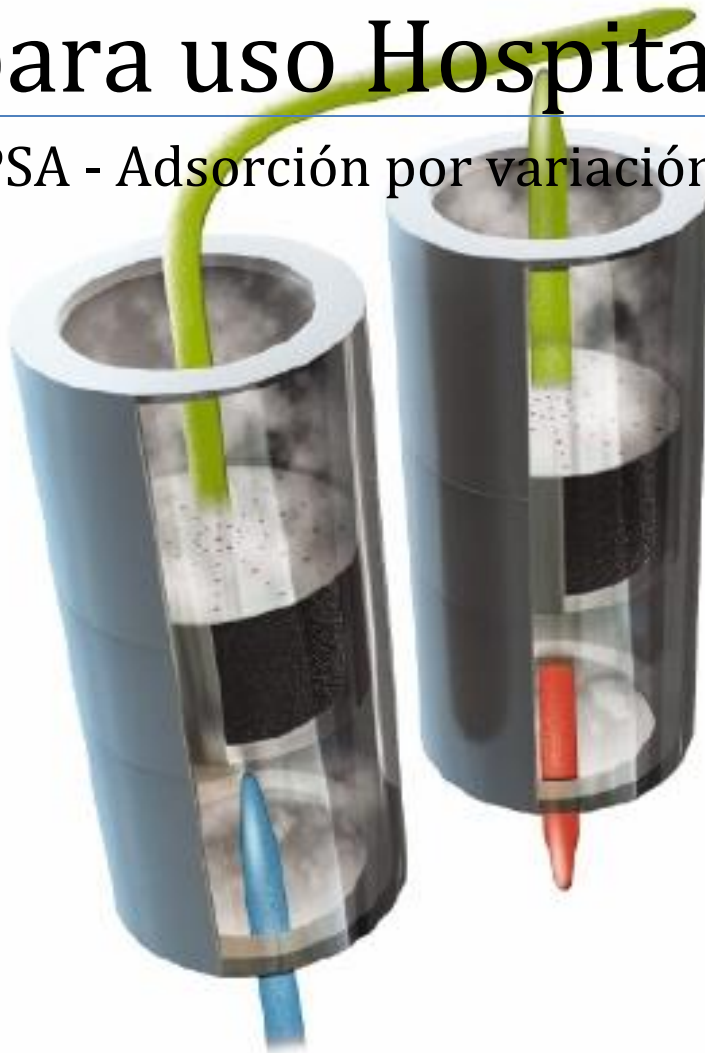




# Generador de Oxígeno para uso Hospitalario

PSA - Adsorción por variación de presión



**Boldrini Mariano**  
**Palacios Gustavo**



RINFI se desarrolla en forma conjunta entre el INTEMA y la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

Tiene como objetivo recopilar, organizar, gestionar, difundir y preservar documentos digitales en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales y Ciencias Afines.

A través del Acceso Abierto, se pretende aumentar la visibilidad y el impacto de los resultados de la investigación, asumiendo las políticas y cumpliendo con los protocolos y estándares internacionales para la interoperabilidad entre repositorios



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-  
NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

**Contenido**

1 Motivación..... 11

2 Objetivo y Alcance ..... 12

3 Separación de Gases ..... 13

    3.1 Separación Criogénica ..... 14

    3.2 Separación por membrana ..... 15

    3.3 Separación por adsorción..... 17

        3.3.1 PSA – Pressure Swing Adsorption..... 19

        3.3.2 VSA – Vacuum Swing Adsorption ..... 21

        3.3.3 TSA – Temperature Swing Adsorption..... 22

        3.3.4 ESA – Electric Swing Adsorption ..... 23

    3.4 Condensación ..... 24

    3.5 Absorción ..... 24

    3.6 Otros Métodos de Separación..... 25

    3.7 Resumen..... 25

    3.8 Elección del método de separación..... 25

4 Proceso PSA..... 26

    4.1 Teoría de la adsorción..... 26

    4.2 Adsorbentes ..... 30

4.2.1	Carbón Activado .....	31
4.2.2	Zeolitas .....	32
4.2.3	Gel de Sílice.....	37
4.2.4	Alúmina Activada .....	38
4.2.5	Otros adsorbentes .....	39
4.3	Elección del adsorbente .....	40
5	Ciclo de adsorción en etapas.....	42
5.1	Ciclo de 3 etapas.....	43
5.2	Ciclo de Skarstrom de 4 etapas .....	44
5.3	Mejoras al ciclo PSA básico. ....	49
5.3.1	Despresurización a favor de la corriente (DFC) .....	49
5.3.2	Igualación de presión (IP). ....	51
6	Análisis del problema y Definición de la Capacidad.....	52
6.1	Cálculos y diseño .....	54
6.2	Software de simulación de proceso PSA.....	60
6.2.1	Descripción .....	60
6.2.2	Características: .....	61
6.2.3	Beneficios: .....	62
6.3	Simulación.....	64
6.3.1	Condiciones de simulación: .....	64

