparas especiales.

Mezclas de argón y oxígeno se utilizan para eliminar el carbón de aceros inoxidables ("extra low carbon", "ELC").

Antiguamente se utilizaban dos tipos de proceso para la separación de aire, dando como productos, los gases de mayor composición dentro del aire, los cuales son el nitrógeno, el oxígeno y el argón, estos dos procesos eran: Proceso Criogénico (adsorción por oscilación térmica) y PSA (proceso con oscilación de presión adsorción).

En la figura 6 se muestra los procesos con los cuales cuenta una planta de obtención de oxígeno gaseoso o separación de aire, para este proceso se cuenta primordialmente con una etapa de compresión, de depuración, de destilación y finalmente con una etapa de intercambios de energía.

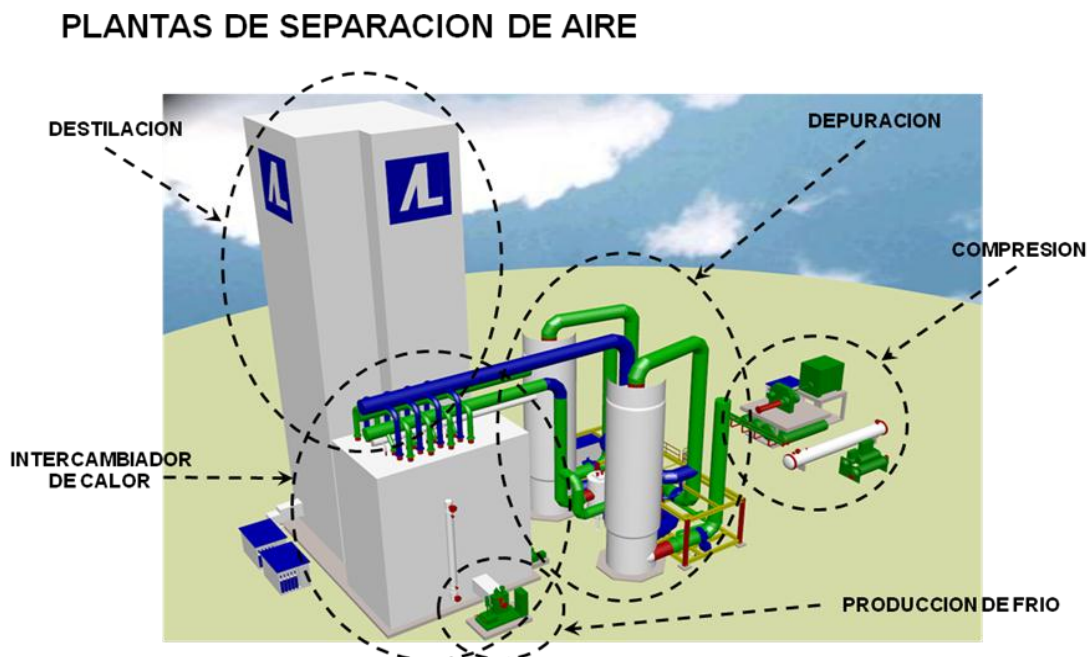


Figura 6

El Proceso criogénico, trabaja a muy bajas temperaturas, alrededor de los -180 grados Celsius, de tal manera de poder licuar el aire que está ingresando a la planta de separación, de tal forma de producir los productos antes mencionados mediante una destilación, para ello se trabaja en los puntos de fusión de los gases que componen mayoritariamente el aire (Nitrógeno, Oxígeno y Argón).

Todo proceso criogénico, cuenta con tres partes fundamentales, antes de producir los productos, las cuales son: Filtrado, Compresión y Purificación del aire de entrada.

En la etapa de Filtración, cuenta con un filtro, este debe poseer la capacidad de extraer las impurezas que el aire contenga, dado que este aire será enviado a un compresor.

Además el filtro debe poseer las características esenciales de eliminación de impurezas para una determinada carga.

En la Etapa de Compresión, el equipo cuenta con intercambiadores inter etapas, el aire previamente filtrado es comprimido a una presión manométrica de 6 bares aproximadamente.

Antes de la etapa de purificación, el aire es enfriado mediante un intercambiador, de tal forma de este entre a la etapa de purificación, con una temperatura similar a la temperatura ambiente que haya en ese momento.

En la etapa de la purificación ha habido una evolución notoria en el transcurso de los años, dado que se han generado distintos procesos de adsorción para poder eliminar de forma total todas las impurezas que el aire contenga, como por ejemplo los hidrocarburos, el óxido nitroso, el dióxido de carbono, etc.

Para ello tanto el proceso TSA como el PSA se encargan de extraer el agua, el dióxido de carbono, los cuales se congelarían dentro de cada proceso.

Para ello, antiguamente se utilizaba un proceso de pre purificación, el cual se cumplía un rol fundamental en la estabilidad y rentabilidad de las plantas de PSA Y TSA, dado que es la etapa encargada de extraer el etileno, el cual posee una baja solubilidad en el oxígeno líquido, por ende, es mucho más seguro que este gas sea extraído por completo de las corrientes de aire de entrada.

El proceso PSA separa el aire por altas presiones, utilizando los efectos de la adsorción sobre la base, que cada gas posee distintas propiedades específicas.

El proceso TSA antiguamente necesitaba refrigeración previa, para que este funcionase de una forma óptima, la cual se encargaba de disminuir la carga de agua, de tal forma poder minimizar el uso de adsorbentes, y el tamaño de los recipientes de adsorción.

Pasado el tiempo el proceso TSA tuvo mejoras, y desde mediados de los años 70, está usando una malla molecular con zeolita 13x, el cual sustituye a los intercambiadores de calor, ubicados en la refrigeración previa.

En los años 90, se disminuyó la energía de regeneración, mediante un sistema de enfriamiento directo (DCAC).

Se desarrollaron tecnologías patentadas como los sistemas PSA térmicamente mejorados (TEPSA) y los sistemas de adsorción por oscilación de presión térmica (TPSA) para superar los inconvenientes asociados con los sistemas de TSA y PSA y conseguir de esta forma significativas mejoras operativas (como el aumento del rendimiento o la reducción del consumo de energía de funcionamiento). El uso en propiedad del adsorbente de la tecnología CaX (18)

para extraer el N_2O mejora la seguridad y la fiabilidad de las plantas de separación de aire.

Los procesos de los sistemas TPSA y TEPsA son en muchos aspectos similares a los de los sistemas de TSA convencionales, aunque incorporan varias ventajas fundamentales. Ambos procesos utilizan avanzados sistemas de adsorción en combinación con los efectos del sistema de PSA para extraer los componentes adsorbidos con mayor fuerza, principalmente el agua. En un sistema TPSA, este proceso reduce significativamente la energía de regeneración necesaria, ya que se utiliza un tamiz molecular que posee una capacidad de adsorción de un 20% más que los anteriores usados, por ende, se necesitara menos regeneraciones durante el día.

Estos nuevos sistemas podrían operar en la mayoría de los casos en un intervalo de temperatura de 0 a 50 °C del aire de entrada, por lo que se evitarían los costosos procesos asociados con el enfriamiento previo de este aire.

Estas tecnologías se pueden incorporar a plantas existentes para solucionar un problema determinado (descongelaciones frecuentes), reducir el consumo de energía de funcionamiento o incluso para mejorar el flujo de la unidad ASU y generar más productos como el oxígeno.

Evidentemente el aire debe estar seco y exento de CO_2 para evitar su solidificación en el interior de los equipos.

Tecnologías de regeneración y adsorción mejoradas

Dado el avance que ha ocurrido, en relación a la adsorción de los gases o impurezas que componen el aire, se han podido mejorar los sistemas iniciales, además de los métodos de regeneración para los sistemas ASU existentes.

Este avance ha generado la producción de nuevos tipos de adsorbentes, los cuales son capaces de adsorber hasta un 80% más, es decir, que con un mismo volumen determinado, se adsorbe una cantidad mayor.

Esta generación nueva de adsorbentes permite la entrada de un caudal de aire mayor a través de sus capas, lo que produce una optimización en el consumo de energía de regeneración, y generan mejoras en la adsorción de algunas impurezas específicas. A continuación, se muestran algunos ejemplos de adsorbentes mejorados:

Alúmina tratada: la alúmina utilizada normalmente en sistemas de PSA se trata con carbonato de potasio (K_2CO_3), lo que aumenta su capacidad en relación con el CO_2 .

Desecantes de alta capacidad para H_2O : en los sistemas de TSA pueden utilizarse desecantes alternativos con mayor capacidad que la alúmina para el H_2O .

NaX de alta capacidad para el CO_2 : los materiales de NaX empleados en los sistemas de TSA para extraer CO_2 pueden crearse con menor cantidad o sin necesidad alguna de aglutinante, e incluso con distintas formulaciones para mejorar la capacidad de los productos de NaX estándar.

Calcio-X (CaX): el CaX presenta una mayor capacidad de adsorción de N_2O que el NaX, y puede emplearse en sistemas de TSA

Dado el avance en las tecnologías de regeneración y en los productos adsorbentes, se ha podido disminuir el consumo de energía en las unidades ASU, y en algunos casos particulares, la posibilidad de aumentar el rendimiento inicial de las plantas.

En los sistemas de TSA anteriores, la regeneración se realizaba haciendo pasar un pulso de calor a través de la capa. En muchos sistemas antiguos, la energía suministrada por el calentador era mucho mayor que la requerida en teoría para lograr la desorción de las impurezas. Esta energía adicional sale de la capa en forma de gas residual a elevadas temperaturas. Para reducir el consumo de energía, el sistema de TSA puede actualizarse a un sistema de adsorción por oscilación de presión térmica (TPSA).

En los sistemas TPSA, el calentador suministra menos energía durante la regeneración y la energía calórica se consume dentro de la capa, por lo que no se eliminan gases residuales a través del purgador. Dado que el grado de regeneración es menor que en un sistema de TSA, el período de funcionamiento del sistema TPSA es menor.

Los sistemas de PSA requieren de presurizaciones frecuentes en la purga para suministrar presión. Un sistema de PSA puede convertirse en un sistema PSA térmicamente mejorado (TEPSA). Para ello, se instala un pequeño calentador que emite un corto pulso de calor de aproximadamente $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante la regeneración. Esta pequeña cantidad de calor aumenta la capacidad de la capa e incrementa de forma notable el periodo de funcionamiento. Aunque el calentador requiere energía adicional, el consumo total de energía de la unidad ASU disminuye, ya que cuanto mayor es el periodo de funcionamiento, menor es el número de presurizaciones necesarias y menor es la pérdida de carga (se reduce en un 2%).

Los sistemas iniciales de pre enfriamiento pueden sustituirse, por cualquier ciclo de regeneración basado en la adsorción mediante zeolitas o cualquier carbón activado que tenga las propiedades que se requieran para la adsorción de impurezas del aire. Este cambio reduce la frecuencia de las pérdidas de carga, lo que amplía la vida útil de los intercambiadores y hace posible un funcionamiento

más estable. Todos los ciclos de adsorción extraen el C_2H_2 , lo que elimina el riesgo, que este compuesto implica tanto en materia de seguridad, como de funcionamiento.

Los sistemas de TSA, TPSA y TEPSA requieren un menor caudal residual para la regeneración, con lo que el aire queda disponible para otros propósitos.

En la etapa de licuefacción o separación de los componentes mayoritarios del aire, se realiza en dos columnas de destilación, una que trabaja a alta presión y otra a baja.

Estas columnas realizan una destilación fraccionada del aire, además trabajan con flujos contra-corriente para mayor superficie de contacto.

Para el proceso de licuefacción se necesita un aire a alta presión, alrededor de 5 bar(a), lo que produce complicaciones en el bombeo de oxígeno, además de crear un desequilibrio termodinámico dentro del intercambiador de calor primario, por ende, lo que genera un aumento de consumo de energía.

Otra complicación que se genera con el bombeo de oxígeno líquido se debe al hecho de que se necesitan de presiones de aire por encima del punto crítico 3771 Kilo Pascales, para la vaporización del oxígeno líquido.

En esta etapa del proceso de separación de aire, se pone en contacto un flujo de gas con uno líquido, estos flujos dependen de la diferencia entre las presiones de vapor de los componentes que la constituyen, como es el caso los componentes que componen el aire

El componente que posee la presión de vapor más alta, o sea el más volátil o que tenga menor punto de ebullición, tiende a concentrarse en la fase de vapor mientras que el componente de presión de vapor más baja, o de menor volatilidad o de más alto punto de ebullición, tiende a concentrarse en la fase líquida.

La condensación parcial es el proceso de separación mediante el cual se puede usar el enfriamiento de una mezcla de vapor para concentrar el o los componentes volátiles en la fase vapor y por lo tanto el o los componentes menos volátiles en la fase líquida.

La rectificación, o la destilación continuada, es el proceso de separación que combina sucesivas vaporizaciones y condensaciones parciales, tales como las obtenidas mediante un tratamiento a contracorriente de las fases de líquido y de vapor.

El contacto a contracorriente de las fases de líquido y de vapor es generalmente adiabático y puede incluir un contacto integral, por etapas o diferencial, continuo entre las fases. Las disposiciones del proceso de separación que utilizan los principios de la rectificación para separar mezclas a menudo se denominan

indistintamente columnas de rectificación, columnas de destilación, o columnas de fraccionamiento.

La rectificación criogénica es un proceso de rectificación que se lleva a cabo al menos en parte, a temperaturas iguales o inferiores a -123 grados Celsius.

En este proceso se produce un líquido rico en oxígeno en el fondo de la columna de alta presión.

El líquido rico en oxígeno se convierte en la alimentación de la columna de baja presión para la separación final en oxígeno puro, el cual es retirado en la parte inferior de la columna, y otra corriente que contiene nitrógeno y una fracción de oxígeno, es retirado en la parte superior de la columna.

Capítulo 4: Situación actual de la Planta de Oxígeno 3 de Caletones y Objetivos para el aumento de la producción de la planta

4. Situación Actual de la Planta de Oxígeno número 3 de la Fundición Caletones, División el Teniente

Actualmente la planta cuenta con una producción de alrededor de 800 toneladas/días lo que significa que la planta trabaja a las condiciones que fue calculada.

4.1 Filtros

Los filtros tienen alúmina activada (Anexo 2) al igual que los tamices, la cual tiene la capacidad de remover los siguientes elementos que vienen en el aire de entrada a la planta: Dióxido de sulfuro (12%), Óxido Nitroso (4,2%), Formaldehído (2,1%) e Hidrogeno sulfurado (12%)

El peso de que posee esta alúmina dentro de los filtros es alrededor de 33200 libras en peso.

Con esto podemos determinar la cantidad de SO_2 eliminado en los filtros de adsorción de la planta, por lo cual en un marco teórico el dióxido debiese ser eliminado casi por completo, sino esto no ocurre, lo que sea arrastrado por la corriente gaseosa de aire será eliminado en los tamices, mediante dos tamices, la misma alúmina y el tamiz molecular 13x.

Con la planta a su máxima capacidad (112600 Nm^3/hora), con una cantidad másica de SO_2 de 2,12 libras / hora, los filtros debiesen adsorber alrededor de 1,8 libras / hora.

4.2 Compresor

En el proceso de compresión, se tiene dos compresores, los cuales cuentan con tres etapas, como lo mencionamos antes.

De acuerdo a las condiciones de entrada a los compresores se realizara una iteración, con la cual se pretende encontrar las temperaturas de salida, de cada etapa del compresor, para poder determinar si esta concuerdan con las temperaturas de diseño, es decir si los compresores trabajan al 100% o el rendimiento ha decaído más de lo esperado.

Para ello se utilizaron las siguientes ecuaciones, tomadas del Smith Van Ness como referencia.

4.2.1 Calculo de τ

Para comenzar con el cálculo del compresor, es decir, si está trabajando y rindiendo en lo se estipulo para su construcción, para ello calcularemos la relación de temperatura entre una de referencia (T_o) y la que pensamos que es la temperatura de trabajo.

$$\tau = \frac{T_2}{T_o}$$

Luego de obtener la relación de temperatura, calcularemos el cp/R , de tal forma de ingresarlo en la ecuación de T_2 y obtener la temperatura de salida de la primera etapa del compresor.

4.2.2 Calculo Cp/R

Para esto se utilizó las siguientes constantes (Anexo 4)

De Tabla	
A	3,355
B	5,75E-04
C	0,00E+00
D	-1,60E+03

$$\frac{Cp}{R} = A + \frac{B}{2} \times T_o \times (\tau + 1) + \frac{C}{3} \times T_o^2 \times (\tau^2 + \tau + 1) + \frac{D}{T_o \times \tau}$$

Obtenido el Cp/R y la división de las presiones de entrada salida, podemos obtener la temperatura de salida de las etapas, con la siguiente fórmula:

$$T_2 = T_1 \times \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{R/Cp}$$

Con T_2 calculado se hace una diferencia entre el valor obtenido y el valor dado, si esta diferencia es cero, esta será la temperatura de salida de nuestra etapa.

Obtenida esta temperatura y junto con la eficiencia que tiene el compresor (diseño), obtenemos el trabajo del compresor mediante la siguiente fórmula:

$$W_s = \frac{C_p \times (T_s - T_e)}{\eta}$$

Obtenido el trabajo real de la etapa, volvemos a iterar, de tal forma de encontrar la temperatura de salida real de cada etapa.

Para ello usaremos la expresión:

$$T_2 = T_e \times \frac{W_s}{C_p}$$

Obtenidas las tres temperaturas de salida de cada etapa del compresor obtendremos las caídas de presión que se generaran en cada etapa.

Usando las fórmulas que se encuentran en el anexo 3, sobre el diseño de intercambiadores de tubo y carcasa se obtuvieron los resultados siguientes:

Intercambiadores	Flujo Másico lb/hora	Qc BTU/hora	ΔT real °F	Rd	ΔP total Lb/pulg^2
C01.1E1	161686	-5,54E+6	49,89	0,0208	7,672
C01.1E2	161686	-4,06E+6	27,16	0,0244	1,349
C01.1E3	161686	-4,56E+6	45,46	0,0195	6,778

Luego de calcular las diferenciales de presión que se generaran en las distintas etapas del compresor, se calcula la cantidad de agua que se debe purgar en cada intercambiador, después de la hora de trabajo continuo, estos cálculos se realizaron mediante la tabla de Robitzsch's (anexo 5).

Las tablas que vienen a continuación denotan la cantidad de flujo de aire que pasa por cada intercambiador de cada etapa de enfriamiento que el compresor posee.

En las tablas 4.1, 4.2 y 4.3, muestran el flujo de agua que pasa por el intercambiador y el flujo que debe ser retirado cada hora, de tal manera de evitar la inundación de los intercambiadores inter etapas.

4.2.3 C01.1E1

PRIMER ENFRIADOR		
Humedad relativa	100	%
Flujo	56783,5	Nm3/hr
T2	27	°C
P2	1,665	Bar (a)
Presión de vapor	35,632	mBar
Cantidad de agua	17,594	gr H2O / Nm3 aire seco
Q2 =	999,071	Kgr H2O / hr
Flujo a purgar =	0	Kgr H2O / hr

Tabla 4. 1

4.2.4 C01.1E2

SEGUNDO ENFRIADOR		
Humedad relativa	100	%
Flujo	56783,5	Nm3/hr
T1	27	°C
P1	2,784	Bar (a)
Presión de vapor	35,632	mBar
Cantidad de agua	10,522	gr H2O / Nm3 aire seco
Q3 =	597,498	Kgr H2O / hr
Flujo a purgar =	401,573	Kgr H2O / hr

Tabla 4. 2

4.2.5 C01.1E3

TERCER ENFRIADOR		
Humedad relativa	100	%
Flujo	56783,5	Nm3/hr
T1	27	°C
P1	4,968	Bar (a)
Presión de vapor	35,632	mBar
Cantidad de agua	5,896	gr H2O / Nm3 aire seco
Q4 =	334,821	Kgr H2O / hr
Flujo a purgar =	262,677	Kgr H2O / hr

Tabla 4. 3

Luego de que pasa por el último enfriador la corriente de aire es llevado a un último enfriador donde es al igual que los inter etapas, un enfriador de tubo y carcasa.

Los cálculos se realizan por medio de las mismas formulas ocupadas anteriormente (anexo 3)

Lo que da como resultado, representado en la tabla 4:

	Flujo Masico kg/hr	Qc BTU/hr	ΔT real °F	Rd	ΔP_s Lb/pulg ²	ΔP_r Lb/pulg ²	ΔP_t Lb/pulg ²	ΔP_{total} Lb/pulg ²
E07.1	61652	-1,25E+6	12,73	0,0589	1,36	2,2	4,3	6,5
E07.2	61652	-1,13E+6	19,37	0,0515	1,36	1,3	3,6	4,9

Tabla 4. 4

Luego de este se determinara la cantidad de agua que se deberá purgar en cada intercambiador, después de la hora de trabajo continuo, estos cálculos se realizaron mediante la tabla de Robitzsch's (anexo 5).

Al igual que los intercambiadores inter etapas, los intercambiadores que se encuentras post compresor, también pueden generar inundaciones en sus carcasas, por tanto se calculó la cantidad de agua que debe retirarse cada hora para evitar la inundación en los equipos de los intercambiadores.

En la tabla 5 y 6 se muestra un resumen del flujo y condiciones del aire que pasa por los intercambiadores.

4.2.6 E07.1

ENFRIADOR E07.1		
Humedad relativa	100	%
Flujo	56783,5	Nm3/hr
T1	15	°C
P1	4,946	Bar (a)
Presión de vapor	17,844	mBar
Cantidad de agua	2,780	gr H2O / Nm3 aire seco
Q5 =	157,883	Kgr H2O / hr
Flujo a purgar =	104,794	Kgr H2O / hr

Tabla 4. 5

4.2.7 E07.2

ENFRIADOR E07.2		
Humedad relativa	100	%
Flujo	56783,5	Nm3/hr
T1	15	°C
P1	4,940	Bar (a)
Presión de vapor	17,844	mBar
Cantidad de agua	2,784	gr H2O / Nm3
		aire seco
Q5 =	158,074	Kgr H2O / hr
Flujo a purgar =	88,410	Kgr H2O / hr

Tabla 4. 6

Obtenidos los valores de purga conoceremos en que minuto se debe purgar el intercambiador de tal manera de no tener una inundación en algunos de estos.

4.3 Adsorción (Tamices R01 y R02)

La adsorción de CO_2 , SO_2 , H_2O e Hidrocarburos, se realiza en esta parte de la planta, ya que se cuenta con dos equipos, rellenos con tamiz 13x y alúmina.

Para obtener las cantidades de adsorción de estos compuestos usaremos los datos específicos que poseen cada tamiz molecular (anexo 6) y las condiciones de entrada a la planta.

Para los siguientes resultados, se usó las ecuaciones y constantes que se encuentran en el anexo 6.

Usando las ecuaciones del anexo 6, como ya se mencionó se obtiene las cantidades de adsorción tanto del CO_2 , SO_2 , agua e hidrocarburos, de tal manera obtener el calor a suministrar por nuestro calefactor.

Así se obtendrá una regeneración óptima para nuestros tamices.

Al considerar las condiciones de entrada, se obtendrá las Kcal necesarias, que se utilizaran para la regeneración de los tamices.

Cantidad de calor a
suministrar
Kcal
790834,609

Este resultado se da con la planta a condiciones normales para la cual fue diseñada, por lo cual el calor requerido para la regeneración y el flujo de nitrógeno que se necesita para dicha regeneración.

Cabe destacar que mientras menos flujo de entrada de aire que se tenga, mayor será el tiempo de regeneración de cada tamiz, ya que al haber menos flujo de entrada de aire, habrá menos flujo de nitrógeno, el cual es utilizado en la regeneración de los tamices.

Como se mencionó se necesita un calefactor el cual se encarga de calentar el flujo de nitrógeno antes de ser ingresado a los tamices para la regeneración.

4.4 Calefactores (E08)

Las propiedades de los calefactores son las siguientes, estas fueron obtenidas del libro de referencia del calefactor donde se indica el amperaje y potencia que esto necesitan.

Las tablas 7 y 8 denotan dos de las características que posee el calefactor E08

Calefactor 2/3	
765	Kw
850	A

Tabla 4. 7

Calefactor 1/3	
655	Kw
650	A

Tabla 4. 8

Los calefactores trabajan con un voltaje de 380 volts, que es trifásico.

A continuación la tabla 9, muestra la cantidad de kilo calorías entregadas por el calefactor, de tal manera de poder determinar con la temperatura de entrada y flujo de aire, el tiempo que debe funcionar cada calefactor de forma de poder generar un ahorro económico en esta parte de la planta.

Tabla de valores que entrega cada calefactor con un flujo de nitrógeno de 26729 Nm³/hr

Tiempo (min)	Potencia Calefactor 2/3 Kcal/min	Potencia Calefactor 1/3 Kcal/min	Potencia Conjunta Kcal/min
0	29,40	12,99	42,39
5	10821,38	8925,00	19746,38
10	10766,86	8876,62	19643,48
15	10845,22	8940,41	19785,63
20	10891,74	8987,37	19879,11
25	10855,49	8939,27	19794,76
30	10876,90	8928,14	19805,04
33	10852,49	8944,55	19797,05
35,5	10856,49	8947,98	19804,47
40	10815,10	4643,26	15458,36

Tabla 4. 9

La corriente de entrada que pasa por los calefactores (nitrógeno gas), es calculada como un porcentaje de lo que entra de aire, por ende la planta está ajustada al flujo de aire de entrada.

Obtenida dicha corriente se determinara la potencia que entregara cada calefactor, en dicho proceso. Por consiguiente se logró obtener la potencia que entregaran los dos calefactores en conjunto.

Y así saber el tiempo que se demoran en regenerar un tamiz de acuerdo a las condiciones de entrada (flujo, temperatura y presión)

Dicho cálculo se puede realizar con el amperaje que esta por diseño. Además se debe hacer la consideración que al comienzo estos no entregaran la Kcal calculadas, dado que les toma un tiempo llegar a su máxima potencia, con esto se dejó un tiempo acorde a los cálculos, que es alrededor de 3 a 4 minutos, que es lo que demoran en estar a su máxima potencia.

Por lo cual se dejó los valores registrados en el PI los primeros 4 minutos, para poder obtener una tabla más acorde a la realidad ocurrida.

En la figura 7 se muestra el esquema como se ubican los calefactores en el equipo de calefacción de la planta, de tal manera de poder saber el cual es el de mayor potencia.

Esquema de ubicación de los calefactores dentro del equipo E08

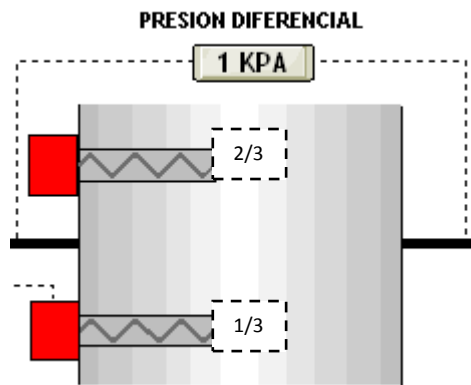


Figura 7

4.5 Turbocompresores

Los turbocompresores cuentan con un compresor, una turbina y un enfriador post compresor.

A continuación se muestra los valores nominales del compresor de los turbocompresores.

4.5.1 Compresor D01C

Al compresor llega el aire ya purificado por los tamices, la cantidad de aire puede ser manipulada por el operador, la cual se encuentra entre un 10 a un 18% del aire de entrada a la planta, esto se debe a que al final del proceso debe haber una desconcentración de elementos contaminantes.

Esto se debe a que la planta no debe producir menos de 600 Nm³/hr de LOX, oxígeno líquido, ya que si no ocurre esto la planta se llenaría de impurezas, las cuales dificultarían nuestro trabajo.

Para ello la planta trabaja con las siguientes condiciones:

Entrada			Salida		
Flujo	11450	Nm ³ /hr	Flujo	11450	Nm ³ /hr
Presión	4,864	Bar	Presión	7,178	Bar
Temperatura	27,2	°C	Temperatura	70,7	°C

Lo cual nos indica que hay un aumento de 3 bar aproximados y una elevación de temperatura de alrededor de 43°Celsius.

Estas serían las condiciones a las cuales operaría el compresor ubicado en el equipo turbocompresor.

Después de que el aire fue comprimido en esta turbina es enviado al enfriador principal para disminuir su temperatura antes de ingresar a la turbina para su expansión.

4.5.2 Turbina D01

La turbina se encarga de expandir el aire que proviene del enfriador principal, de tal manera de disminuir su presión, debido a que este aire expandido será enviado a la columna de baja presión, la cual trabaja a una presión de trabajo de 1,3 bar(a).

Condiciones de entrada y salida de la turbina. La turbina que está en la planta 3 necesita una presión mínima de partida que es de 3,5 Bar(a).

Entrada			Salida		
Flujo	11407	Nm3/hr	Flujo	11407	Nm3/hr
Presión	6,995	Bar	Presión	1,245	Bar
Temperatura	-121,6	°C	Temperatura	-173,8	°C

Lo cual nos indica que hay una disminución de casi 6 bar aproximados y disminución de temperatura de alrededor de 50°Celsius.

Estas serían las condiciones a las cuales operaría la turbina ubicada en el equipo turbocompresor.

4.6 Caja Fría

Para la caja fría, que es un conjunto de equipos de trabajo, los cuales cuenta con 2 enfriadores de 3 corrientes de entrada y 3 de salida cada enfriador, un enfriador principal el cual se encarga de disminuir y aumentar la temperatura de acuerdo sea el caso, una columna de mezclado y dos destilación, se hizo un balance de masa y energía global.

En las figuras 8 y 9 se indica un sinóptico de la caja fría y sus principales equipos de trabajo para la producción de oxígeno gaseoso y líquido.

Además de las principales corrientes y números asociados a los cálculos que realizaron para obtener el valor de la producción de oxígeno gaseoso.

4.6.1 Sinóptico caja fría

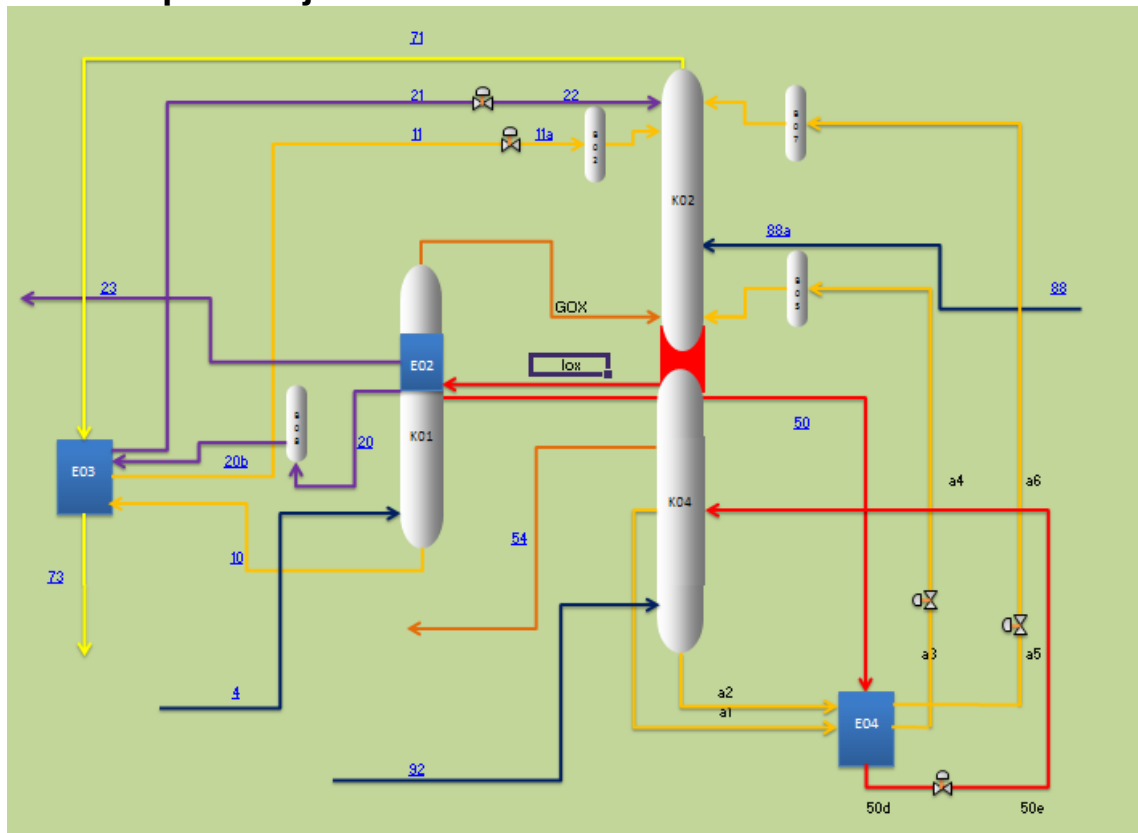


Figura 8

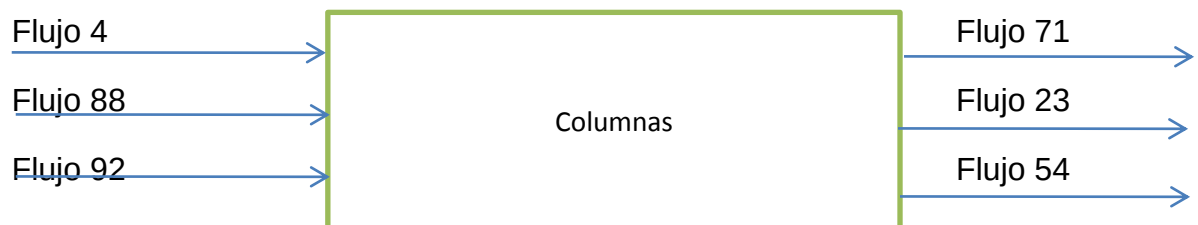


Figura 9

En las tablas 4.10 y 4.11 se muestran los balances que se realizaron para obtener los valores representados en la tabla 4.12, y así conocer la cantidad de oxígeno gaseoso, oxígeno líquido y lo que se envía a las atmósfera como nitrógeno de descarte.

				Fase Liquida			Fase Gas			Total		
Entrada	Flujo (Nm3/hr)	Fase Liquida (Nm3/hr)	Fase Gas (Nm3/hr)	oxigeno (kg/hr)	Nitrogeno (kg/hr)	Argon (kg/hr)	oxigeno (kg/hr)	Nitrogeno (kg/hr)	Argon (kg/hr)	oxigeno (kg/hr)	Nitrogeno (kg/hr)	Argon (kg/hr)
Flujo 4	73280	1421,87	71858,13	905,13	958,45	38,32	21058,94	70590,31	1140,68	21964,07	71548,76	1179,00
Flujo 88	11407	0,00	11407,00	0,00	0,00	0,00	3419,00	11137,51	183,53	3419,00	11137,51	183,53
Flujo 92	28880	0,00	28880,00	0,00	0,00	0,00	8656,14	28197,71	464,65	8656,14	28197,71	464,65
113567						1902				92789,93	34039,21	110883,98
						0,00				14740,03		
						0,00				37318,50		
						Masa fase Liquida (kg/hr)	1902	Masa fase Gas (kg/hr)		144848		

Tabla 4. 10

					Fase Liquida			Fase Gas		
Salidas	Flujo (Nm3/hr)	Fase Liquida (Litros/hr)	Fase Gas (Litros/hr)	Fase Gas (m3/hr)	oxigeno (kg/hr)	Nitrogeno (kg/hr)	Argon (kg/hr)	oxigeno (kg/hr)	Nitrogeno (kg/hr)	Argon (kg/hr)
Flujo 71	89699	0,00	2,24E+07	22362,20	0,00	0,00	0,00	1574,29	110270,39	659,52
LOX	600	752,63	0,00	0,00	839,12	0,64	22,07	0,00	0,00	0,00
Flujo 54	23268	0,00	2,00E+06	2001,73	0,00	0,00	0,00	31625,29	612,82	1145,87
113567							0,00			112504,21
							861,84			0,00
							0,00			33383,97
							Masa fase Liquida (kg/hr)	862	Masa fase Gas (kg/hr)	145888

Tabla 4. 11

	Flujo (Nm3/hr)	WN	GOX	LOX	Flujo (Nm3/hr)	
N2	88707,18	0,9835	0,0211	0,0011	89.698,37	WN
O2	23803,64	0,0123	0,9505	0,9780	23.270,92	GOX
Ar	1056,17	0,0043	0,0285	0,0209	597,71	LOX

Tabla 4. 12

Estos genero los resultados descritos en la tabla anterior lo cual indica que se genera el nitrógeno gaseoso casi puro y la cantidad de oxígeno gaseoso que se requiere para la producción de cobre.

Actualmente la planta requiere de más oxígeno gaseoso para la producción de cobre, dado los requerimientos del mercado actual, por tal, se requiere aumentar la producción de oxígeno gaseoso, para ello se propondrán cumplir los siguientes objetivos, los cuales nos ayudaran a determinar si la planta está en condiciones de cumplir esta nueva producción.

4.7 Objetivo

Determinar si existe la factibilidad de aumentar la producción de la planta de oxígeno número 3 de la Fundición Caletones División El Teniente

4.8 Objetivos Específicos

Determinar las causas que no permiten un desempeño mayor de la planta.

Determinar la cantidad exacta de aire para una separación de sus componentes en forma adecuada.

Determinar si los equipos están en condiciones de soportar un aumento en la cantidad de aire de entrada.

Determinar si los adsorbentes con los cuales trabaja la planta son los más aptos para el proceso de adsorción.

Capítulo 5: Análisis y Cálculos de la nueva Producción de la Planta de Oxígeno 3

5. Análisis de la Planta de Oxígeno N°3

- Capacidad de los equipos para trabajar con una nueva carga
- Resistencia de los materiales (cañerías, válvulas, etc.)
- Capacidad de enfriamiento de los intercambiadores de la caja fría
- Separados de líquido – gas (capacidad de separación de diferentes presiones y temperaturas)
- Sistema de enfriamiento de la planta
- Análisis de las impurezas de la Planta

5.2 Desarrollo de los equipos de la Planta de Oxígeno Numero 3 con la nueva carga (130.000 Nm³/hr de aire seco)

Antes de comenzar equipo por equipo realizaremos un cálculo en el cual determinaremos la cantidad de agua que ira en el aire de acuerdo a las condiciones de entrada que este tenga temperatura y presión.

Cabe decir que los cálculos que se realizaran a continuación fueron en base a estos datos que mostraremos en la tabla 5.1:

Humedad Relativa	80	%
Temperatura de entrada	20	°C
Presión de Entrada	0,85	Bar

Tabla 5. 1

Dado esto se calculó la masa total de entrada de aire húmedo y la composición que tendría de acuerdo a la humedad relativa de la estipulada, la cual da los siguientes resultados que se muestran en la tabla 5.2:

kg de agua/Nm ³ de aire seco	22,324	
Kg de agua a la entrada	2.322	kg/hrs
masa total a la entrada	170.452	kg/hrs

Tabla 5. 2

Con la composición obtenida en la tabla 5.3, se observa que la composición del aire no variaría mucho de acuerdo al agua ingresado, lo que importa es la cantidad de agua que ingresa a la planta de acuerdo al flujo de aire ingresado.

Compuesto	%	Mol (kgmol/hrs)	Masa (kg/hrs)	Composición molar aire húmedo	Presión parcial (bar)
N2	78,084	4533,96	126950,81	0,7639	0,6493
O2	20,9476	1216,33	38922,4	0,2049	0,1742
Ar	0,934	54,23	2169,31	0,0091	0,0078
CO2	0,0314	1,82	80,22	0,0003	0,0003
SO2	0,0003	0,02	1,11	2,93E-06	2,49E-06
N2O	0,00257	0,15	6,57	2,51E-05	2,14E-05
CH4	0,00013	0,01	0,12	1,27E-06	1,08E-06
H2O		128,98	2321,65	0,0217	0,0185
total	100	5935,49	170452,2	1	0,85

Tabla 5. 3

Con esto se puede determinar la cantidad de SO₂ que será eliminada en los filtros Purafill y la masa de aire húmedo y seco que ira a la etapa de compresión.

5.2.1 Filtros

Los filtros que posee la planta de Oxígeno número 3 poseen características que pueden detener las impurezas que tiene el aire, sin importar el flujo que este tenga.

La diferencia radicaría, que los filtros Purafill con los cuales se dispone, tendrían una vida útil menor a la actual, dado que se trabajara con cantidad mayor de aire de entrada, el panel que se verá más afectado, es panel químico.

El cambio de los paneles, se realizaría cuando estos se saturasen, con la carga actual, tienen una duración promedio de 2 años.

Dado lo resultados obtenidos, si se genera un cambio en la cantidad de aire de entrada (130.000 Nm³/hrs), el panel químico tendría que renovarse alrededor del año, debido al aumento de flujo, habría una mayor cantidad de impurezas que contener.

A continuación, comienza el proceso de compresión del aire, el cual tiene una capacidad de compresión de 5 bares a la finalización de las 3 etapas, tanto de compresión como enfriamiento.

De acuerdo al aire ingresado y la capacidad de adsorción que tienen los filtros podemos determinar cuándo debiesen cambiarse los paneles de alúmina que los filtros poseen y la masa que trabajaremos a lo largo del proceso de obtención de oxígeno gaseoso, la cual se muestra en la tabla 5.4:

Masa de SO ₂ de entrada	2,45	lb/hrs	
Cantidad de SO ₂ eliminado en los filtros		2,41	lb/hrs
Cantidad de SO ₂ eliminado en los filtros		58	lb/día
Cantidad de SO ₂ eliminado en los filtros		21.077	lb/año
Cambio de Alumina		42.154	lb/cada 2 años
Masa que va a los compresores con agua		170.451,10	kg/hrs
Masa que va a los compresores sin agua		168.128,36	kg/hrs

Tabla 5. 4

5.2.2 Compresores

Dentro de la planta se cuenta con dos compresores adiabáticos de 3 etapas, los cuales cuentan con enfriadores inter etapas, como se mencionó antes.

Los compresores pueden soportar una cantidad de aire, que es alrededor de los 67.500 Nm³/hr, esto se debe a que el compresor tiene una potencia máxima de trabajo de 5400 KW, si se realiza dicho cambio en la entrada de aire, el equipo actual podría soportar, dada la siguiente gráfica, figura 10.

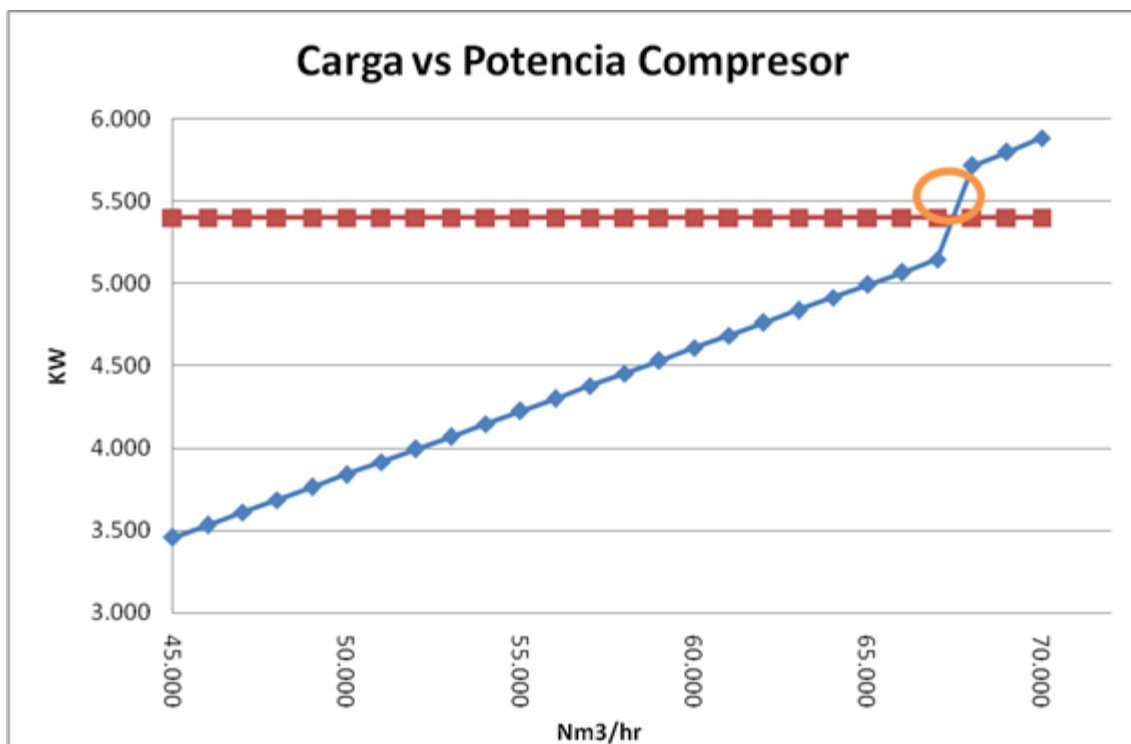


Figura 10

El motor que posee cada compresor es de una potencia nominal de 5400 KW, por tanto al aumentar el aire de entrada, el equipo estaría en condiciones de operar. No obstante hay que saber, si la caja incrementadora que posee el compresor, es capaz de trabajar a dichas condiciones.

El problema en ello será que al haber un aumento, los enfriadores inter etapa no serán capaces de soportar un cambio drástico en su trabajo habitual y que los post-enfriadores no estarían en condiciones de aliviar el proceso de enfriado de los intercambiadores inter etapa.

Dado esto, no tendrían la capacidad de disminuir la temperatura que se necesita, para una adsorción adecuada en los tamices.

En cambio al trabajar con un flujo de alrededor de 65000 Nm3/hr en cada compresor, cada equipo por separado tendría la capacidad de poder funcionar sin mayores problemas

A continuación se presentan los resultados de los equipos significativos de la planta de obtención de oxígeno gaseoso, con un flujo de 130.000 Nm3/hr de entrada de aire al proceso de producción.

5.2.2.1 Etapa 1

Interpolación para el cálculo de la temperatura de salida del compresor y el trabajo isentropico que hará esta.

Lo primero es tener una temperatura de referencia, la cual será de 25° Celsius (T_o).

Calculo de τ

Para comenzar con el cálculo del compresor, es decir, si está trabajando y rindiendo en lo se estipulo para su construcción, para ello calcularemos la relación de temperatura entre una de referencia (T_o) y la que pensamos que es la temperatura de trabajo.

$$\tau = \frac{T_2}{T_o}$$

Luego de obtener la relación de temperatura, calcularemos el cp/R , de tal forma de ingresarlo en la ecuación de T_2 y obtener la temperatura de salida de la primera etapa del compresor.

Calculo Cp/R

Para esto se utilizó las siguientes constantes (Anexo 4)

$$\frac{Cp}{R} = A + \frac{B}{2} \times T_o \times (\tau + 1) + \frac{C}{3} \times T_o^2 \times (\tau^2 + \tau + 1) + \frac{D}{T_o \times \tau}$$

Obtenido el Cp/R y la división de las presiones de entrada salida, podemos obtener la temperatura de salida de las etapas, con la siguiente fórmula:

$$T_2 = T_1 \times \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{R/Cp}$$

Con T_2 calculado se hace una diferencia entre el valor obtenido y el valor dado, si esta diferencia es cero, esta será la temperatura de salida de nuestra etapa.

Obtenida esta temperatura y junto con la eficiencia que tiene el compresor (diseño), obtenemos el trabajo del compresor mediante la siguiente fórmula:

$$W_s = \frac{Cp \times (T_s - T_g)}{\eta}$$

Obtenido el trabajo real de la etapa, volvemos a iterar, de tal forma de encontrar la temperatura de salida real de cada etapa.

Para ello usaremos la expresión:

$$T_2 = T_e \times \frac{W_s}{C_p}$$

Con estas ecuaciones obtenemos los resultados mostrados en la tabla 5.5:

T2' (kelvin) dado	T2' (kelvin) Calculado	ΔT2' Calculado	τ=T2'/To Final	Cp/R Final	Cp(J/mol K) Final	WsJ/mol
300	372,12	72,12	1,2481	3,5333	29,376	2172,99
310	372,04	62,04	1,2478	3,5333	29,375	2170,60
320	371,96	51,96	1,2476	3,5332	29,375	2168,23
330	371,88	41,88	1,2473	3,5332	29,375	2165,89
340	371,80	31,80	1,2470	3,5332	29,375	2163,58
350	371,73	21,73	1,2468	3,5332	29,375	2161,29
360	371,65	11,65	1,2465	3,5331	29,374	2159,02
370	371,57	1,57	1,2463	3,5331	29,374	2156,77
380	371,50	-8,50	1,2460	3,5331	29,374	2154,55
390	371,42	-18,58	1,2458	3,5331	29,374	2152,34
400	371,35	-28,65	1,2455	3,5330	29,374	2150,14
410	371,28	-38,72	1,2453	3,5330	29,373	2147,97
420	371,20	-48,80	1,2450	3,5330	29,373	2145,80
430	371,13	-58,87	1,2448	3,5330	29,373	2143,65
440	371,06	-68,94	1,2445	3,5329	29,373	2141,52
450	370,99	-79,01	1,2443	3,5329	29,373	2139,40
460	370,92	-89,08	1,2441	3,5329	29,372	2137,29
470	370,84	-99,16	1,2438	3,5329	29,372	2135,19
480	370,77	-109,23	1,2436	3,5328	29,372	2133,10
490	370,70	-119,30	1,2433	3,5328	29,372	2131,03
500	370,63	-129,37	1,2431	3,5328	29,372	2128,96

Tabla 5. 5

Luego de esto se obtiene el trabajo y una temperatura aproximados a la realidad, las cuales se muestran en la tabla 5.6:

Trabajo	7,48E+09	Joule/hr
Temperatura	98,39	Celsius

Tabla 5. 6

Luego de obtener estos datos se realiza una nueva interpolación con el objeto de obtener la temperatura real de salida del compresor, comenzando con la temperatura obtenida la nueva interpolación, la cual da los siguientes resultados, que se encuentran en la tabla 5.7.

De tal forma de poder obtener la temperatura de salida y el trabajo que realizara la primera etapa del compresor.

T2' (kelvin) dado	$\tau=T2'/T_o$ calculado	T2' (kelvin) Calculado	$\Delta T2'$ Calculado
371,54	1,246	385,94	14,40
381,54	1,280	385,86	4,32
391,54	1,313	385,78	-5,76
401,54	1,347	385,70	-15,84
411,54	1,380	385,62	-25,92
421,54	1,414	385,55	-36,00
431,54	1,447	385,47	-46,08
441,54	1,481	385,39	-56,15
451,54	1,514	385,31	-66,23
461,54	1,548	385,24	-76,31
471,54	1,582	385,16	-86,38
481,54	1,615	385,08	-96,46
491,54	1,649	385,01	-106,53

Tabla 5. 7

Con esta tabla se realiza una interpolación simple de tal manera de obtener la temperatura real, o la que se acerca mayormente y esta es, tabla 5.8:

Trabajo	2078,842	KW/hr
Temperatura	112,68	Celsius

Tabla 5. 8

Con esto se procede a calcular las siguientes etapas tanto de los compresores como las de los enfriadores que se encuentran inter etapa y post etapas.

5.2.2.2 Etapa 2

Interpolación para el cálculo de la temperatura de salida del compresor y el trabajo isentropico, el cual sigue el mismo procedimiento indicado en la etapa 1, dando como resultado finales la tabla 5.9.

Trabajo	1375,840	KW/hr
Temperatura	90,95	Celsius

Tabla 5. 9

5.2.2.3 Etapa 3

Interpolación para el cálculo de la temperatura de salida del compresor y el trabajo isentropico el cual sigue el mismo procedimiento indicado en la etapa 1, dando como resultado finales la tabla 5.10.

Trabajo	1538,930	KW/hr
Temperatura	97,82	Celsius

Tabla 5. 10

Finalmente el trabajo final que realizara nuestro compresor durante las tres etapas que tiene la etapa de compresión sería:

Potencia	4993,611	KW
----------	----------	----

5.2.3 Enfriadores Inter etapa y enfriador post compresor

En la tabla 1 se presentaran los resultados del trabajo de los intercambiadores inter etapa y pos etapa de la compresión del aire de entrada a la planta.

	Flujo Masico lb/hr	Qc BTU/hr	ΔT real °F	Rd	ΔP_{total} Lb/pulg^2
C01.1E1	185028,84	-6,34E+06	49,89	0,0200	10,047
C01.1E2	185028,84	-4,65E+06	27,16	0,0232	1,767
C01.1E3	185028,84	-5,21E+06	45,46	0,0188	8,876

Tabla 5. 11

Como se observa en la tabla 5.11, los resultados de la caída de presión en la primera etapa de enfriamiento es muy cercana al límite, por ende esto generara complicaciones a largo plazo dado que habrá un desgaste mayor en el equipo.

Luego de este se determina la cantidad de agua que se debe purgar en cada intercambiador, después de la hora de trabajo continuo, estos cálculos se realizaron mediante la tabla de Robitzsch's (anexo 5), y se muestran en las tablas 5.12, 5.13 y 5.14.

5.2.3.1 C01.1E1

PRIMER ENFRIADOR		
Humedad relativa	100	%
Flujo	65.897	Nm3/hr
T2	33	°C
P2	1,665	Bar (a)
Presión de vapor	50,270	mBar
Cantidad de agua	25,200	gr H2O / Nm3 aire seco
Q2 =	1660,630	Kgr H2O / hr
Flujo a purgar =	0	Kgr H2O / hr

Tabla 5. 12

5.2.3.2 C01.1E2

SEGUNDO ENFRIADOR		
Humedad relativa	100	%
Flujo	65.897	Nm3/hr
T1	30	°C
P1	2,784	Bar (a)
Presión de vapor	42,486	mBar
Cantidad de agua	12,610	gr H2O / Nm3 aire seco
Q3 =	830,987	Kgr H2O / hr
Flujo a purgar =	829,643	Kgr H2O / hr

Tabla 5. 13

5.2.3.3 C01.1E3

TERCER ENFRIADOR		
Humedad relativa	100	%
Flujo	65.897	Nm3/hr
T1	30	°C
P1	4,968	Bar (a)
Presión de vapor	42,486	mBar
Cantidad de agua	7,066	gr H2O / Nm3 aire seco
Q4 =	465,662	Kgr H2O / hr
Flujo a purgar =	365,325	Kgr H2O / hr

Tabla 5. 14

Luego de que pasa por el último enfriador la corriente de aire es llevado a un último enfriador de tubo y carcasa.

El cálculo paso a paso de cada intercambiador de tubo y carcasa se encuentran en el anexo 3.

Lo que nos da como resultado la tabla 5.15:

	Flujo Masico kg/hr	Qc BTU/hr	ΔT real °F	Rd	ΔP_s Lb/pulg^2	ΔP_r Lb/pulg^2	ΔP_t Lb/pulg^2	ΔP_{total} Lb/pulg^2
E07.1	70553	-1,43E+6	12,73	0,0553	1,78	2,3	5,4	7,7
E07.2	70553	-1,29E+6	19,37	0,0490	1,78	1,5	4,2	5,7

Tabla 5. 15

En las tablas 5.16 y 5.17, se observa la cantidad de agua que se va acumulando en cada intercambiador post etapa, para ello se calcula el agua acumulada en cada intercambiador mediante la tabla de Robitzsch's (anexo 5), ya que esta agua debe ser extraída de los intercambiadores de manera tal de evitar posibles inundaciones dentro de los equipos de intercambio de calor.

5.2.3.4 E07.1

ENFRIADOR E07.1		
Humedad relativa	100	%
Flujo	65.897	Nm3/hr
T1	20	°C
P1	4,946	Bar (a)
Presión de vapor	23,369	mBar
Cantidad de agua	3,837	gr H2O / Nm3 aire seco
Q5 =	252,830	Kgr H2O / hr
Flujo a purgar =	212,832	Kgr H2O / hr

Tabla 5. 16

5.2.3.5 E07.2

ENFRIADOR E07.2		
Humedad relativa	100	%
Flujo	65.897	Nm3/hr
T1	20	°C
P1	4,940	Bar (a)
Presión de vapor	23,369	mBar
Cantidad de agua	3,841	gr H2O / Nm3
		aire seco
Q5 =	253,135	Kgr H2O / hr
Flujo a purgar =	213,506	Kgr H2O / hr

Tabla 5. 17

Obtenidos los valores de purga se determina en que tiempo exacto se debe efectuar la purga de los equipos de intercambio de calor de manera tal de evitar su inundación.

Con estos valores se puede determinar la cantidad de aire seco y húmedo que va a la etapa de purificación, tabla 5.18:

Flujo de agua total a tamices	505,96	kg/hrs
Flujo de aire con agua total a tamices	170.957,07	kg/hrs
Flujo de aire con agua total a tamices	132.185,68	Nm3/hrs

Tabla 5. 18

5.2.4 Tamices

En la etapa de adsorción que posee la planta se determinara la cantidad de agua y CO₂ que serán adsorbidos en esta etapa de la planta, dado que esta etapa es esencial para el trabajo de la caja fría y los turbocompresores que posee la planta, ya que de acuerdo a la purificación que tenga el aire se podrá evitar un ensuciamiento de los equipos que viene a continuación después de la etapa de purificación.

Con estos obtenemos los siguientes valores de adsorción tanto del agua como el CO₂:

Alúmina:

P'pH ₂ O mmHg	K	PpH ₂ O mmHg	masa H ₂ O Kg/seg	Tiempo de permanencia del aire en la alumina min	Saturación Alumina Kg H ₂ O/100 kg de Alumina	Ciclo de la Alumina min	Agua Acumulada Kg
0,196	1,015	0,199	0,001617	0,045	5,263	151,601	882,766

Tamiz 13x:

C	t sieve min	t sieve(corregido) min	X tamiz	Masa de CO ₂ en el aire de entrada Kg	CO ₂ Acumulado Kg
1,012	129,475	131,016		80,223	88,872

Dando como resultado la cantidad de calor, tabla 5.19, que debe ser suministrado por el calefactor para la desorción de estos componentes.

Cantidad de calor a suministrar Kcal
818.922,89

Tabla 5. 19

Obtenidas las cantidades de adsorción del proceso, podremos determinar, mediante cálculos la cantidad de aire que ingresara a la caja fría y a los turbocompresores.

Para ello el calefactor que tiene la planta deberá entregar una cierta cantidad de energía la cual esta descrita en la siguiente tabla, de acuerdo a la temperatura de entrada que tenga el aire.

Además de acuerdo al flujo de entrada del aire a la planta el nitrógeno que se usara como elemento de desorción será aproximadamente de 31000 Nm³/hr.

En la Tabla 5.20 se muestran los valores cuantitativos de las calorías entregadas por los calefactores al momento de la desorción en los tamices, esta tabla tiene la intención de demostrar que cantidad de energía se debiese suministrar al flujo de nitrógeno para que este en su salida tuviese una temperatura constante de 150° Celsius, ya que es la temperatura ideal para que la alúmina y el tamiz 13x tengan una buena desorción:

Temperatura de entrada °C	Temperatura de salida °C	Masa Lb/hr	Q Kcal/min
---------------------------------	-----------------------------	---------------	---------------

8	150	85.788,51	22.831,98
9	150	85.788,51	22.672,98
10	150	85.788,51	22.513,97
11	150	85.788,51	22.354,94
12	150	85.788,51	22.195,90
13	150	85.788,51	22.036,83
14	150	85.788,51	21.877,75
15	150	85.788,51	21.718,65
16	150	85.788,51	21.559,54
17	150	85.788,51	21.400,40
18	150	85.788,51	21.241,25
19	150	85.788,51	21.082,08
20	150	85.788,51	20.922,89
21	150	85.788,51	20.763,68
22	150	85.788,51	20.604,46
23	150	85.788,51	20.445,21
24	150	85.788,51	20.285,94

Tabla 5. 20

Pasado por el proceso de limpieza del aire, adsorción de agentes contaminantes que posee el aire, el aire limpio (tabla 5.21) que posee las siguientes características en enviado a las torres de destilación e intercambiadores para la producción de oxígeno gaseoso.

Para ello el aire limpio es enviado a los turbocompresores para ser comprimido y expandido en esta etapa.

	Mol(kgmol/hrs)	Salida Moles(kgmol/hrs)	Masa Salida(kg/hrs)	Salida(Nm3/hrs)	Composición
--	----------------	----------------------------	------------------------	-----------------	-------------

N2	4.533,96	4.533,96	126.950,81	101.560,65	0,78
O2	1.216,33	1.216,33	38.922,40	27.218,46	0,21
Ar	54,23	54,23	2.169,31	1.253,94	0,01
CO2	1,82	0	0	0	0
SO2	0,02	0	0	0	0
N2O	0,15	0	0	0	0
CH4	0,01	0	0	0	0
H2O	128,98	0	0	0	0
total	5.935,49	5.804,52	168.042,52	130.033,05	1

Tabla 5. 21

5.2.5 Turbocompresores

Los turbocompresores como se mencionó antes constan de dos equipos en conjunto, los cuales son un compresor y una turbina para la expansión del aire.

5.2.5.1 Compresor

Con un flujo de entrada de aire al compresor de 13.103 Nm³/hr lo cual nos da un flujo másico aproximado de:

Flujo Másico	16.903,43	kg/hr
--------------	-----------	-------

Interpolación para el cálculo de la temperatura de salida del compresor y el trabajo isentropico que hará esta (anexo 7).

Luego de esto obtenemos un trabajo y una temperatura aproximados a la realidad que serían estas:

Trabajo	7,49E+08	Joule/hr
Temperatura	62,28	Celsius

Luego de obtener estos datos se realiza una nueva interpolación, de tal forma de lograr obtener la temperatura mucho más cercana a lo que sería la real, para ello se comienza usando la temperatura que calculamos anteriormente, dado que la temperatura obtenida es el punto de comienzo de nuestra nueva interpolación, dado esto los resultados se muestran en el anexo 7.

De tal forma de poder obtener nuestra temperatura de salida y el trabajo que realizara el compresor.

Con esta tabla se realiza una interpolación simple de tal manera de obtener la temperatura real, o la que se acerca mayormente a esta la cual sería, tabla 5.22:

Trabajo	1254,5	KW/hr
Temperatura	71,025	Celsius

Tabla 5. 22

5.2.5.2 Turbina

A continuación se muestra los cálculos que se estimen convenientes de forma de poder determinar la temperatura de salida y el trabajo que realizara la turbina (anexo 8).

Realizada el trabajo de obtener la temperatura y el trabajo que realiza nuestra turbina, los resultados serían los siguientes:

Trabajo	-1,21E+09	Joule/hr
Temperatura	-175,54	Celsius

Obtenidos los datos de temperatura y trabajo se procede a realizar una nueva interpolación, de forma de obtener la temperatura real de salida de la turbina, para este trabajo se comienza la interpolación con la temperatura obtenida anteriormente, denotando los siguientes resultados:

Con esto se obtiene la temperatura final:

Temperatura	-184,824	Celsius
-------------	----------	---------

Obtenida nuestra temperatura real, se procede a calcular el trabajo real que hará nuestra turbina, para ello se utiliza la temperatura y presión reducida del aire, obtenidas del libro Smith Van Ness.

Tr2 aire	0,6672	Kelvin
Pr2 aire	0,0331	Bar

B0	-0,7233
dB0/dTr	1,9332
B1	-0,8022
dB1/dTr	5,922

H2r/(R*Tc)	-0,0721	
S2r/R	-0,0708	
H2r	-79,3404	J/mol
S2r	-0,5883	J/(mol*k)

Con esto se obtiene el trabajo realizado por la turbina:

Ws	-1673,26868	J/mol
----	-------------	-------

Obtenido el trabajo de la turbina se realiza el balance másico de la caja fría, tabla 5.24, de tal manera de poder determinar si la planta estaría en condiciones de soportar la nueva carga y si la producción de oxígeno gaseoso será la que se desea, tabla 5.25.

Dado los resultados obtenidos, los equipos que actualmente se encuentran en la producción de oxígeno gaseoso de la planta de oxígeno número tres de Caletones, estarían en condiciones de poder trabajar sin problemas con la nueva carga de aire, dado que el trabajo, temperatura y presión que se calculó estarían en los parámetros de resistencia que poseen estos equipos.

Dado esto se procede a realizar el balance de masa para determinar si es factible aumentar la producción de oxígeno gaseoso a los valores que se requiere.

5.3 Caja Fría

				Fase Liquida			Fase Gas			Total			
Entrada	Flujo (Nm3/hr)	Fase Liquida (Nm3/hr)	Fase Gas (Nm3/hr)	oxigeno (kg/hr)	Nitrogeno (kg/hr)	Argon (kg/hr)	oxigeno (kg/hr)	Nitrogeno (kg/hr)	Argon (kg/hr)	oxigeno (kg/hr)	Nitrogeno (kg/hr)	Argon (kg/hr)	
Flujo 4	83848	1621,07	82226,84	1031,77	1092,72	43,89	24093,58	80775,19	1311,4	25125,34	81867,92	1355,3	108348,5
Flujo 88	13103	0	13103,43	0	0	0	3927,46	12793,86	210,82	3927,46	12793,86	210,82	16932,1
Flujo 92	33082	0	33081,71	0	0	0	9915,51	32300,15	532,25	9915,51	32300,15	532,25	42747,9
130033						2168,38			106180,17	38968,32	126961,93	2098,37	168028,6
						0			16932,15				
						0			42747,92				
						Masa fase Liquida (kg/hr)	2168,38	Masa fase Gas (kg/hr)	165860,24				

Tabla 5. 23

Salidas	Flujo (Nm3/hr)	Fase Gas (m3/hr)	Fase Liquida			Fase Gas		
			oxigeno (kg/hr)	Nitrogeno (kg/hr)	Argon (kg/hr)	oxigeno (kg/hr)	Nitrogeno (kg/hr)	Argon (kg/hr)
Flujo 71	102695	17681,97	0	0	0	1802,4	126247,69	755,08
LOX	230	0	322,34	0,25	8,48	0	0	0
Flujo 54	27108	2332,02	0	0	0	36843,59	713,93	1334,94
130033					0			128805,17
					331,06			0
					0			38892,46
					Masa fase Liquida (kg/hr)	331,06	Masa fase Gas (kg/hr)	167697,63

Tabla 5. 24

	Flujo (Nm3/hr)	WN	GOX	LOX	Flujo (Nm3/hr)	
N2	101569,54	0,9835	0,0211	0,0011	102.695,03	WN
O2	27250,57	0,0123	0,9505	0,978	27.107,53	GOX
Ar	1212,93	0,0043	0,0285	0,0209	230,48	LOX

Tabla 5. 25

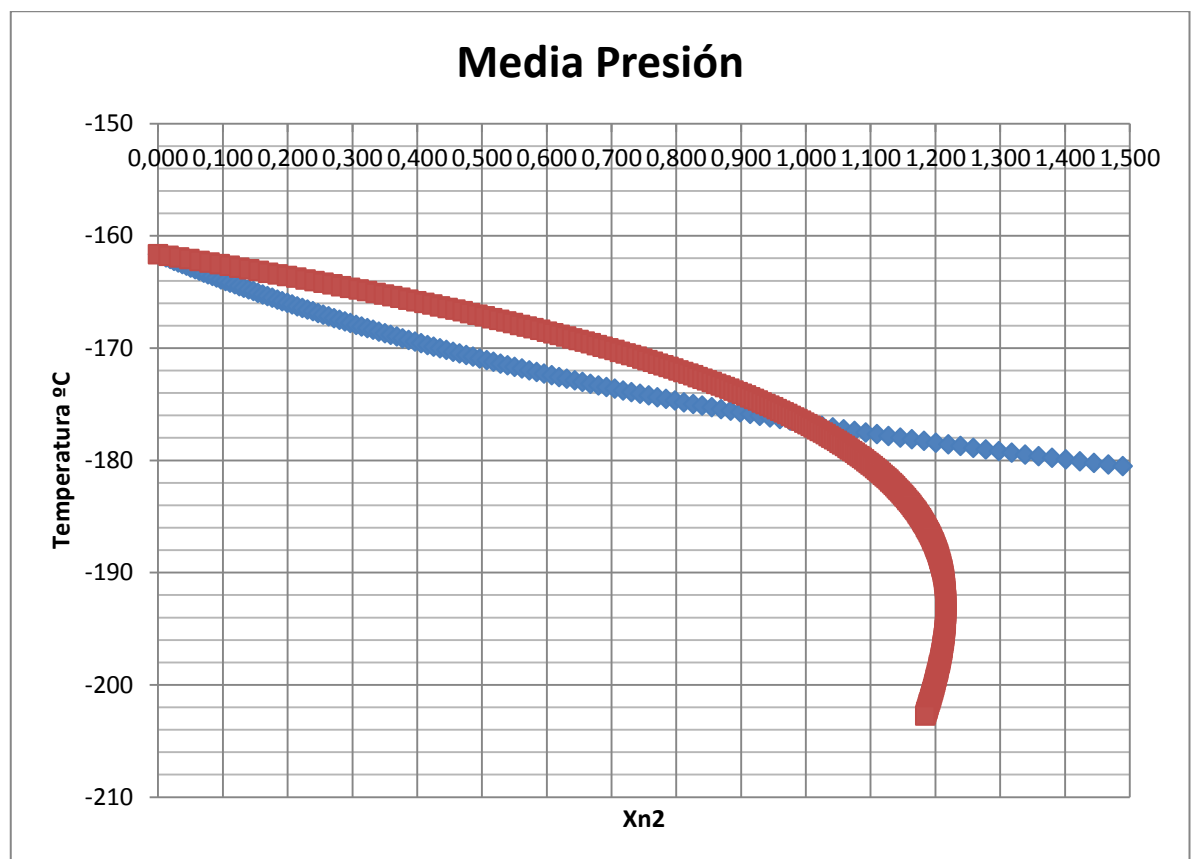
Columnas de destilación

En la etapa de separación de los componentes del aire tenemos dos torres de destilación y una de mezclado, las cuales son: la columna de media presión (K01), la columna de baja presión (K02) y la columna de mezclado (K04).

Columna de Media Presión

La columna de media presión, es la primera etapa de separación de los componentes del aire que entran a la planta. Estas corrientes provienen de la etapa de purificación del aire y el sistema de enfriamiento.

Por lo cual, en la siguiente tabla se colocara los datos de equilibrio para la columna de media presión y la gráfica correspondiente, liquido vapor.



A continuación se calculara los datos críticos de cada corriente de la columna de media presión.

Corriente 4:

Presión 4,923 bar

	%	T(°C)	Psat	k	x	y	Entalpía Vapor	$\Delta H_v(T_b)$ (KJ/mol)	Entalpía Molar
N2	0,78	-174,51	7,17	1,457	0,539	0,785	-5800,54	4,49	-4530,85
O2	0,20		2,27	0,460	0,445	0,204	-5816,27	6,46	-1219,15
Ar	0,00		2,90	0,588	0,015	0,009	-4144,35	5,36	-38,54
									-5788,54

Pr	Pb	alfa	alfa rev	L	V
4,889	6,106	0,020	1,98E-02	0,019	0,981

Corriente 10:

Presión 6,1107 bar

	%	T(°C)	Psat	k	Entalpía Vapor	$\Delta H_v(T_b)$ (KJ/mol)	Entalpía Molar
N2	0,5751	172,03	8,54	1,3969	-5728,06	4,33	-3294,70
O2	0,4102		2,80	0,4583	-5743,78	6,35	-2356,67
Ar	0,0145		3,53	0,5784	-4092,71	5,26	-59,41
							-5710,77

Pr	Pb	alfa	alfa rev	L	V
4,588	6,111	675759,605	6,76E+05	1,000	0,000

Corriente 20:

Presión 6,1026 bar

	%	T(°C)	Psat	k	Entalpía Vapor	$\Delta H_v(T_b)$ (KJ/mol)	Entalpía Molar
N2	0,9704	-176,4	6,23	1,020476138	-5856,91	4,60	-5684,12
O2	0,0249		1,91	0,312524068	-5872,65	6,55	-146,81
Ar	0,00450		2,47	0,404534981	-4184,50	5,43	-18,84
							-5849,77

Pr	Pb	alfa	alfa rev	L	V
5,856	6,103	3431,369	3,43E+03	1,000	0,000

Corriente 23:

Presión 6,1026245 bar

	%	T(°C)	Psat	k	Entalpía Vapor	$\Delta H_v(T_b)$ (KJ/mol)	Entalpía Molar
N2	0,9704	-176,4	6,23	1,020472041	-5856,91	4,60	-5684,12
O2	0,0249		1,91	0,312524068	-5872,65	6,55	-146,81
Ar	0,0045		2,47	0,404534981	-4184,50	5,43	-18,84
							-5849,77

Pr	Pb	alfa	alfa rev	L	V
5,856	6,103	271821,304	2,72E+05	1,000	0,000

Corriente LOX:

Presión 4,653 bar

	%	T(°C)	Psat	k	Entalpía Vapor	$\Delta H_v(T_b)$ (KJ/mol)	Entalpía Molar
N2	0,0011	-161,6	16,16	3,473847207	-5426,31	3,54	-5,72
O2	0,9780		6,09	1,308706901	-5442,14	5,85	-5322,42
Ar	0,0209		7,35	1,579373826	-3877,66	4,81	-81,22
							-5409,36

Pr	Pb	alfa	alfa rev	L	V
6,115	6,126	-3,456	0,00E+00	1,000	0,000

Corriente GOX:

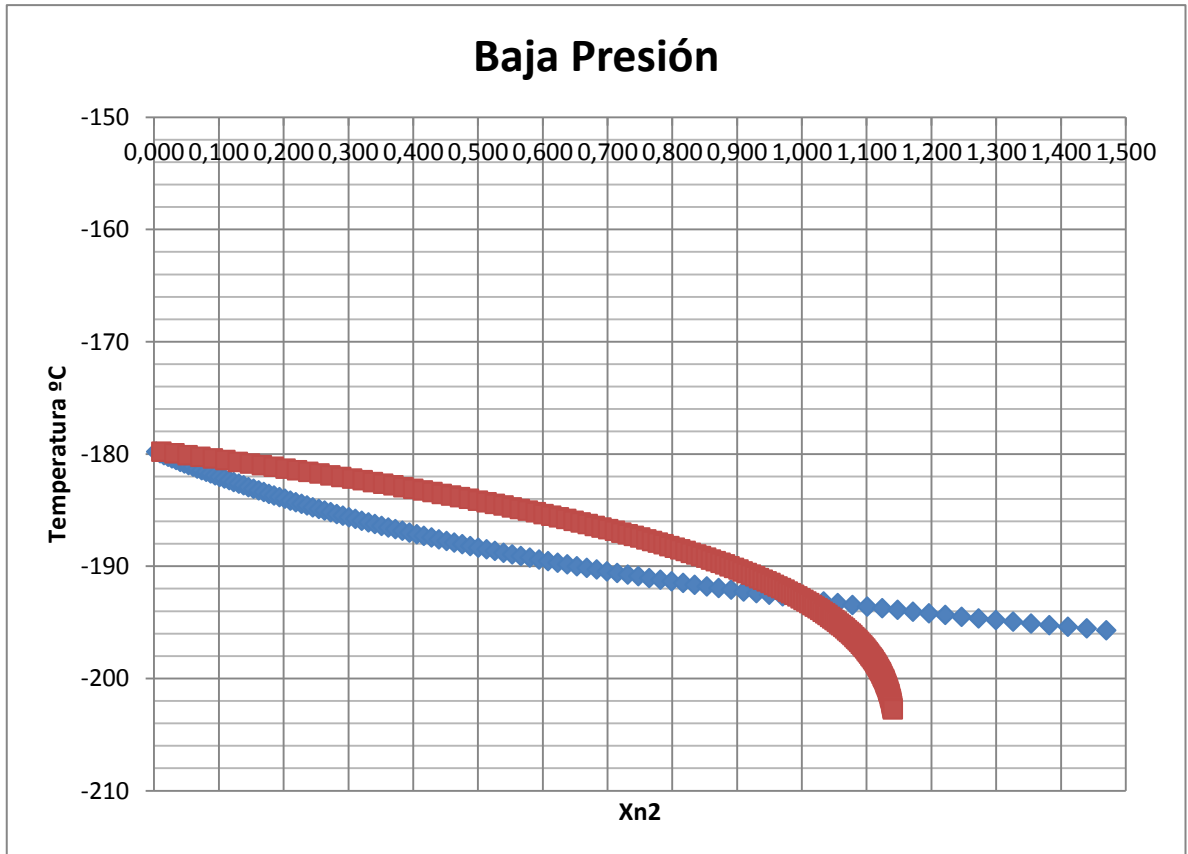
Presión 4,561 bar

	%	T(°C)	Psat	k	Entalpía Vapor	$\Delta H_v(T_b)$ (KJ/mol)	Entalpía Molar
N2	0,0211	-162,16	15,73	3,449422667	-5440,36	3,58	-114,63
O2	0,9505		5,89	1,291981233	-5456,19	5,88	-5185,91
Ar	0,0285		7,12	1,561852633	-3887,68	4,83	-110,67
							-5411,20

Pr	Pb	alfa	alfa rev	L	V
6,001	6,135	-3,129	0,00E+00	0,000	1,000

Columna de Baja Presión

La columna de baja presión es la encargada de realizar una segunda separación en el proceso de obtención de oxígeno gaseoso, esta separación se realiza a las corrientes provenientes de la columna de media presión y a algunas de la columna de mezcla.



Corriente 22:

Presión 1,70 bar

	%	T(°C)	Psat	k	x	y	Entalpía Vapor	$\Delta H_v(T_b)$ (KJ/mol)	Entalpía Molar
N2	0,9704	-190,34	1,84	1,0833	0,898	0,972	-6262,17	5,33	-6077,51
O2	0,0249		0,43	0,2529	0,090	0,022	-6278,23	7,11	-156,97
Ar	0,0045		0,63	0,3686	0,0115	0,0042	-4473,02	5,93	-20,14
									-6254,62

Pr	Pb	alfa	alfa rev	L	V
1,688	1,801	0,033	3,26E-02	0,032	0,968

Corriente 11a:

Presión 1,3687 bar

	%	T(°C)	Psat	k	x	y	Entalpía Vapor	$\Delta H_v(T_b)$ (KJ/mol)	Entalpía Molar
N2	0,5751	-186,6	2,64	1,9263	0,3536	0,6812	-6155,82	5,16	-3541,33
O2	0,410		0,67	0,4876	0,6279	0,3061	-6171,75	6,97	-2533,68
Ar	0,0145		0,94	0,6839	0,0184	0,0126	-4397,33	5,80	-63,86
									-6138

Pr	Pb	alfa	alfa rev	L	V
1,179	1,804	0,479	4,79E-01	0,324	0,676

Corriente 88 a:

Presión 3,43 bar

	%	T(°C)	Psat	k	Entalpía Vapor	$\Delta H_v(T_b)$ (KJ/mol)	Entalpía Molar
N2	0,7811	-188,77	2,16	0,629454344	-6216,33	5,26	-4855,58
O2	0,2096		0,52	0,152334708	-6232,33	7,05	-1306,30
Ar	0,0093		0,75	0,218210948	-4440,40	5,87	-41,30
							-6203,17

Pr	Pb	alfa	alfa rev	L	V
1,289	1,802	-0,215	0,00E+00	0,000	1,000

Capítulo 6: Modificaciones en la planta de oxígeno 3

6. Modificaciones

En la planta de oxígeno número tres que está ubicada en Caletones División el Teniente de Codelco, tiene la siguiente complicación para poder generar el oxígeno requerido por la empresa, que es alrededor de 130.000 Nm³/hora. En el periodo de invierno esta producción no tendría problemas ya que la temperatura ambiente, que es de mucha importancia no superaría los 18 grados Celsius, pero no es así en verano ya que esta alcanza temperaturas muy altas, alrededor de los 30° Celsius, las cuales desfavorecen la producción de oxígeno.

Para ello hemos propuesto colocar cuatro intercambiadores de calor en la entrada de la sala de compresores de tal manera de que la temperatura de entrada del aire no sobrepase los 20 grados Celsius y así obtener la producción de oxígeno deseada.

Además de colocar estos cuatro intercambiadores se necesita de una torre de enfriamiento para poder disminuir la temperatura del aire de entrada.

Los intercambiadores trabajarán con una carga promedio de 32.500 Nm³/hora de aire de entrada, que de acuerdo a las condiciones de entrada sería alrededor de 43.000 kg/hora. Con una temperatura promedio de 30 grados Celsius.

Estos intercambiadores serán de placas, dado que son de menor tamaño que si se hubiese ocupado intercambiadores de tubo y carcasa en el proceso.

Para ello calcularemos los cuatro intercambiadores de placa de la misma manera, los cuales tendrán los mismos flujos de aire y agua.

6.1 Calculo de los intercambiadores de placas

Como se mencionó anteriormente, se utilizaran cuatro intercambiadores de placa con un paso cada lado.

Para ello se calculara la cantidad de calor que se necesita retirar del flujo de aire de entrada con una presión aproximada de 0,85 bar(a) y una temperatura promedio de 30° Celsius en verano.

Calculo de Calor:

Temperatura de entrada y salida del aire y agua que usaremos para esta operación.

T1 y T2 temperatura de entrada y salida del aire en grados Celsius y Farenheit

t1 y t2 temperatura de entrada y salida del agua en grados Celsius y Farenheit

T1	30	°C
T2	23	°C
t1	17	°C

Se usara los cp promedios tanto del aire como el agua a las temperaturas promedios calculadas.

$$T = \frac{T1 + T2}{2}$$

$$t = \frac{t1 + t2}{2}$$

Obteniendo un cp promedios del aire y el agua

$$Cp \text{ aire} = 1,006 \frac{KJ}{kg \text{ } ^\circ C}$$

$$Cp \text{ agua} = 4,186 \frac{KJ}{kg \text{ } ^\circ C}$$

Con estos datos se obtendra el calor a retirar del flujo de aire de tal manera de que este disminuya a la temperatura que se desea.

$$\Delta T = 30 - 23 = 7 \text{ } ^\circ C$$

Ya calculada la diferencia de temperatura, calcularemos el calor a retirar.

$$Q = 43.000 \times 7 \times 1,006$$

$$Q = 302.806 \frac{KJ}{hr}$$

Obtenido el calor, se procede a calcular la temperatura de salida que tendrá el flujo de agua (32000 lb de agua por hora)

$$t_2 = t_1 + \frac{Q}{m \times cp}$$

$$t_2 = 17 + \frac{302.806}{14545,5 \times 4,186}$$

$$t_2 = 21,64^{\circ}C$$

Obtenida la temperatura de salida del agua calcularemos el LMTD

$$LMTD = \frac{(T_1 - T_2) - (t_2 - t_1)}{\ln\left(\frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1}\right)}$$

$$LMTD = \frac{(30 - 21,64) - (23 - 17)}{\ln\left(\frac{30 - 21,64}{23 - 17}\right)}$$

$$LMTD = 7,12^{\circ}C$$

Obtenido el LMTD calcularemos los NTU tanto del flujo caliente como el flujo de menor temperatura, para ello usaremos la siguiente ecuación:

Fluido caliente:

$$HTU_{HOT} = \frac{T_1 - T_2}{LMTD}$$

$$HTU_{HOT} = \frac{30 - 23}{7,12}$$

$$HTU_{HOT} = 1$$

Fluido Frío:

$$HTU_{COLD} = \frac{t_2 - t_1}{LMTD}$$
$$HTU_{COLD} = \frac{21,92 - 17}{7,12}$$
$$HTU_{COLD} = 0,691$$

Por ende el HTU total (unidades de transferencia para cada fluido) será:

$$HTU_{total} = HTU_{HOT} + HTU_{COLD}$$
$$HTU_{total} = 1 + 0,691$$
$$HTU_{total} = 1,691$$

Obtenidos los valores de los HTU tanto para el fluido frío como para el fluido caliente se busca en el gráfico el factor de corrección para un intercambiador de placas de 1/1, pero como el intercambiador de placas que usaremos será de paso simple el FT será igual a 1

$$\Delta T_{real} = LMTD \times FT$$
$$\Delta T_{real} = 1 \times 7,12$$
$$\Delta T_{real} = 7,12 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Luego de estos, supondremos una Ud de tal forma de poder obtener un área estimativa del intercambiador a construir para el proceso que requerimos.

Para ello, de la tabla de valores ubicados en el libro de Procesos de transferencia de Calor, Kern, se selecciona un valor para un fluido caliente el aire y un fluido frío el agua.

En este caso escogeremos el valor de:

$$U = 200 \frac{W}{m^2}$$

Con este valor obtendremos el área que tendrá nuestro intercambiador.

$$A_o = \frac{Q}{\Delta T_{real} \times U}$$

$$A_o = \frac{84.112,78 (W)}{7,12 \times 200 \left(\frac{W}{m^2}\right)}$$

$$A_o = 59,07 m^2$$

Obtenida nuestra área de transferencia, procedemos a seleccionar el intercambiador de placas a utilizar en el proceso de enfriado de la planta.

Luego de seleccionar el intercambiador de placas se procederá a calcular la cantidad de placas y canales que este tendrá.

De manera tal que se pueda calcular el valor de las caídas de presión y área de transferencia del equipo deseado para el trabajo.

Para el área calculada se seleccionó el modelo Tecmi-250 de Mecalia de las siguientes características (<http://www.mecalia.com/>):

Ap	0,75	m2
b	3,5	mm
x	0,6	mm
W	773	mm

Con los datos entregados en la tabla anterior se calculara la cantidad de placas y canales que se requerirán para el intercambiador:

$$Np = \frac{A_o}{A_p}$$

$$Np = \frac{59,07}{0,75}$$

$$Np = 78,75$$

Canales

$$Nc = Np + 1$$

$$Nc = 79 + 1$$

$$Nc = 80$$

Para este intercambiador se usara 79 placas y 80 canales.

Con estos datos se calculara el número de pasos que tendrá el intercambiador.

$$n = \frac{N_c}{2 \times N_p}$$

$$n = \frac{80}{2 \times 78,75}$$

$$n = 0,508$$

Por lo cual el intercambiador tendrá un paso.

Posteriormente se determina el número de placas térmicas que tendrá, por medio de la siguiente expresión.

$$N_p = (1 \times 80 + 1 \times 80) - 1$$

$$N_p = 159$$

En consecuencia se usaran 159 placas térmicas en el equipo de intercambio de calor.

Para seguir con el proceso de diseño del intercambiador se calculara el coeficiente de película de cada componente.

6.1.1 Aire:

Para obtener el valor del coeficiente de película de cada componente se debe calcular algunas constantes antes del desarrollo de este:

$$De = 7 \times 10^{-3} \text{ metros}$$

$$a' = 0,0027 \text{ m}^2$$

Área de transferencia del equipo:

$$a = 0,213 \text{ m}^2$$

Flujo másico por área de transferencia:

$$G = 201.804,19 \frac{\text{kg}}{\text{hr m}^2}$$

Número de Reynolds:

$$Re = 19.812,47$$

Número de Prandalt:

$$Pr = 0,763$$

Coeficiente de película del aire:

$$h = 527,12 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}$$

6.1.2 Agua:

Flujo másico por área de transferencia:

$$G = 68.266,13 \frac{kg}{hr \text{ } m^2}$$

Número de Reynolds:

$$Re = 215,25$$

Número de Prandalt:

$$Pr = 3,261$$

Coeficiente de película del agua:

$$h = 957,86 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}$$

K supuesto: 346 W/m °K

Calculo de U:

$$\frac{1}{U} = \frac{x}{K} + \frac{1}{h_{aire}} + \frac{1}{h_{agua}} + r_{agua} + r_{aire}$$

$$U = 213,23 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}$$

Calculo del área necesaria para la transferencia:

$$A_o = \frac{Q}{\Delta T_{real} \times U}$$
$$A_o = \frac{84.112,78 (W)}{7,12 \times 213,23 \left(\frac{W}{m^2}\right)}$$
$$A_o = 55,40 m^2$$

Esta es el área que necesitamos para el intercambiador, ya que anteriormente no se consideró el factor.

Área disponible:

$$A_d = A_p \times n_p$$
$$A_d = 0,75 \times 79$$
$$A_d = 59,25 m^2$$

Obtenida el área necesaria para la transferencia de calor (A_o) y el área disponible (A_d), se hace una comparación entre estas dos áreas si el área disponible es menor al área necesaria para la transferencia, el intercambiador seleccionado no estaría en las condiciones de realizar dicho trabajo que se requiere, dado esto el intercambiador seleccionado con anterioridad sería apto para el trabajo que necesitamos, obtenido este resultado procedemos al cálculo de las caídas de presión por ambos lados, tanto del fluido frío como el de fluido caliente.

Por lo tanto si A_d es mayor a A_o se concluye que nuestro intercambiador está apto para el trabajo que se necesita.

6.2 Calculo de las caídas de presión por ambos lados:

6.2.1 Aire

$$\Delta P = \frac{2 \times f \times G^2 \times L}{g \times De \times \rho}$$

$$f = 0,128$$

$$L = 0,97 m$$

$$\Delta P = 13,88 psi$$

6.2.2 Agua:

$$\Delta P = \frac{2 \times f \times G^2 \times L}{g \times De \times \rho}$$

$$f = 0,499$$

$$L = 0,97 \text{ m}$$

$$\Delta P = 1,2 \text{ psi}$$

Obtenidas las caídas de presión y como es el intercambiador, nuestro proveedor será Mecalia, la cual es una empresa que trabaja con intercambiadores de placa desmontables y que usan energía solar para su funcionamiento.

Este equipo tendría un valor de 1.825 euros por un intercambiador a ocupar en el proceso, por ende nuestra inversión sería de 7.300 euros lo que equivale en pesos chilenos una suma de 4.593.863 millones de pesos chilenos.

Cada equipo de transferencia de calor, gasta una energía de 611 KW/hora, por ende el gasto energético anual que tendrá cada intercambiador será de $2,112 \times 10^6$ KW por año, pero se debe tener en consideración que los equipos de transferencia de calor se usaron durante 3 o 4 meses durante el año por ende el gasto energético que tendrá cada intercambiador será de 132.000 KW, es decir que se gastaran alrededor de 94.288 pesos chilenos en el uso de los equipos anualmente.

Vale decir que el gasto energético de los cuatro equipos de transferencia de calor será de 377.152 pesos chilenos.

Se a este gasto se le suma los gastos de entrega, montaje, líneas de trabajo, válvulas, etc, a los equipos el capital que tendría que ocuparse para dicho trabajo será de 19.917.734 pesos chilenos.

Si consideramos que el precio del cobre se encuentra en 7.900 pesos chilenos la tonelada métrica, y se pretende aumentar la producción actual de cobre en 150.000 toneladas métricas por año, a la empresa le significaría ganar alrededor de 98 millones de pesos mensuales.

Cabe decir que estas ganancias no solo tienen una inversión por parte de la planta de oxígeno, sino que existen otras entidades que trabajaran en este aumento de producción de cobre, por ende consideraremos que la planta será una sexta parte de toda la inversión que debe generar la empresa, dada esta consideración el dinero de inversión se recuperara en un par de años.

Si consideramos de manera general la inversión de estos equipos es totalmente rentable ya que esa cantidad de dinero se podría recuperar en poco tiempo.

7. Conclusión

Para finalizar el trabajo sobre la planta de oxígeno número tres ubicada en la locación de Caletones, División el Teniente Codelco Chile, podría realizarse un trabajo sobre las condiciones estipuladas, pero debiese tener mucho cuidado con los agentes contaminantes que posee el agua ya que el flujo de descontaminación que tenemos, que es el de oxígeno líquido es alrededor de 230 Nm³/hr.

Por fábrica la planta debiese producir una cantidad no menor a los 200 Nm³/hr de oxígeno líquido, esto se debe a que debe eliminar contaminantes que pueden quedar en los equipos y líneas de trabajo de la planta, pero la planta estaría en condiciones de trabajar con la carga estipulada.

Esto debe tener una salvedad ya que los cálculos referidos a la planta fueron considerados con una temperatura de 20°C lo cual esta temperatura no es todo el año, dado esto se consideró colocar intercambiadores de placa al comienzo del proceso de tal manera que se tenga una temperatura promedio de 20 grados Celsius todo el año.

De esta forma la planta podría trabajar con la carga estipulada, pero estaría sobre exigida, dado que no fue construida para ello, es decir, que si forzamos a la planta a trabajar en estas condiciones no tendría problemas en hacerlo, pero su vida útil disminuiría considerablemente ya que las plantas de oxígeno tienen una vida útil de alrededor de 15 años aproximadamente.

Por ende si trabajamos con la planta al 135% aproximadamente se observa que la planta tendría desperfectos a corto plazo, tales como incrustaciones en las cañerías por las cuales pasan los fluidos, disminución de la vida útil de los adsorbentes, corrosión en equipos, como compresores, intercambiadores, etc.

Aumento de la cantidad de energía eléctrica consumida, cambios de aceites para la lubricación de los equipos. Cambio de los filtros de panel en menor plazo.

Los elementos mencionados serían consideraciones que se debiesen tener antes de trabajar con la planta a esta capacidad, dado que también significan un gasto adicional para la planta y/o para la fundición de El Teniente, pero en esto, tiene un nivel bajo de importancia, dado que dentro de la fundición de Caletones, lo más importante para los inversionistas, es la producción de cobre, sin importar un poco más de gasto.

Lo que sí importa es la disminución del consumo eléctrico que tienen las plantas, pero esto solo importa a los jefes de cada planta, ya que buscan siempre la forma de mejorar la producción pero que esto no implique también un aumento de los gastos para la producción de oxígeno gaseoso como es el caso.

Otro punto importante a tener en consideración al aumentar el flujo de entrada de aire, es el aumento en la concentración de hidrocarburos dentro de la planta, dado que si se genera una alta concentración de hidrocarburos, existiría un alto riesgo de explosión de la planta misma, ocasionando fuertes repercusiones en donde esté ubicada la planta de producción de oxígeno gaseoso.

Esto es lo más importante dentro de las consideraciones a tomar, dado el riesgo que los hidrocarburos pueden ocasionar, para ello el cromatógrafo, que hay en la planta es uno de los equipos fundamentales para la seguridad de los operarios primariamente, y de todas las personas que trabajan en la planta y sus alrededores.

Esto hace cada vez más importante a los adsorbentes que se utilizan en la planta para la adsorción de los hidrocarburos y óxidos nitrosos que vienen en el aire, dado que la concentración que debe quedar después de la salida de los tamices debe ser cero o muy cercana a cero.

Para esto, la alúmina permanganatada y el tamiz 13x cumple un rol fundamental, dado que debido al alto flujo de aire que pasaremos por la planta, deben adsorber todo los elementos que puedan ocasionar accidentes en la planta.

Los compresores son los equipos más importantes dentro de la planta dado que a pesar de en las columnas se separa el aire, los compresores son los encargados de comprimir el aire en su totalidad, dado esto al trabajar con un flujo mayor de aire, los compresores tendrán que trabajar a la máxima potencia que permite su motor, que es 5,4 MW para poder trabajar con la carga nueva de aire, esto generara que el aceite de la lubricación del motor se desgaste más rápido, que los alavés del compresor se corroan más rápido y que su vida útil disminuya.

Si procedemos con la producción de oxígeno gaseoso, se observa que cada intercambiador de calor aumentara la cantidad de agua a purgar, obviamente por su aumento de entrada de aire a la planta, esto genera que los operarios tengan una mayor atención a los equipos de intercambio de calor, a modo tal de evitar inundaciones.

Como se consideró que para aumentar la producción de oxígeno gaseoso durante el periodo de verano, es necesario colocar cuatro intercambiadores de placa, los cuales se encargaran de disminuir la temperatura de entrada al compresor, y así poder generar que los compresores tengan mayor cantidad de aire pero con menor volumen y temperatura, para ello se realizara una inversión de alrededor de 19.917.734 pesos chilenos, lo cual se podrían recuperar dentro de un periodo de dos años siguientes, si el cobre mantuviese el mismo valor actual.

Lo que no se tomó en consideración para dicho calculo fue el hecho de que el tiempo que tomaría a poner en marcha la planta para que estos intercambiadores

entraran en el proceso actual, es decir, en este caso la disminución o detención de la producción de oxígeno gaseoso es fundamental para la obtención de cobre, por lo cual si esto demora mucho, la división estaría perdiendo dinero en ese tramo.

Bibliografía

- 1.- Dawson, Bruce; Kalbassi, Mohammed; Siegmund, Scott; Thayer, Matthew, Air Products & Chemicals, Inc. Allentown Pensilvania, Estados Unidos. Optimización del rendimiento de las plantas de oxígeno. Disponible en World Wide Web: <http://www.airproducts.com/~media/Files/PDF/products/CPS-ALTA-Conference-optimizacion-del-rendimiento-de-las-plantas-de-oxigen-Spanish.pdf>
- 2.- Barron, Randall Oxford University Press, New York, 1985, pp.199-211. Air Separation into Oxygen, Nitrogen, and Argon. Disponible en World wide web: http://www.che.cemr.wvu.edu/publications/projects/large_proj/air.PDF
- 3.- Siemens. Use of Process Analytics in cryogenic Air Separation Plants. Disponible en World wide web: http://www.industry.usa.siemens.com/automation/us/en/process-instrumentation-and-analytics/process-analytics/pa-case-studies/Documents/CS_Process_Analytcs_in_Air_Separation_Plants.pdf
- 4.- Claude, Georges, Universidad de Toronto. Liquid Air. Disponible en World wide web: <http://archive.org/details/liquidairoxygenn00clauuoft>
- 5.- Robert, Treybal. Profesor de Ingeniería Química de la Universidad de Rhode Island. Operaciones de transferencia de Masa
- 6.- Kern, Donald. Procesos de Transferencia de Calor. Trigésima primera reimpresión México 1999. Compañía editorial continental.
- 7.- Van Ness, Smith. Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química sexta edición.
- 8.- Mecalía. Disponible en world wide web: <http://www.mecalia.com/>

Glosario de Términos

Bombas de agua (P63.1/2/3): equipo impulsor de agua para el circuito cerrado, enfriamiento de agua por agua del circuito abierto.

Bombas de agua de refrigeración (P60.1/2): Impulsan el agua a los difusores del E60 para el intercambio de energía con el nitrógeno gas.

Bombas de agua principales (P62.1/2/3): equipo impulsor de agua para el circuito abierto, enfriamiento de agua por aire.

Bombas de oxígeno líquido (P02-1/2): bombas criogénicas, encargadas de enviar el oxígeno líquido producido a los estanques de almacenamiento de la planta.

Calentador de regeneración (E08): Equipo que eleva la temperatura del flujo de nitrógeno gas necesario para la regeneración.

Chancado: proceso mediante el cual se disminuye el tamaño de las rocas mineralizadas triturándolas en chancadoras y molinos. El material extraído pasa por tres tipos de chancadoras (chancador primario, secundario y terciario) hasta llegar a tamaños de menos de ½ pulgada.

Columna de baja presión (K02): Se utiliza para la destilación de aire a baja presión, la cual se encarga de convertir nitrógeno líquido y líquido enriquecido en oxígeno y nitrógeno residual gaseoso.

Columna de media presión (K01): Columna de destilación de aire mediante una presión de 6,1 bares de operación.

Columna de mezcla (K04): Columna donde se mezclan todas las corrientes de oxígeno líquido y gas.

Compresores de aire c/enfriadores y silenciadores (C01.1/2): Equipo adiabático que se encarga de comprimir el aire, además cuenta con un sistema de refrigeración y silenciador para su venteo.

Concentrador: Proceso el cual se encarga de realizar la molienda del mineral extraído, para luego ser enviado en forma de pulpa a la fundición.

Convertidores Teniente: Equipos de fusión propia de la División el Teniente, usados en la producción de cobre metálico.

Evaporador de oxígeno líquido (E41): Gasificadores conectados a los equipos de almacenamiento para la gasificación del oxígeno líquido, para luego ser enviado como gas a los Convertidores Teniente.

Fundición: Proceso que se encarga de fundir el concentrado de cobre que proviene del Concentrador

Intercambiador de calor principal (E01) c/enfriador (E03,E04) y Evaporador principal (E02): es un equipo que permite el intercambio de energía entre fluidos gaseosos y líquidos. Y es el principal equipo que enfría el oxígeno gas que va a fundición.

Intercambiadores de agua en circuito cerrado (E63.1/2/3): es un equipo que permite el intercambio de energía líquido y líquido. Y es el equipo principal del circuito cerrado.

Intercambiadores de agua fría (E07.1/2): Equipo que se utiliza con el fin de enfriar el aire proveniente de un compresor.

Mina: es el proceso en el cual se realiza la extracción del mineral, desde los yacimientos de las distintas minas ubicadas dentro de la división.

Planta de Secado Fluosolidos: Secado del concentrado de cobre, para luego ser enviada a la fundición.

Recipientes de purificación de aire (R01/R02): Purificadores de aire que trabajan de manera intermitente, mientras uno hace el proceso de adsorción, el otro se regenera.

Separadores de Líquido (B02,B05 y B07): equipo separador de gas con respecto al líquido mediante la expansión del aire de entrada a los separadores.

Silenciador (S05): Equipo encargado de expandir el aire de los compresores, antes de ser enviado a la atmósfera, además disminuye su presión hasta la presión atmosférica y como máximo hasta una presión de 2 a 2,5 atmosferas.

Tanques de almacenamiento de Oxígeno líquido (B40.1/2): Tanques de almacenamiento de la planta número 3 de oxígeno.

Torre de enfriamiento de agua (E.60): Torre que enfría el agua que va a los E07 mediante el contacto directo con nitrógeno gas, proveniente de la caja fría.

Torres de enfriamiento de agua (E62.1/2/3): equipo encargado de disminuir la temperatura del agua con aire, esta disminución de temperatura variara de acuerdo a la temperatura ambiente, pero debe estar en el rango de 15 a 18 grados Celsius, no más.

Turbo-compresores (D01-D01C/ D02-D02C): Tienen una doble función por uno de sus lados se encargan de comprimir parte del aire que ingresa a la planta alrededor de 70 grados Celsius 7 bar(a) y por el otro lado expande a una temperatura de -174 grados Celsius y a una presión de 1,2 bar(a).

Relave: Partículas de mineral que el agua del lave arrastra y mezcla con el barro estéril, y que para ser aprovechadas necesitan un nuevo lave.

Anexos

Anexo 1

Figura 1: Esquema del convertidor Teniente, el cual es el principal equipo para la obtención de cobre en la fundición de Caletones.

Figura 2: Esquema de la disposición de equipos y plantas de procesos en la División el Teniente, lugar Caletones.

Figura 3: Esquema de los equipos auxiliares de la planta de oxígeno número tres, para su refrigeración y almacenamiento del oxígeno gaseoso que no se requiere de la fundición en caso de que uno de los convertidores Teniente este en mantención.

Figura 4: esquema del proceso de licuación que posee la planta de oxígeno número tres y los principales equipos del proceso.

Figura 5: Esquema del proceso de la planta de oxígeno número tres y sus principales corrientes de flujo.

Figura 6: Esquema fundamental de una planta de separación de aire para la obtención de oxígeno, nitrógeno y argón, según se estime conveniente en la empresa.

Figura 7: esquema del equipo E08

Figura 8: Sinóptico de la caja fría de la etapa de licuefacción

Figura 9: Diagrama de flujo para el cálculo de la caja fría

Figura 10: Grafica del compresor de la planta

Anexo 2

Tamiz Molecular 13x: es un material que contiene poros pequeños de un tamaño preciso y uniforme que se usa como agente adsorbente para gases y líquidos. A diferencia de un filtro, el proceso opera a nivel molecular. Un tamiz molecular puede adsorber hasta un 22% de su propio peso en agua.

Alúmina Activada: La alúmina activada es una forma porosa y adsorbente que se produce calentando los hidratos a temperatura superficial para expulsar la mayor parte del agua combinada. Es necesario regular el calentamiento, pues si la temperatura es demasiado alta no se obtiene la extensión máxima de superficie. La sustancia comercial viene en granos gruesos, en terrones, bolas y tabletas de diversos tamaños

Anexo 3

Intercambiador de tubo y carcasa ubicado en las inter etapas de los compresores

R	$\frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1}$	G	$\frac{W}{as \text{ o } at}$
S	$\frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1}$	Res	$\frac{Gs \times deq}{\mu}$
FT	$\frac{\sqrt{R+1} \times \ln\left(\frac{1-S}{1-R \times S}\right)}{(R-1) \times \ln\left(\frac{2-S \times (R+1 - \sqrt{R^2+1})}{2-S \times (R+1 + \sqrt{R^2+1})}\right)}$	Pr	$\frac{\mu \times Cp}{K}$
deq	$\frac{4 \times \left(\frac{1}{2} \times P_t \times 0,86 \times P_t - \frac{1}{2} \times \pi \times \frac{do^2}{4}\right)}{\frac{1}{2} \times \pi \times do}$	ho hi	$0,36 \times \left(\frac{K}{deq}\right) \times Re^{0,55} \times Pr^{1/3}$
Qc	$W \times Cp \times \Delta T$	at	$\frac{Nt \times a't}{144 \times n}$
LMTD	$\frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln\left(\frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1}\right)}$	vt	$\frac{Gt}{3600 \times \rho}$

ΔT_{real}	$LMTD \times FT$	Ret	$\frac{Gt \times \phi_{int\ tubos}}{\mu}$
as	$\frac{\phi_{int} \times C' \times B}{144 \times P_T}$	hio	$hi \times \frac{\phi_{int\ tubos}}{\phi_{ext\ tubos}}$
Uc	$\frac{hio \times ho}{hio + ho}$	A	$a'' \times Nt \times L$
Ud	$\frac{Qc}{A \times \Delta T_{real}}$	Rd	$\frac{Uc - Ud}{Uc \times Ud}$
ΔPs	$\frac{fs \times Gs^2 \times \phi_{int\ carcasa} \times (N + 1)}{5,22 \times 10^{10} \times deq \times \phi_s \times s}$	ΔPr	$\frac{4 \times n}{s} \times \frac{vt^2}{2 \times gc} \times \frac{62,5}{144}$
ΔPt	$\frac{ft \times Gt^2 \times L \times n}{5,22 \times 10^{10} \times d \times \phi_t \times s}$	ΔPT	$\Delta Pr + \Delta Pt$

Anexo 4

Libro 1: Smith Van Ness

Anexo 5 Tabla de Robitszch's

Temperatura °C	Presión de Vapor mBar	Humedad Específica gr H2O/ Kg de Aire Seco	Cantidad de Agua gr H2O/m3 aire húmedo	Cantidad de Agua gr H2O/Nm3 aire seco
1,000	6,563	4,355	5,187	5,248
2,000	7,053	4,368	5,554	5,634
3,000	7,574	4,684	5,943	6,053
4,000	8,129	5,038	6,355	6,590
5,000	8,718	5,398	6,791	6,976
6,000	9,346	5,798	7,254	7,483
7,000	10,014	6,288	7,745	8,023
8,000	10,722	6,652	8,263	8,596
9,000	11,475	7,124	8,812	9,287
10,000	12,274	7,626	9,392	9,855
11,000	13,128	8,159	10,005	10,544
12,000	14,017	8,725	10,651	11,275
13,000	14,969	9,326	11,335	12,053
14,000	15,977	9,964	12,056	12,877
15,000	17,844	10,641	12,816	13,751
16,000	18,172	11,358	13,617	14,678
17,000	19,366	12,119	14,462	15,662
18,000	20,628	12,925	15,351	16,703
19,000	21,961	13,779	16,287	17,886
20,000	23,369	14,683	17,273	18,975
21,000	24,855	15,648	18,309	20,212
22,000	26,424	16,654	19,399	21,522
23,000	28,878	17,726	20,543	22,907
24,000	29,821	18,868	21,745	24,373
25,000	31,668	20,861	23,888	25,924
26,000	33,594	21,328	24,333	27,563
27,000	35,632	22,669	25,722	29,295
28,000	37,777	24,886	27,188	31,127
29,000	40,833	25,584	28,708	33,862
30,000	42,486	27,167	30,389	35,108
31,000	44,900	28,839	31,987	37,269
32,000	47,519	30,683	33,741	38,549
33,000	50,270	32,468	35,579	41,959
34,000	53,159	34,437	37,501	44,504
35,000	56,193	36,518	39,512	47,192
36,000	59,374	38,714	41,614	50,830
37,000	62,789	41,832	43,818	53,826
38,000	66,286	43,488	46,184	56,198
39,000	69,873	46,866	48,582	59,532

40,000	73,711	48,796	51,882	63,859
41,000	77,731	51,678	53,613	66,783
42,000	81,938	54,721	56,335	70,716
43,000	86,342	57,936	59,175	74,871
44,000	90,948	61,332	62,136	79,259
45,000	95,763	64,917	65,219	83,892
46,000	100,801	68,718	68,435	88,794
47,000	106,060	72,714	71,781	93,968
48,000	111,556	76,948	75,265	99,448
49,000	117,297	81,426	78,893	105,227
50,000	123,288	86,161	82,666	111,346

Anexo 6

Alúmina:

Alúmina			
	Flujo de Aire	114693	Nm3/hr
	HR	1	
	P entrada	498,00	Kpa
	T entrada	18	°C
	Qn	116500	Nm3/hr
	Pn	5	bar
	Tn	18	°C
	V alúmina	21,784	m3
	M alúmina	16774	kg
	X CO2	500	ppm
	to	150	min
	PM aire	29	
	Moles de aire	5120,61	kg-mol
	ε	0,06	
	Flujo de N ₂	25691,232	Nm3/hr

Criba			
	T msn	175	min

Constantes de Antoine:

Constantes de Antoine		
A	B	C
5,2246	1748,14	235

Constantes de Corrección: estas constantes fueron obtenidas de los libros específicos que se poseen en la planta para la determinación de las cantidades necesarias para una adsorción ideal.

Constantes de Corrección					
a	b	c	d	e	f
-10,9294317	40,4259548	21410193	2,0384	-0,00319	2,27E-06
min/°C	min/bar	min-Nm3/hr			

Ecuaciones: Estas ecuaciones al igual que los datos de corrección se obtuvieron del libro específico de la planta.

Alúmina

P_{H_2O}	$k \times HR \times e^{5,2246 - \frac{1748,14}{T+235}}$
K	$1 + (P + 1) \times \left[0,004475 - \left(\frac{T}{824425} \right)^{0,676} \right]$
m_{H_2O}	$\frac{0,804 \times Q \times P_{H_2O}}{733,91 \times P} \times \frac{1}{3600}$
τ	$\frac{V_{Alumina} \times 60 \times P \times 273,15}{101,325 \times Q \times (273,15 + T)}$
X	$8,76 \times (1 - e^{-23,34 \times \tau}) \times [1 + 0,015 \times (15 - T)]$
$\tau_{Alumina}$	$\frac{X \times M_{Alumina}}{100 \times m_{H_2O}} \times \frac{1}{3600}$

P_{H_2O} (mmHg): presión parcial

HR: humedad relativa

m_{H_2O} (kg/seg): masa de agua

τ (minutos): tiempo de permanencia del aire

X(kg de H_2O /100 kg de alúmina)

τ_{Alumina} (minutos): ciclo de la alúmina
 Q (Nm³/hr): caudal de entrada tamiz
 T (°C): temperatura de entrada tamiz
 M_{Alumina} (kg): masa de alumina dentro del tamiz
 P (bar): Presión de entrada tamiz

Tamiz 13

C	$d + e \times X_{CO_2} + f \times X_{CO_2}^2$
τ_{sieve}	$C \times \left\{ T_{msn} + \frac{Q_n}{Q} \times [a \times (T - T_n) + b \times (P - P_n)] + c \times (Q^{-1} - Q_n^{-1}) \right\}$
m_{CO_2}	$X_{CO_2} \times PM_{aire} \times n \times 10^{-6}$
M_{CO_2}	$m_{CO_2} + \frac{1,963 \times 10^{-6} \times Q}{60 \times X_{CO_2} \times \delta t}$

Anexo 7

T2' (kelvin) dado	$\tau=T2'/T_o$ calculado	T2' (kelvin) Calculado	$\Delta T2'$ Calculado	$\tau=T2'/T_o$ Final	Cp(J/mol K) Final	Ws(isentropico) J/mol
300	0,9988	335,5682	35,5682	1,1173	29,2797	1031,2
310	1,0321	335,5316	25,5316	1,1171	29,2796	1030,1
320	1,0654	335,4956	15,4956	1,1170	29,2795	1029,0
330	1,0987	335,4600	5,4600	1,1169	29,2794	1028,0
340	1,1320	335,4247	-4,5753	1,1168	29,2793	1027,0
350	1,1653	335,3898	-14,6102	1,1167	29,2792	1025,9
360	1,1986	335,3552	-24,6448	1,1165	29,2791	1024,9
370	1,2319	335,3210	-34,6790	1,1164	29,2790	1023,9
380	1,2652	335,2870	-44,7130	1,1163	29,2789	1022,9
390	1,2985	335,2533	-54,7467	1,1162	29,2788	1021,9
400	1,3318	335,2198	-64,7802	1,1161	29,2787	1020,9
410	1,3651	335,1866	-74,8134	1,1160	29,2787	1020,0
420	1,3984	335,1536	-84,8464	1,1159	29,2786	1019,0
430	1,4317	335,1208	-94,8792	1,1158	29,2785	1018,0

T2' (kelvin) dado	$\tau=T2'/T_o$ calculado	Cp/R Calculado	T2' (kelvin) Calculado	$\Delta T2'$ Calculado
335,44	1,12	3,52	344,21	8,77
345,44	1,15	3,53	344,17	-1,27
355,44	1,18	3,53	344,13	-11,31
365,44	1,22	3,53	344,09	-21,35
375,44	1,25	3,54	344,05	-31,39
385,44	1,28	3,54	344,01	-41,43
395,44	1,32	3,54	343,97	-51,47
405,44	1,35	3,54	343,93	-61,51
415,44	1,38	3,55	343,89	-71,55
425,44	1,42	3,55	343,85	-81,59
435,44	1,45	3,55	343,81	-91,63
445,44	1,48	3,56	343,77	-101,67
455,44	1,52	3,56	343,73	-111,70
465,44	1,55	3,56	343,70	-121,74
475,44	1,58	3,57	343,66	-131,78

Anexo 8

T2 (kelvin) dado	$\tau=T2'/T_o$ calculado	$\Delta T2'$ Calculado	Cp(J/mol K) Final	Ws J/mol
10	0,0660	78,2436	27,41	-1735,18
20	0,1320	69,3129	27,43	-1706,97
30	0,1980	59,7365	27,43	-1695,78
40	0,2639	49,9813	27,44	-1689,31
50	0,3299	40,1485	27,44	-1684,89
60	0,3959	30,2741	27,44	-1681,56
70	0,4619	20,3745	27,44	-1678,91
80	0,5279	10,4581	27,45	-1676,69
90	0,5939	0,5301	27,45	-1674,79
100	0,6598	-9,4066	27,45	-1673,11
110	0,7258	-19,3498	27,45	-1671,61
120	0,7918	-29,2982	27,45	-1670,24
130	0,8578	-39,2508	27,45	-1668,99
140	0,9238	-49,2067	27,45	-1667,82
150	0,9898	-59,1654	27,45	-1666,73
160	1,0558	-69,1266	27,45	-1665,70
170	1,1217	-79,0897	27,45	-1664,72
180	1,1877	-89,0547	27,45	-1663,79
190	1,2537	-99,0211	27,45	-1662,90

T2 (kelvin) dado	$\tau=T2'/T_o$ calculado	T2 (kelvin) Calculado	$\Delta T2'$ Calculado
97,61	0,6441	88,3316	-9,2798
87,61	0,5781	88,3253	0,7140
77,61	0,5121	88,3458	10,7344
67,61	0,4461	88,4239	20,8126
57,61	0,3801	88,6402	31,0288
47,61	0,3142	89,2449	41,6335
37,61	0,2482	91,2681	53,6568
27,61	0,1822	101,5552	73,9439
17,61	0,1162	301,5117	283,9003

Constantes

	comp	w	Tc(Kelvin)	Pc(Bar)	Zc	Vc(cm ³ /mol)
Oxígeno	0,21	0,022	154,6	50,43	0,288	73,4
Nitrógeno	0,781	0,038	126,2	34	0,289	89,2
Argón	0,009	0	150,9	48,98	0,291	74,6

Cálculos:

w aire	0,034	
Tc aire	132,386	Kelvin
Pc aire	37,585	Bar

Tr1 aire	1,145	Kelvin
Pr1 aire	0,186	Bar

B0	-0,2569
dB0/dTr	0,4750
B1	0,0415
dB1/dTr	0,3575

H1r/(R*Tc)	-0,1514	
S1r/R	-0,0907	
H1r	-166,5863	J/mol
S1r	-0,7539	J/(mol*k)

Constantes Usadas:

Constantes
de Antoine

	A	B	C
Nitrógeno	13,4477	658,22	-2,854
Oxígeno	13,6835	780,26	-4,1758
Argón	13,9153	832,78	2,3608

Capacidades Caloríficas

		a	b	c	d	e
Gaseoso	Nitrógeno	29,4	-0,00301	0,0000054	5,13E-09	-4,25E-12
	Oxígeno	29,9	-0,0114	0,0000434	-0,000000037	1,01E-11
	Argón	20,7723				

Constantes
de Watson

	Tb (K)	$\Delta H_v(T_b)$ (KJ/mol)	Tc (K)
Nitrógeno	77,35	5,577	126,2
Oxígeno	90,18	6,82	154,4
Argón	63,15	6,527	150,651

Peso Volumetrico

	Gas	Liquido
	Kg/Nm ³	Kg/l
Oxigeno	1,43	1,14
Nitrógeno	1,25	0,81
Argón	1,73	1,4
Aire	1,29	1

Intercambiador de Placas

$$De = 2 \times b$$

$$a' = W \times b$$

Área de transferencia del equipo:

$$a = a' \times np$$

Flujo másico por área de transferencia:

$$G = \frac{m}{a}$$

Número de Reynolds:

$$Re = \frac{De \times G}{\mu}$$

Número de Prandalt:

$$Pr = \frac{Cp \times \mu}{k}$$

Coeficiente de película:

$$h = 0,2536 \times \left(\frac{k}{De} \right) \times Re^{0,65} \times Pr^{0,4}$$

K supuesto: 346 W/m °K

Calculo de U:

$$\frac{1}{U} = \frac{x}{K} + \frac{1}{h_{aire}} + \frac{1}{h_{agua}} + r_{agua} + r_{aire}$$

$$U = 2001 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}$$

Calculo del área necesaria para la transferencia:

$$Ao = \frac{Q}{LMTD \times FT \times U}$$

Área disponible:

$$Ad = Ap \times np$$

Caída de presión

$$\Delta P = \frac{2 \times f \times G^2 \times L}{g \times De \times \rho}$$

f:

$$f = \frac{2,5}{Re^{0,3}}$$

L:

$$L = \frac{Ap}{W} \times np$$

Anexo 9

Columna de Media Presión

Media Presión						
Temperatura (K)	Presión N2 (bar)	Presión O2 (bar)	Volatilidad	Xn2	Yn2	Temperatura (°C)
113,15	17,721353599	6,809280272	2,60252962	-0,064999588	-0,1888329	-160
113	17,577914629	6,742408730	2,607067494	-0,059287378	-0,17084401	-160,15
112,85	17,435250207	6,676012024	2,611626544	-0,053536506	-0,15302006	-160,3
112,7	17,293358776	6,610088331	2,616206911	-0,047746459	-0,13536011	-160,45
112,55	17,152238768	6,544635827	2,620808739	-0,041916711	-0,11786319	-160,6
112,4	17,011888608	6,479652682	2,625432171	-0,036046732	-0,10052836	-160,75
112,25	16,872306713	6,415137068	2,630077352	-0,030135981	-0,08335468	-160,9
112,1	16,733491490	6,351087153	2,634744428	-0,024183912	-0,06634119	-161,05
111,95	16,595441338	6,287501100	2,639433548	-0,018189968	-0,04948697	-161,2
111,8	16,458154647	6,224377075	2,644144859	-0,012153584	-0,03279108	-161,35
111,65	16,321629798	6,161713238	2,648878513	-0,006074187	-0,01625256	-161,5
111,5	16,185865167	6,099507747	2,65363466	0,000048804	0,0001295	-161,65
111,35	16,050859115	6,037758760	2,658413453	0,006215981	0,01635604	-161,8
111,2	15,916610001	5,976464431	2,663215047	0,012427944	0,03242799	-161,95
111,05	15,783116171	5,915622913	2,668039597	0,018685302	0,04834628	-162,1
110,9	15,650375964	5,855232357	2,672887259	0,024988673	0,06411182	-162,25
110,75	15,518387712	5,795290911	2,677758192	0,031338687	0,07972556	-162,4
110,6	15,387149735	5,735796722	2,682652556	0,037735981	0,09518839	-162,55
110,45	15,256660347	5,676747934	2,687570511	0,044181204	0,11050125	-162,7
110,3	15,126917855	5,618142692	2,69251222	0,050675013	0,12566504	-162,85
110,15	14,997920553	5,559979136	2,697477848	0,057218078	0,14068069	-163
110	14,869666731	5,502255406	2,702467558	0,063811076	0,15554909	-163,15
109,85	14,742154669	5,444969640	2,707481518	0,070454698	0,17027116	-163,3
109,7	14,615382638	5,388119974	2,712519897	0,077149644	0,1848478	-163,45
109,55	14,489348900	5,331704542	2,717582864	0,083896625	0,19927991	-163,6
109,4	14,364051712	5,275721478	2,72267059	0,090696366	0,21356841	-163,75
109,25	14,239489319	5,220168914	2,727783249	0,097549599	0,22771418	-163,9
109,1	14,115659960	5,165044978	2,732921014	0,104457071	0,24171811	-164,05
108,95	13,992561864	5,110347801	2,738084062	0,111419539	0,25558111	-164,2
108,8	13,870193254	5,056075508	2,74327257	0,118437775	0,26930407	-164,35
108,65	13,748552342	5,002226227	2,748486717	0,125512559	0,28288787	-164,5
108,5	13,627637335	4,948798081	2,753726685	0,132644687	0,29633339	-164,65
108,35	13,507446428	4,895789194	2,758992655	0,139834967	0,30964153	-164,8
108,2	13,387977810	4,843197688	2,764284812	0,147084219	0,32281316	-164,95
108,05	13,269229664	4,791021684	2,769603341	0,154393277	0,33584916	-165,1
107,9	13,151200160	4,739259302	2,77494843	0,161762989	0,3487504	-165,25
107,75	13,033887464	4,687908660	2,780320268	0,169194216	0,36151777	-165,4

107,6	12,917289732	4,636967877	2,785719046	0,176687833	0,37415212	-165,55
107,45	12,801405112	4,586435068	2,791144957	0,184244729	0,38665433	-165,7
107,3	12,686231745	4,536308351	2,796598195	0,191865809	0,39902527	-165,85
107,15	12,571767763	4,486585840	2,802078955	0,199551992	0,41126579	-166
107	12,458011290	4,437265648	2,807587437	0,207304212	0,42337676	-166,15
106,85	12,344960444	4,388345890	2,81312384	0,215123417	0,43535903	-166,3
106,7	12,232613332	4,339824678	2,818688366	0,223010573	0,44721346	-166,45
106,55	12,120968055	4,291700124	2,824281218	0,230966661	0,45894091	-166,6
106,4	12,010022706	4,243970339	2,829902602	0,238992679	0,47054221	-166,75
106,25	11,899775370	4,196633434	2,835552725	0,247089640	0,48201823	-166,9
106,1	11,790224124	4,149687518	2,841231797	0,255258574	0,4933698	-167,05
105,95	11,681367038	4,103130703	2,846940028	0,263500531	0,50459777	-167,2
105,8	11,573202173	4,056961095	2,852677633	0,271816575	0,51570298	-167,35
105,65	11,465727584	4,011176806	2,858444825	0,280207789	0,52668626	-167,5
105,5	11,358941316	3,965775942	2,864241824	0,288675276	0,53754845	-167,65
105,35	11,252841408	3,920756612	2,870068847	0,297220156	0,54829037	-167,8
105,2	11,147425891	3,876116923	2,875926117	0,305843568	0,55891287	-167,95
105,05	11,042692789	3,831854985	2,881813856	0,314546669	0,56941676	-168,1
104,9	10,938640118	3,787968903	2,887732291	0,323330640	0,57980287	-168,25
104,75	10,835265886	3,744456785	2,893681649	0,332196676	0,59007202	-168,4
104,6	10,732568094	3,701316740	2,89966216	0,341145998	0,60022503	-168,55
104,45	10,630544735	3,658546873	2,905674057	0,350179844	0,61026271	-168,7
104,3	10,529193796	3,616145292	2,911717574	0,359299476	0,62018587	-168,85
104,15	10,428513256	3,574110106	2,917792946	0,368506176	0,62999533	-169
104	10,328501085	3,532439421	2,923900414	0,377801248	0,6396919	-169,15
103,85	10,229155248	3,491131345	2,930040218	0,387186020	0,64927638	-169,3
103,7	10,130473702	3,450183987	2,936212602	0,396661840	0,65874956	-169,45
103,55	10,032454397	3,409595454	2,942417812	0,406230084	0,66811226	-169,6
103,4	9,935095274	3,369363856	2,948656096	0,415892148	0,67736526	-169,75
103,25	9,838394269	3,329487302	2,954927704	0,425649454	0,68650937	-169,9
103,1	9,742349311	3,289963901	2,96123289	0,435503449	0,69554536	-170,05
102,95	9,646958320	3,250791763	2,96757191	0,445455604	0,70447404	-170,2
102,8	9,552219211	3,211968999	2,97394502	0,455507418	0,71329618	-170,35
102,65	9,458129891	3,173493721	2,980352483	0,465660414	0,72201257	-170,5
102,5	9,364688259	3,135364040	2,98679456	0,475916144	0,73062399	-170,65
102,35	9,271892210	3,097578069	2,993271519	0,486276186	0,73913121	-170,8
102,2	9,179739630	3,060133921	2,999783626	0,496742147	0,74753501	-170,95
102,05	9,088228398	3,023029711	3,006331153	0,507315662	0,75583617	-171,1
101,9	8,997356387	2,986263554	3,012914374	0,517998396	0,76403544	-171,25
101,75	8,907121464	2,949833566	3,019533565	0,528792042	0,7721336	-171,4
101,6	8,817521487	2,913737864	3,026189005	0,539698326	0,78013141	-171,55
101,45	8,728554311	2,877974566	3,032880976	0,550719001	0,78802963	-171,7
101,3	8,640217780	2,842541792	3,039609762	0,561855857	0,79582901	-171,85
101,15	8,552509735	2,807437661	3,046375652	0,573110711	0,80353032	-172
101	8,465428009	2,772660295	3,053178936	0,584485416	0,8111343	-172,15

100,85	8,378970429	2,738207817	3,060019907	0,595981858	0,8186417	-172,3
100,7	8,293134815	2,704078351	3,066898861	0,607601958	0,82605327	-172,45
100,55	8,207918981	2,670270023	3,073816097	0,619347670	0,83336975	-172,6
100,4	8,123320735	2,636780959	3,080771919	0,631220985	0,84059189	-172,75
100,25	8,039337879	2,603609288	3,08776663	0,643223931	0,84772041	-172,9
100,1	7,955968207	2,570753140	3,094800541	0,655358573	0,85475606	-173,05
99,95	7,873209509	2,538210645	3,101873961	0,667627013	0,86169956	-173,2
99,8	7,791059568	2,505979938	3,108987207	0,680031393	0,86855165	-173,35
99,65	7,709516160	2,474059153	3,116140595	0,692573894	0,87531305	-173,5
99,5	7,628577058	2,442446426	3,123334447	0,705256738	0,88198449	-173,65
99,35	7,548240025	2,411139896	3,130569089	0,718082189	0,88856668	-173,8
99,2	7,468502822	2,380137702	3,137844846	0,731052550	0,89506033	-173,95
99,05	7,389363201	2,349437987	3,145162052	0,744170172	0,90146618	-174,1
98,9	7,310818910	2,319038896	3,152521039	0,757437446	0,90778492	-174,25
98,75	7,232867691	2,288938573	3,159922148	0,770856810	0,91401726	-174,4
98,6	7,155507280	2,259135167	3,167365718	0,784430747	0,92016392	-174,55
98,45	7,078735408	2,229626828	3,174852095	0,798161788	0,92622559	-174,7
98,3	7,002549799	2,200411709	3,182381629	0,812052510	0,93220297	-174,85
98,15	6,926948173	2,171487964	3,189954671	0,826105542	0,93809677	-175
98	6,851928245	2,142853750	3,197571577	0,840323561	0,94390766	-175,15
97,85	6,777487723	2,114507227	3,205232707	0,854709295	0,94963635	-175,3
97,7	6,703624310	2,086446556	3,212938425	0,869265525	0,95528353	-175,45
97,55	6,630335704	2,058669901	3,220689097	0,883995085	0,96084986	-175,6
97,4	6,557619599	2,031175428	3,228485097	0,898900863	0,96633605	-175,75
97,25	6,485473682	2,003961308	3,236326798	0,913985804	0,97174277	-175,9
97,1	6,413895636	1,977025711	3,244214579	0,929252910	0,97707069	-176,05
96,95	6,342883139	1,950366813	3,252148824	0,944705239	0,98232048	-176,2
96,8	6,272433863	1,923982791	3,260129921	0,960345912	0,98749282	-176,35
96,65	6,202545476	1,897871823	3,26815826	0,976178107	0,99258838	-176,5
96,5	6,133215641	1,872032095	3,276234237	0,992205067	0,99760781	-176,65
96,35	6,064442016	1,846461790	3,284358252	1,008430097	1,00255178	-176,8
96,2	5,996222256	1,821159098	3,292530709	1,024856569	1,00742095	-176,95
96,05	5,928554008	1,796122211	3,300752016	1,041487918	1,01221596	-177,1
95,9	5,861434918	1,771349323	3,309022587	1,058327650	1,01693748	-177,25
95,75	5,794862624	1,746838632	3,317342838	1,075379340	1,02158615	-177,4
95,6	5,728834763	1,722588339	3,325713191	1,092646632	1,02616262	-177,55
95,45	5,663348966	1,698596649	3,334134074	1,110133244	1,03066753	-177,7
95,3	5,598402859	1,674861769	3,342605916	1,127842969	1,03510152	-177,85
95,15	5,533994064	1,651381911	3,351129154	1,145779674	1,03946523	-178
95	5,470120201	1,628155287	3,359704228	1,163947306	1,04375929	-178,15
94,85	5,406778883	1,605180117	3,368331583	1,182349890	1,04798433	-178,3
94,7	5,343967721	1,582454621	3,37701167	1,200991532	1,05214098	-178,45
94,55	5,281684321	1,559977024	3,385744944	1,219876421	1,05622986	-178,6
94,4	5,219926284	1,537745555	3,394531864	1,239008832	1,0602516	-178,75
94,25	5,158691211	1,515758445	3,403372898	1,258393127	1,06420681	-178,9

94,1	5,097976695	1,494013931	3,412268514	1,278033756	1,06809612	-179,05
93,95	5,037780329	1,472510252	3,421219188	1,297935261	1,07192012	-179,2
93,8	4,978099698	1,451245652	3,430225401	1,318102277	1,07567943	-179,35
93,65	4,918932389	1,430218377	3,439287641	1,338539533	1,07937467	-179,5
93,5	4,860275980	1,409426680	3,448406398	1,359251857	1,08300642	-179,65
93,35	4,802128050	1,388868815	3,457582169	1,380244177	1,08657529	-179,8
93,2	4,744486172	1,368543042	3,466815458	1,401521523	1,09008188	-179,95
93,05	4,687347917	1,348447623	3,476106774	1,423089029	1,09352679	-180,1
92,9	4,630710853	1,328580828	3,485456629	1,444951936	1,09691059	-180,25
92,75	4,574572545	1,308940926	3,494865545	1,467115595	1,10023389	-180,4
92,6	4,518930553	1,289526196	3,504334048	1,489585469	1,10349726	-180,55
92,45	4,463782437	1,270334916	3,513862669	1,512367137	1,10670129	-180,7
92,3	4,409125752	1,251365371	3,523451946	1,535466294	1,10984655	-180,85
92,15	4,354958051	1,232615851	3,533102424	1,558888756	1,11293363	-181
92	4,301276886	1,214084649	3,542814653	1,582640463	1,11596309	-181,15
91,85	4,248079802	1,195770064	3,55258919	1,606727481	1,1189355	-181,3
91,7	4,195364347	1,177670398	3,562426597	1,631156004	1,12185143	-181,45
91,55	4,143128062	1,159783958	3,572327445	1,655932359	1,12471145	-181,6
91,4	4,091368489	1,142109056	3,582292309	1,681063012	1,1275161	-181,75
91,25	4,040083165	1,124644010	3,592321773	1,706554562	1,13026596	-181,9
91,1	3,989269627	1,107387141	3,602416426	1,732413755	1,13296157	-182,05
90,95	3,938925408	1,090336775	3,612576864	1,758647482	1,13560348	-182,2
90,8	3,889048040	1,073491243	3,622803692	1,785262781	1,13819225	-182,35
90,65	3,839635054	1,056848883	3,633097519	1,812266846	1,14072841	-182,5
90,5	3,790683978	1,040408034	3,643458964	1,839667026	1,14321251	-182,65
90,35	3,742192338	1,024167044	3,65388865	1,867470832	1,14564509	-182,8
90,2	3,694157658	1,008124263	3,664387211	1,895685939	1,14802668	-182,95
90,05	3,646577462	0,992278049	3,674955286	1,924320190	1,15035781	-183,1
89,9	3,599449272	0,976626763	3,685593523	1,953381603	1,15263901	-183,25
89,75	3,552770607	0,961168772	3,696302576	1,982878372	1,15487082	-183,4
89,6	3,506538987	0,945902448	3,707083109	2,012818873	1,15705375	-183,55
89,45	3,460751929	0,930826169	3,717935792	2,043211668	1,15918831	-183,7
89,3	3,415406949	0,915938318	3,728861304	2,074065510	1,16127504	-183,85
89,15	3,370501564	0,901237283	3,739860331	2,105389349	1,16331444	-184
89	3,326033286	0,886721459	3,750933569	2,137192335	1,16530702	-184,15
88,85	3,281999631	0,872389244	3,762081722	2,169483824	1,1672533	-184,3
88,7	3,238398110	0,858239045	3,773305501	2,202273383	1,16915376	-184,45
88,55	3,195226236	0,844269272	3,784605626	2,235570795	1,17100893	-184,6
88,4	3,152481520	0,830478340	3,795982829	2,269386066	1,17281928	-184,75
88,25	3,110161472	0,816864673	3,807437845	2,303729430	1,17458533	-184,9
88,1	3,068263604	0,803426699	3,818971423	2,338611354	1,17630756	-185,05
87,95	3,026785425	0,790162850	3,83058432	2,374042545	1,17798645	-185,2
87,8	2,985724445	0,777071568	3,8422773	2,410033956	1,17962251	-185,35
87,65	2,945078174	0,764151296	3,854051139	2,446596792	1,1812162	-185,5
87,5	2,904844121	0,751400488	3,865906621	2,483742518	1,18276801	-185,65

87,35	2,865019797	0,738817600	3,877844541	2,521482862	1,18427841	-185,8
87,2	2,825602709	0,726401096	3,889865702	2,559829827	1,18574788	-185,95
87,05	2,786590370	0,714149446	3,901970919	2,598795696	1,1871769	-186,1
86,9	2,747980288	0,702061125	3,914161017	2,638393037	1,18856591	-186,25
86,75	2,709769975	0,690134617	3,926436828	2,678634715	1,1899154	-186,4
86,6	2,671956942	0,678368408	3,9387992	2,719533896	1,19122581	-186,55
86,45	2,634538699	0,666760994	3,951248986	2,761104057	1,19249762	-186,7
86,3	2,597512761	0,655310875	3,963787053	2,803358993	1,19373127	-186,85
86,15	2,560876640	0,644016559	3,976414279	2,846312830	1,19492722	-187
86	2,524627850	0,632876559	3,989131551	2,889980024	1,19608591	-187,15
85,85	2,488763905	0,621889396	4,00193977	2,934375383	1,19720779	-187,3
85,7	2,453282324	0,611053596	4,014839846	2,979514064	1,19829331	-187,45
85,55	2,418180622	0,600367692	4,027832701	3,025411591	1,1993429	-187,6
85,4	2,383456318	0,589830224	4,040919271	3,072083861	1,200357	-187,75
85,25	2,349106932	0,579439738	4,054100501	3,119547156	1,20133604	-187,9
85,1	2,315129986	0,569194787	4,06737735	3,167818152	1,20228046	-188,05
84,95	2,281523002	0,559093932	4,080750788	3,216913929	1,20319068	-188,2
84,8	2,248283505	0,549135737	4,0942218	3,266851987	1,20406712	-188,35
84,65	2,215409022	0,539318777	4,10779138	3,317650251	1,20491021	-188,5
84,5	2,182897081	0,529641631	4,121460538	3,369327086	1,20572037	-188,65
84,35	2,150745212	0,520102886	4,135230296	3,421901312	1,20649801	-188,8
84,2	2,118950947	0,510701136	4,149101688	3,475392209	1,20724354	-188,95
84,05	2,087511822	0,501434982	4,163075765	3,529819539	1,20795738	-189,1
83,9	2,056425371	0,492303031	4,177153589	3,585203551	1,20863993	-189,25
83,75	2,025689135	0,483303897	4,191336236	3,641565001	1,20929158	-189,4
83,6	1,995300656	0,474436202	4,205624797	3,698925164	1,20991275	-189,55
83,45	1,965257476	0,465698575	4,220020378	3,757305846	1,21050384	-189,7
83,3	1,935557143	0,457089651	4,234524098	3,816729403	1,21106522	-189,85
83,15	1,906197207	0,448608074	4,249137091	3,877218757	1,21159731	-190
83	1,877175220	0,440252493	4,263860508	3,938797406	1,21210047	-190,15
82,85	1,848488736	0,432021566	4,278695514	4,001489447	1,21257511	-190,3
82,7	1,820135316	0,423913957	4,29364329	4,065319591	1,2130216	-190,45
82,55	1,792112519	0,415928337	4,308705032	4,130313179	1,21344032	-190,6
82,4	1,764417911	0,408063386	4,323881953	4,196496203	1,21383165	-190,75
82,25	1,737049061	0,400317790	4,339175282	4,263895322	1,21419596	-190,9
82,1	1,710003539	0,392690243	4,354586265	4,332537882	1,21453362	-191,05
81,95	1,683278921	0,385179446	4,370116165	4,402451939	1,21484501	-191,2
81,8	1,656872787	0,377784106	4,385766261	4,473666275	1,21513048	-191,35
81,65	1,630782718	0,370502941	4,40153785	4,546210423	1,21539039	-191,5
81,5	1,605006302	0,363334673	4,417432249	4,620114686	1,21562511	-191,65
81,35	1,579541128	0,356278033	4,433450789	4,695410161	1,21583499	-191,8
81,2	1,554384793	0,349331761	4,449594822	4,772128766	1,21602039	-191,95
81,05	1,529534894	0,342494600	4,465865719	4,850303255	1,21618165	-192,1
80,9	1,504989034	0,335765306	4,482264868	4,929967255	1,21631912	-192,25
80,75	1,480744822	0,329142639	4,498793678	5,011155281	1,21643315	-192,4

80,6	1,456799869	0,322625367	4,515453576	5,093902768	1,21652408	-192,55
80,45	1,433151792	0,316212268	4,532246011	5,178246101	1,21659224	-192,7
80,3	1,409798212	0,309902125	4,549172451	5,264222637	1,21663798	-192,85
80,15	1,386736755	0,303693731	4,566234383	5,351870737	1,21666162	-193
80	1,363965053	0,297585883	4,583433319	5,441229801	1,21666349	-193,15
79,85	1,341480741	0,291577391	4,600770788	5,532340293	1,21664393	-193,3
79,7	1,319281461	0,285667067	4,618248344	5,625243775	1,21660325	-193,45
79,55	1,297364859	0,279853736	4,635867561	5,719982943	1,21654178	-193,6
79,4	1,275728586	0,274136228	4,653630036	5,816601661	1,21645984	-193,75
79,25	1,254370300	0,268513381	4,671537388	5,915144994	1,21635774	-193,9
79,1	1,233287664	0,262984042	4,689591262	6,015659250	1,21623579	-194,05
78,95	1,212478345	0,257547063	4,707793323	6,118192011	1,21609431	-194,2
78,8	1,191940017	0,252201308	4,726145263	6,222792183	1,21593361	-194,35
78,65	1,171670361	0,246945646	4,744648795	6,329510027	1,21575398	-194,5
78,5	1,151667061	0,241778954	4,76330566	6,438397207	1,21555574	-194,65
78,35	1,131927810	0,236700119	4,782117624	6,549506834	1,21533917	-194,8
78,2	1,112450305	0,231708033	4,801086476	6,662893508	1,21510458	-194,95
78,05	1,093232251	0,226801599	4,820214033	6,778613369	1,21485225	-195,1
77,9	1,074271358	0,221979726	4,83950214	6,896724143	1,21458249	-195,25
77,75	1,055565341	0,217241330	4,858952667	7,017285193	1,21429558	-195,4
77,6	1,037111926	0,212585339	4,878567511	7,140357571	1,2139918	-195,55
77,45	1,018908841	0,208010684	4,8983486	7,266004073	1,21367144	-195,7
77,3	1,000953824	0,203516307	4,918297888	7,394289294	1,21333478	-195,85
77,15	0,983244617	0,199101158	4,938417358	7,525279687	1,21298209	-196
77	0,965778971	0,194764195	4,958709025	7,659043621	1,21261365	-196,15
76,85	0,948554644	0,190504382	4,979174931	7,795651444	1,21222973	-196,3
76,7	0,931569399	0,186320694	4,999817151	7,935175547	1,21183061	-196,45
76,55	0,914821009	0,182212111	5,020637789	8,077690432	1,21141654	-196,6
76,4	0,898307252	0,178177623	5,041638984	8,223272780	1,2109878	-196,75
76,25	0,882025916	0,174216229	5,062822904	8,372001521	1,21054464	-196,9
76,1	0,865974792	0,170326934	5,084191752	8,523957911	1,21008732	-197,05
75,95	0,850151684	0,166508751	5,105747763	8,679225606	1,20961611	-197,2
75,8	0,834554400	0,162760703	5,127493208	8,837890745	1,20913125	-197,35
75,65	0,819180757	0,159081820	5,149430391	9,000042027	1,20863299	-197,5
75,5	0,804028580	0,155471139	5,171561652	9,165770804	1,20812159	-197,65
75,35	0,789095702	0,151927707	5,193889368	9,335171161	1,20759729	-197,8
75,2	0,774379963	0,148450578	5,216415951	9,508340017	1,20706033	-197,95
75,05	0,759879213	0,145038814	5,239143852	9,685377212	1,20651095	-198,1
74,9	0,745591308	0,141691487	5,262075558	9,866385613	1,2059494	-198,25
74,75	0,731514115	0,138407673	5,285213597	10,051471211	1,20537591	-198,4
74,6	0,717645507	0,135186460	5,308560537	10,240743232	1,20479072	-198,55
74,45	0,703983366	0,132026942	5,332118982	10,434314243	1,20419404	-198,7
74,3	0,690525584	0,128928223	5,355891583	10,632300271	1,20358612	-198,85
74,15	0,677270061	0,125889412	5,379881027	10,834820919	1,20296718	-199
74	0,664214705	0,122909629	5,404090049	11,041999491	1,20233745	-199,15

73,85	0,651357434	0,119988001	5,428521423	11,253963118	1,20169714	-199,3
73,7	0,638696174	0,117123662	5,453177969	11,470842894	1,20104647	-199,45
73,55	0,626228860	0,114315756	5,478062554	11,692774014	1,20038566	-199,6
73,4	0,613953438	0,111563433	5,503178086	11,919895914	1,19971493	-199,75
73,25	0,601867860	0,108865852	5,528527525	12,152352425	1,19903448	-199,9
73,1	0,589970091	0,106222181	5,554113877	12,390291923	1,19834453	-200,05
72,95	0,578258103	0,103631595	5,579940194	12,633867493	1,19764529	-200,2
72,8	0,566729877	0,101093277	5,606009582	12,883237097	1,19693695	-200,35
72,65	0,555383406	0,098606417	5,632325193	13,138563743	1,19621972	-200,5
72,5	0,544216690	0,096170215	5,658890236	13,400015671	1,1954938	-200,65
72,35	0,533227740	0,093783878	5,685707967	13,667766538	1,19475939	-200,8
72,2	0,522414578	0,091446620	5,712781698	13,941995612	1,19401668	-200,95
72,05	0,511775234	0,089157665	5,740114798	14,222887976	1,19326587	-201,1
71,9	0,501307748	0,086916244	5,767710687	14,510634740	1,19250715	-201,25
71,75	0,491010171	0,084721594	5,795572846	14,805433259	1,19174071	-201,4
71,6	0,480880564	0,082572963	5,823704811	15,107487361	1,19096673	-201,55
71,45	0,470916997	0,080469605	5,852110179	15,417007585	1,1901854	-201,7
71,3	0,461117552	0,078410783	5,880792607	15,734211426	1,18939689	-201,85
71,15	0,451480320	0,076395766	5,909755812	16,059323596	1,1886014	-202
71	0,442003403	0,074423832	5,939003576	16,392576286	1,1877991	-202,15
70,85	0,432684914	0,072494267	5,968539744	16,734209449	1,18699016	-202,3
70,7	0,423522976	0,070606365	5,998368225	17,084471086	1,18617476	-202,45
70,55	0,414515721	0,068759427	6,028492997	17,443617551	1,18535307	-202,6
70,4	0,405661295	0,066952761	6,058918104	17,811913861	1,18452525	-202,75

Columna de Baja Presión

Baja Presión						
Temperatura (K)	Presión N2 (bar)	Presión O2 (bar)	Volatilidad	Xn2	Yn2	Temperatura (°C)
113,15	17,721353599	6,809280272	2,60252962	-0,459058524	-4,51952134	-160
113	17,577914629	6,742408730	2,60706749	-0,456130870	-4,45434972	-160,15
112,85	17,435250207	6,676012024	2,61162654	-0,453193055	-4,38974128	-160,3
112,7	17,293358776	6,610088331	2,61620691	-0,450244928	-4,32569282	-160,45
112,55	17,152238768	6,544635827	2,62080874	-0,447286333	-4,26220111	-160,6
112,4	17,011888608	6,479652682	2,62543217	-0,444317115	-4,19926293	-160,75
112,25	16,872306713	6,415137068	2,63007735	-0,441337114	-4,13687508	-160,9
112,1	16,733491490	6,351087153	2,63474443	-0,438346168	-4,07503437	-161,05
111,95	16,595441338	6,287501100	2,63943355	-0,435344113	-4,01373761	-161,2
111,8	16,458154647	6,224377075	2,64414486	-0,432330783	-3,95298161	-161,35
111,65	16,321629798	6,161713238	2,64887851	-0,429306010	-3,8927632	-161,5
111,5	16,185865167	6,099507747	2,65363466	-0,426269620	-3,83307922	-161,65
111,35	16,050859115	6,037758760	2,65841345	-0,423221441	-3,77392651	-161,8
111,2	15,916610001	5,976464431	2,66321505	-0,420161295	-3,71530192	-161,95
111,05	15,783116171	5,915622913	2,6680396	-0,417089002	-3,65720232	-162,1
110,9	15,650375964	5,855232357	2,67288726	-0,414004380	-3,59962456	-162,25
110,75	15,518387712	5,795290911	2,67775819	-0,410907244	-3,54256552	-162,4
110,6	15,387149735	5,735796722	2,68265256	-0,407797406	-3,48602208	-162,55
110,45	15,256660347	5,676747934	2,68757051	-0,404674674	-3,42999114	-162,7
110,3	15,126917855	5,618142692	2,69251222	-0,401538855	-3,3744696	-162,85
110,15	14,997920553	5,559979136	2,69747785	-0,398389752	-3,31945436	-163
110	14,869666731	5,502255406	2,70246756	-0,395227163	-3,26494233	-163,15
109,85	14,742154669	5,444969640	2,70748152	-0,392050887	-3,21093045	-163,3
109,7	14,615382638	5,388119974	2,7125199	-0,388860717	-3,15741565	-163,45
109,55	14,489348900	5,331704542	2,71758286	-0,385656442	-3,10439486	-163,6
109,4	14,364051712	5,275721478	2,72267059	-0,382437850	-3,05186503	-163,75
109,25	14,239489319	5,220168914	2,72778325	-0,379204725	-2,99982313	-163,9
109,1	14,115659960	5,165044978	2,73292101	-0,375956846	-2,94826611	-164,05
108,95	13,992561864	5,110347801	2,73808406	-0,372693990	-2,89719095	-164,2
108,8	13,870193254	5,056075508	2,74327257	-0,369415930	-2,84659464	-164,35
108,65	13,748552342	5,002226227	2,74848672	-0,366122436	-2,79647416	-164,5
108,5	13,627637335	4,948798081	2,75372669	-0,362813274	-2,74682651	-164,65
108,35	13,507446428	4,895789194	2,75899266	-0,359488204	-2,6976487	-164,8
108,2	13,387977810	4,843197688	2,76428481	-0,356146986	-2,64893775	-164,95
108,05	13,269229664	4,791021684	2,76960334	-0,352789374	-2,60069068	-165,1
107,9	13,151200160	4,739259302	2,77494843	-0,349415117	-2,55290453	-165,25
107,75	13,033887464	4,687908660	2,78032027	-0,346023963	-2,50557633	-165,4
107,6	12,917289732	4,636967877	2,78571905	-0,342615653	-2,45870314	-165,55

107,45	12,801405112	4,586435068	2,79114496	-0,339189924	-2,41228202	-165,7
107,3	12,686231745	4,536308351	2,79659819	-0,335746512	-2,36631003	-165,85
107,15	12,571767763	4,486585840	2,80207896	-0,332285144	-2,32078426	-166
107	12,458011290	4,437265648	2,80758744	-0,328805546	-2,27570178	-166,15
106,85	12,344960444	4,388345890	2,81312384	-0,325307437	-2,23105969	-166,3
106,7	12,232613332	4,339824678	2,81868837	-0,321790534	-2,1868551	-166,45
106,55	12,120968055	4,291700124	2,82428122	-0,318254548	-2,14308511	-166,6
106,4	12,010022706	4,243970339	2,8299026	-0,314699184	-2,09974686	-166,75
106,25	11,899775370	4,196633434	2,83555273	-0,311124143	-2,05683745	-166,9
106,1	11,790224124	4,149687518	2,8412318	-0,307529123	-2,01435404	-167,05
105,95	11,681367038	4,103130703	2,84694003	-0,303913813	-1,97229378	-167,2
105,8	11,573202173	4,056961095	2,85267763	-0,300277901	-1,93065381	-167,35
105,65	11,465727584	4,011176806	2,85844483	-0,296621067	-1,88943131	-167,5
105,5	11,358941316	3,965775942	2,86424182	-0,292942986	-1,84862344	-167,65
105,35	11,252841408	3,920756612	2,87006885	-0,289243329	-1,80822739	-167,8
105,2	11,147425891	3,876116923	2,87592612	-0,285521759	-1,76824036	-167,95
105,05	11,042692789	3,831854985	2,88181386	-0,281777935	-1,72865954	-168,1
104,9	10,938640118	3,787968903	2,88773229	-0,278011510	-1,68948214	-168,25
104,75	10,835265886	3,744456785	2,89368165	-0,274222131	-1,65070539	-168,4
104,6	10,732568094	3,701316740	2,89966216	-0,270409440	-1,61232651	-168,55
104,45	10,630544735	3,658546873	2,90567406	-0,266573070	-1,57434275	-168,7
104,3	10,529193796	3,616145292	2,91171757	-0,262712650	-1,53675134	-168,85
104,15	10,428513256	3,574110106	2,91779295	-0,258827803	-1,49954954	-169
104	10,328501085	3,532439421	2,92390041	-0,254918143	-1,46273462	-169,15
103,85	10,229155248	3,491131345	2,93004022	-0,250983281	-1,42630386	-169,3
103,7	10,130473702	3,450183987	2,9362126	-0,247022817	-1,39025453	-169,45
103,55	10,032454397	3,409595454	2,94241781	-0,243036349	-1,35458394	-169,6
103,4	9,935095274	3,369363856	2,9486561	-0,239023462	-1,31928937	-169,75
103,25	9,838394269	3,329487302	2,9549277	-0,234983740	-1,28436816	-169,9
103,1	9,742349311	3,289963901	2,96123289	-0,230916755	-1,2498176	-170,05
102,95	9,646958320	3,250791763	2,96757191	-0,226822074	-1,21563505	-170,2
102,8	9,552219211	3,211968999	2,97394502	-0,222699255	-1,18181783	-170,35
102,65	9,458129891	3,173493721	2,98035248	-0,218547850	-1,14836331	-170,5
102,5	9,364688259	3,135364040	2,98679456	-0,214367401	-1,11526882	-170,65
102,35	9,271892210	3,097578069	2,99327152	-0,210157442	-1,08253175	-170,8
102,2	9,179739630	3,060133921	2,99978363	-0,205917502	-1,05014947	-170,95
102,05	9,088228398	3,023029711	3,00633115	-0,201647098	-1,01811938	-171,1
101,9	8,997356387	2,986263554	3,01291437	-0,197345739	-0,98643886	-171,25
101,75	8,907121464	2,949833566	3,01953356	-0,193012926	-0,95510532	-171,4
101,6	8,817521487	2,913737864	3,026189	-0,188648151	-0,92411618	-171,55
101,45	8,728554311	2,877974566	3,03288098	-0,184250897	-0,89346887	-171,7
101,3	8,640217780	2,842541792	3,03960976	-0,179820637	-0,86316082	-171,85
101,15	8,552509735	2,807437661	3,04637565	-0,175356836	-0,83318947	-172
101	8,465428009	2,772660295	3,05317894	-0,170858947	-0,80355228	-172,15
100,85	8,378970429	2,738207817	3,06001991	-0,166326414	-0,77424672	-172,3

100,7	8,293134815	2,704078351	3,06689886	-0,161758672	-0,74527026	-172,45
100,55	8,207918981	2,670270023	3,0738161	-0,157155145	-0,71662039	-172,6
100,4	8,123320735	2,636780959	3,08077192	-0,152515245	-0,68829459	-172,75
100,25	8,039337879	2,603609288	3,08776663	-0,147838376	-0,66029037	-172,9
100,1	7,955968207	2,570753140	3,09480054	-0,143123929	-0,63260524	-173,05
99,95	7,873209509	2,538210645	3,10187396	-0,138371284	-0,60523673	-173,2
99,8	7,791059568	2,505979938	3,10898721	-0,133579811	-0,57818237	-173,35
99,65	7,709516160	2,474059153	3,11614059	-0,128748866	-0,5514397	-173,5
99,5	7,628577058	2,442446426	3,12333445	-0,123877795	-0,52500628	-173,65
99,35	7,548240025	2,411139896	3,13056909	-0,118965930	-0,49887966	-173,8
99,2	7,468502822	2,380137702	3,13784485	-0,114012593	-0,47305743	-173,95
99,05	7,389363201	2,349437987	3,14516205	-0,109017091	-0,44753716	-174,1
98,9	7,310818910	2,319038896	3,15252104	-0,103978720	-0,42231644	-174,25
98,75	7,232867691	2,288938573	3,15992215	-0,098896760	-0,39739288	-174,4
98,6	7,155507280	2,259135167	3,16736572	-0,093770481	-0,37276409	-174,55
98,45	7,078735408	2,229626828	3,1748521	-0,088599136	-0,34842769	-174,7
98,3	7,002549799	2,200411709	3,18238163	-0,083381965	-0,32438131	-174,85
98,15	6,926948173	2,171487964	3,18995467	-0,078118194	-0,3006226	-175
98	6,851928245	2,142853750	3,19757158	-0,072807035	-0,27714921	-175,15
97,85	6,777487723	2,114507227	3,20523271	-0,067447682	-0,2539588	-175,3
97,7	6,703624310	2,086446556	3,21293842	-0,062039317	-0,23104904	-175,45
97,55	6,630335704	2,058669901	3,2206891	-0,056581105	-0,20841762	-175,6
97,4	6,557619599	2,031175428	3,2284851	-0,051072193	-0,18606223	-175,75
97,25	6,485473682	2,003961308	3,2363268	-0,045511714	-0,16398057	-175,9
97,1	6,413895636	1,977025711	3,24421458	-0,039898783	-0,14217035	-176,05
96,95	6,342883139	1,950366813	3,25214882	-0,034232500	-0,1206293	-176,2
96,8	6,272433863	1,923982791	3,26012992	-0,028511943	-0,09935515	-176,35
96,65	6,202545476	1,897871823	3,26815826	-0,022736177	-0,07834565	-176,5
96,5	6,133215641	1,872032095	3,27623424	-0,016904246	-0,05759855	-176,65
96,35	6,064442016	1,846461790	3,28435825	-0,011015175	-0,03711161	-176,8
96,2	5,996222256	1,821159098	3,29253071	-0,005067971	-0,0168826	-176,95
96,05	5,928554008	1,796122211	3,30075202	0,000938379	0,00309069	-177,1
95,9	5,861434918	1,771349323	3,30902259	0,007004909	0,02281045	-177,25
95,75	5,794862624	1,746838632	3,31734284	0,013132671	0,0422789	-177,4
95,6	5,728834763	1,722588339	3,32571319	0,019322741	0,06149822	-177,55
95,45	5,663348966	1,698596649	3,33413407	0,025576213	0,08047057	-177,7
95,3	5,598402859	1,674861769	3,34260592	0,031894207	0,09919812	-177,85
95,15	5,533994064	1,651381911	3,35112915	0,038277861	0,11768303	-178
95	5,470120201	1,628155287	3,35970423	0,044728340	0,13592744	-178,15
94,85	5,406778883	1,605180117	3,36833158	0,051246829	0,15393349	-178,3
94,7	5,343967721	1,582454621	3,37701167	0,057834540	0,17170329	-178,45
94,55	5,281684321	1,559977024	3,38574494	0,064492706	0,18923895	-178,6
94,4	5,219926284	1,537745555	3,39453186	0,071222589	0,20654259	-178,75
94,25	5,158691211	1,515758445	3,4033729	0,078025474	0,22361629	-178,9
94,1	5,097976695	1,494013931	3,41226851	0,084902672	0,24046214	-179,05

93,95	5,037780329	1,472510252	3,42121919	0,091855523	0,25708219	-179,2
93,8	4,978099698	1,451245652	3,4302254	0,098885393	0,27347852	-179,35
93,65	4,918932389	1,430218377	3,43928764	0,105993676	0,28965318	-179,5
93,5	4,860275980	1,409426680	3,4484064	0,113181796	0,3056082	-179,65
93,35	4,802128050	1,388868815	3,45758217	0,120451204	0,32134561	-179,8
93,2	4,744486172	1,368543042	3,46681546	0,127803385	0,33686744	-179,95
93,05	4,687347917	1,348447623	3,47610677	0,135239851	0,35217568	-180,1
92,9	4,630710853	1,328580828	3,48545663	0,142762147	0,36727235	-180,25
92,75	4,574572545	1,308940926	3,49486555	0,150371852	0,38215941	-180,4
92,6	4,518930553	1,289526196	3,50433405	0,158070575	0,39683886	-180,55
92,45	4,463782437	1,270334916	3,51386267	0,165859962	0,41131266	-180,7
92,3	4,409125752	1,251365371	3,52345195	0,173741691	0,42558276	-180,85
92,15	4,354958051	1,232615851	3,53310242	0,181717478	0,43965111	-181
92	4,301276886	1,214084649	3,54281465	0,189789072	0,45351964	-181,15
91,85	4,248079802	1,195770064	3,55258919	0,197958264	0,46719028	-181,3
91,7	4,195364347	1,177670398	3,5624266	0,206226878	0,48066494	-181,45
91,55	4,143128062	1,159783958	3,57232744	0,214596781	0,49394553	-181,6
91,4	4,091368489	1,142109056	3,58229231	0,223069879	0,50703393	-181,75
91,25	4,040083165	1,124644010	3,59232177	0,231648117	0,51993203	-181,9
91,1	3,989269627	1,107387141	3,60241643	0,240333484	0,53264171	-182,05
90,95	3,938925408	1,090336775	3,61257686	0,249128013	0,54516481	-182,2
90,8	3,889048040	1,073491243	3,62280369	0,258033778	0,5575032	-182,35
90,65	3,839635054	1,056848883	3,63309752	0,267052900	0,56965871	-182,5
90,5	3,790683978	1,040408034	3,64345896	0,276187547	0,58163317	-182,65
90,35	3,742192338	1,024167044	3,65388865	0,285439932	0,5934284	-182,8
90,2	3,694157658	1,008124263	3,66438721	0,294812320	0,60504622	-182,95
90,05	3,646577462	0,992278049	3,67495529	0,304307022	0,61648841	-183,1
89,9	3,599449272	0,976626763	3,68559352	0,313926403	0,62775676	-183,25
89,75	3,552770607	0,961168772	3,69630258	0,323672879	0,63885305	-183,4
89,6	3,506538987	0,945902448	3,70708311	0,333548920	0,64977905	-183,55
89,45	3,460751929	0,930826169	3,71793579	0,343557050	0,66053651	-183,7
89,3	3,415406949	0,915938318	3,7288613	0,353699851	0,67112718	-183,85
89,15	3,370501564	0,901237283	3,73986033	0,363979961	0,68155279	-184
89	3,326033286	0,886721459	3,75093357	0,374400079	0,69181507	-184,15
88,85	3,281999631	0,872389244	3,76208172	0,384962964	0,70191572	-184,3
88,7	3,238398110	0,858239045	3,7733055	0,395671436	0,71185646	-184,45
88,55	3,195226236	0,844269272	3,78460563	0,406528381	0,72163897	-184,6
88,4	3,152481520	0,830478340	3,79598283	0,417536749	0,73126494	-184,75
88,25	3,110161472	0,816864673	3,80743785	0,428699559	0,74073603	-184,9
88,1	3,068263604	0,803426699	3,81897142	0,440019897	0,75005391	-185,05
87,95	3,026785425	0,790162850	3,83058432	0,451500920	0,75922022	-185,2
87,8	2,985724445	0,777071568	3,8422773	0,463145858	0,76823662	-185,35
87,65	2,945078174	0,764151296	3,85405114	0,474958016	0,77710472	-185,5
87,5	2,904844121	0,751400488	3,86590662	0,486940775	0,78582614	-185,65
87,35	2,865019797	0,738817600	3,87784454	0,499097594	0,79440249	-185,8

87,2	2,825602709	0,726401096	3,8898657	0,511432012	0,80283538	-185,95
87,05	2,786590370	0,714149446	3,90197092	0,523947651	0,81112638	-186,1
86,9	2,747980288	0,702061125	3,91416102	0,536648219	0,81927707	-186,25
86,75	2,709769975	0,690134617	3,92643683	0,549537509	0,82728902	-186,4
86,6	2,671956942	0,678368408	3,9387992	0,562619404	0,83516379	-186,55
86,45	2,634538699	0,666760994	3,95124899	0,575897879	0,84290292	-186,7
86,3	2,597512761	0,655310875	3,96378705	0,589377002	0,85050794	-186,85
86,15	2,560876640	0,644016559	3,97641428	0,603060939	0,85798037	-187
86	2,524627850	0,632876559	3,98913155	0,616953955	0,86532174	-187,15
85,85	2,488763905	0,621889396	4,00193977	0,631060416	0,87253355	-187,3
85,7	2,453282324	0,611053596	4,01483985	0,645384792	0,87961728	-187,45
85,55	2,418180622	0,600367692	4,0278327	0,659931662	0,88657442	-187,6
85,4	2,383456318	0,589830224	4,04091927	0,674705715	0,89340644	-187,75
85,25	2,349106932	0,579439738	4,0541005	0,689711753	0,90011481	-187,9
85,1	2,315129986	0,569194787	4,06737735	0,704954694	0,90670097	-188,05
84,95	2,281523002	0,559093932	4,08075079	0,720439576	0,91316637	-188,2
84,8	2,248283505	0,549135737	4,0942218	0,736171560	0,91951243	-188,35
84,65	2,215409022	0,539318777	4,10779138	0,752155933	0,92574058	-188,5
84,5	2,182897081	0,529641631	4,12146054	0,768398113	0,93185222	-188,65
84,35	2,150745212	0,520102886	4,1352303	0,784903650	0,93784876	-188,8
84,2	2,118950947	0,510701136	4,14910169	0,801678231	0,94373158	-188,95
84,05	2,087511822	0,501434982	4,16307577	0,818727684	0,94950207	-189,1
83,9	2,056425371	0,492303031	4,17715359	0,836057983	0,95516158	-189,25
83,75	2,025689135	0,483303897	4,19133624	0,853675249	0,96071149	-189,4
83,6	1,995300656	0,474436202	4,2056248	0,871585758	0,96615313	-189,55
83,45	1,965257476	0,465698575	4,22002038	0,889795942	0,97148785	-189,7
83,3	1,935557143	0,457089651	4,2345241	0,908312395	0,97671697	-189,85
83,15	1,906197207	0,448608074	4,24913709	0,927141878	0,98184181	-190
83	1,877175220	0,440252493	4,26386051	0,946291322	0,98686368	-190,15
82,85	1,848488736	0,432021566	4,27869551	0,965767836	0,99178387	-190,3
82,7	1,820135316	0,423913957	4,29364329	0,985578708	0,99660367	-190,45
82,55	1,792112519	0,415928337	4,30870503	1,005731414	1,00132437	-190,6
82,4	1,764417911	0,408063386	4,32388195	1,026233620	1,00594721	-190,75
82,25	1,737049061	0,400317790	4,33917528	1,047093190	1,01047347	-190,9
82,1	1,710003539	0,392690243	4,35458627	1,068318191	1,01490438	-191,05
81,95	1,683278921	0,385179446	4,37011616	1,089916898	1,01924119	-191,2
81,8	1,656872787	0,377784106	4,38576626	1,111897803	1,02348512	-191,35
81,65	1,630782718	0,370502941	4,40153785	1,134269616	1,02763738	-191,5
81,5	1,605006302	0,363334673	4,41743225	1,157041277	1,03169919	-191,65
81,35	1,579541128	0,356278033	4,43345079	1,180221959	1,03567174	-191,8
81,2	1,554384793	0,349331761	4,44959482	1,203821077	1,03955621	-191,95
81,05	1,529534894	0,342494600	4,46586572	1,227848294	1,04335378	-192,1
80,9	1,504989034	0,335765306	4,48226487	1,252313530	1,04706563	-192,25
80,75	1,480744822	0,329142639	4,49879368	1,277226965	1,0506929	-192,4
80,6	1,456799869	0,322625367	4,51545358	1,302599054	1,05423674	-192,55

80,45	1,433151792	0,316212268	4,53224601	1,328440529	1,05769829	-192,7
80,3	1,409798212	0,309902125	4,54917245	1,354762412	1,06107868	-192,85
80,15	1,386736755	0,303693731	4,56623438	1,381576018	1,06437902	-193
80	1,363965053	0,297585883	4,58343332	1,408892971	1,06760043	-193,15
79,85	1,341480741	0,291577391	4,60077079	1,436725208	1,070744	-193,3
79,7	1,319281461	0,285667067	4,61824834	1,465084989	1,07381081	-193,45
79,55	1,297364859	0,279853736	4,63586756	1,493984911	1,07680196	-193,6
79,4	1,275728586	0,274136228	4,65363004	1,523437914	1,0797185	-193,75
79,25	1,254370300	0,268513381	4,67153739	1,553457291	1,08256149	-193,9
79,1	1,233287664	0,262984042	4,68959126	1,584056705	1,085332	-194,05
78,95	1,212478345	0,257547063	4,70779332	1,615250193	1,08803104	-194,2
78,8	1,191940017	0,252201308	4,72614526	1,647052183	1,09065967	-194,35
78,65	1,171670361	0,246945646	4,7446488	1,679477502	1,09321889	-194,5
78,5	1,151667061	0,241778954	4,76330566	1,712541393	1,09570973	-194,65
78,35	1,131927810	0,236700119	4,78211762	1,746259523	1,09813318	-194,8
78,2	1,112450305	0,231708033	4,80108648	1,780648002	1,10049023	-194,95
78,05	1,093232251	0,226801599	4,82021403	1,815723390	1,10278187	-195,1
77,9	1,074271358	0,221979726	4,83950214	1,851502720	1,10500908	-195,25
77,75	1,055565341	0,217241330	4,85895267	1,888003503	1,10717281	-195,4
77,6	1,037111926	0,212585339	4,87856751	1,925243753	1,10927403	-195,55
77,45	1,018908841	0,208010684	4,8983486	1,963241994	1,11131368	-195,7
77,3	1,000953824	0,203516307	4,91829789	2,002017286	1,1132927	-195,85
77,15	0,983244617	0,199101158	4,93841736	2,041589232	1,11521201	-196
77	0,965778971	0,194764195	4,95870902	2,081978004	1,11707254	-196,15
76,85	0,948554644	0,190504382	4,97917493	2,123204356	1,1188752	-196,3
76,7	0,931569399	0,186320694	4,99981715	2,165289646	1,12062088	-196,45
76,55	0,914821009	0,182212111	5,02063779	2,208255855	1,12231047	-196,6
76,4	0,898307252	0,178177623	5,04163898	2,252125605	1,12394487	-196,75
76,25	0,882025916	0,174216229	5,0628229	2,296922184	1,12552494	-196,9
76,1	0,865974792	0,170326934	5,08419175	2,342669565	1,12705155	-197,05
75,95	0,850151684	0,166508751	5,10574776	2,389392430	1,12852555	-197,2
75,8	0,834554400	0,162760703	5,12749321	2,437116192	1,1299478	-197,35
75,65	0,819180757	0,159081820	5,14943039	2,485867022	1,13131913	-197,5
75,5	0,804028580	0,155471139	5,17156165	2,535671871	1,13264036	-197,65
75,35	0,789095702	0,151927707	5,19388937	2,586558499	1,13391233	-197,8
75,2	0,774379963	0,148450578	5,21641595	2,638555500	1,13513584	-197,95
75,05	0,759879213	0,145038814	5,23914385	2,691692331	1,13631169	-198,1
74,9	0,745591308	0,141691487	5,26207556	2,745999342	1,13744069	-198,25
74,75	0,731514115	0,138407673	5,2852136	2,801507806	1,13852361	-198,4
74,6	0,717645507	0,135186460	5,30856054	2,858249948	1,13956124	-198,55
74,45	0,703983366	0,132026942	5,33211898	2,916258982	1,14055434	-198,7
74,3	0,690525584	0,128928223	5,35589158	2,975569139	1,14150368	-198,85
74,15	0,677270061	0,125889412	5,37988103	3,036215709	1,14241	-199
74	0,664214705	0,122909629	5,40409005	3,098235073	1,14327405	-199,15
73,85	0,651357434	0,119988001	5,42852142	3,161664739	1,14409657	-199,3

73,7	0,638696174	0,117123662	5,45317797	3,226543387	1,14487829	-199,45
73,55	0,626228860	0,114315756	5,47806255	3,292910906	1,14561991	-199,6
73,4	0,613953438	0,111563433	5,50317809	3,360808437	1,14632216	-199,75
73,25	0,601867860	0,108865852	5,52852753	3,430278417	1,14698574	-199,9
73,1	0,589970091	0,106222181	5,55411388	3,501364625	1,14761134	-200,05
72,95	0,578258103	0,103631595	5,57994019	3,574112229	1,14819964	-200,2
72,8	0,566729877	0,101093277	5,60600958	3,648567836	1,14875133	-200,35
72,65	0,555383406	0,098606417	5,63232519	3,724779542	1,14926708	-200,5
72,5	0,544216690	0,096170215	5,65889024	3,802796988	1,14974755	-200,65
72,35	0,533227740	0,093783878	5,68570797	3,882671411	1,15019339	-200,8
72,2	0,522414578	0,091446620	5,7127817	3,964455705	1,15060525	-200,95
72,05	0,511775234	0,089157665	5,7401148	4,048204481	1,15098377	-201,1
71,9	0,501307748	0,086916244	5,76771069	4,133974126	1,15132959	-201,25
71,75	0,491010171	0,084721594	5,79557285	4,221822873	1,15164332	-201,4
71,6	0,480880564	0,082572963	5,82370481	4,311810861	1,15192558	-201,55
71,45	0,470916997	0,080469605	5,85211018	4,404000212	1,15217697	-201,7
71,3	0,461117552	0,078410783	5,88079261	4,498455101	1,15239811	-201,85
71,15	0,451480320	0,076395766	5,90975581	4,595241831	1,15258958	-202
71	0,442003403	0,074423832	5,93900358	4,694428912	1,15275198	-202,15
70,85	0,432684914	0,072494267	5,96853974	4,796087144	1,15288586	-202,3
70,7	0,423522976	0,070606365	5,99836822	4,900289705	1,15299182	-202,45
70,55	0,414515721	0,068759427	6,028493	5,007112232	1,15307041	-202,6
70,4	0,405661295	0,066952761	6,0589181	5,116632925	1,15312219	-202,75