6.3.2	Capturas de simulación en software: .....	64
6.3.3	Resultados de Simulación:.....	71
6.3.4	Ensayos Complementarios .....	71
7	Descripción del Sistema y Componentes.....	72
7.1	Equipo de compresión.....	74
7.2	Pulmón de estabilización de aire húmedo .....	74
7.3	Equipo de purga de condensados .....	75
7.4	Equipo de filtración previo .....	76
7.5	Equipo de separación de agua y aceite.....	77
7.6	Equipo de secado de aire .....	79
7.7	Equipo de filtración secundaria .....	79
7.8	Pulmón de estabilización de aire seco .....	80
7.9	Equipo de separación por adsorción .....	80
7.10	Pulmón de oxígeno .....	81
7.11	Esquema del sistema .....	82
8	Selección de componentes y equipos.....	83
8.1	Selección de componentes (cantidad, tamaño, especificaciones) .	83
8.1.1	Unidad compresora.....	83
8.1.2	Filtros .....	85
8.1.3	Purgador Electrónico.....	86

8.1.4	Separador de agua y aceite .....	87
8.1.5	Secador.....	88
8.1.6	Camas de Adsorción.....	89
8.1.7	Pulmones de Almacenamiento .....	96
8.1.8	Válvulas .....	97
8.1.9	Tuberías y accesorios .....	98
8.2	Variantes y Mejoras.....	118
8.2.1	Sistema de llenado de garrafas para venta individual.....	118
8.2.2	Almacenamiento de nitrógeno .....	118
8.2.3	Licuefacción del oxígeno producido.....	119
9	Estudio de viabilidad económica.....	120
9.1	Presupuesto .....	120
9.2	Estimación de costos.....	121
9.2.1	Estimación de la inversión .....	121
9.2.2	Estimación del costo de producción.....	122
9.3	Pagos de inversión .....	126
9.4	Flujos ordinarios .....	127
9.4.1	Gastos ordinarios.....	127
9.5	Flujos extraordinarios .....	128
9.5.1	Vida útil .....	128

9.5.2	Valores residuales .....	129
9.5.3	Gastos extraordinarios .....	130
9.5.4	Ingresos extraordinarios.....	130
9.5.5	Beneficios brutos .....	130
9.6	Evaluación financiera del proyecto .....	131
9.6.1	Amortización fiscal .....	131
9.6.2	Impuestos .....	131
9.6.3	Flujos de caja.....	133
9.6.4	Índice de rentabilidad.....	134
9.7	Comparación con la adquisición del oxígeno .....	138
10	Conclusiones .....	139
11	Bibliografía.....	140
12	Dedicatoria .....	1

## APÉNDICES:

### APÉNDICE A – MEMORIA DE CÁLCULO DE CAMAS DE ADSORCIÓN

### APÉNDICE B – MEMORIA DE CÁLCULO DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO

### APÉNDICE C – PLANO CONTRUCTIVO DE LAS CAMAS DE ADSORCIÓN Y PULMÓNES DE AIRE Y OXIGENO

### APÉNDICE D – PLANO GENERAL DEL SISTEMA

#### LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3-1 COMPONENTES DEL AIRE.	13
FIGURA 3-2 PROCESOS INVOLUCRADOS EN LA SEPARACIÓN CRIOGÉNICA DEL AIRE	15
FIGURA 3-3 SEPARACIÓN POR MEMBRANAS	16
FIGURA 3-4 FUNCIONAMIENTO DE SEPARACIÓN POR MEMBRANAS	17
FIGURA 3-5 ESQUEMA GENERAL DE SEPARACIÓN POR VARIACIÓN DE PRESIÓN	20
FIGURA 3-6 ESQUEMA SIMPLIFICADO DE UN SISTEMA DE VSA	22
FIGURA 4-1 PERFIL DE CONCENTRACIÓN A LO LARGO DEL LECHO DE ADSORBENTE	27
FIGURA 4-2 5 TIPOS DE ISOTERMAS DE ADSORCIÓN	29
FIGURA 4-3 CARBÓN ACTIVO	32
FIGURA 4-4 DISTINTAS FORMAS DE ZEOLITAS COMERCIALES	33
FIGURA 4-5 ESTRUCTURA TETRAÉDRICA DE LA ZEOLITA	34
FIGURA 4-6 GEL DE SÍLICE	38
FIGURA 4-7 DISTINTOS TIPOS DE ALÚMINAS ACTIVADAS	39
FIGURA 4-8 ISOTERMAS DE ADSORCIÓN DE N <sub>2</sub> PARA UNA ZEOLITA 5A	41
FIGURA 4-9 ISOTERMAS DE ADSORCIÓN DE O <sub>2</sub> PARA UNA ZEOLITA 5A	42
FIGURA 5-1 LAY-OUT BÁSICO DE UNA PLANTA PROCESO PSA DE 2 COLUMNAS PARA SEPARACIÓN DE AIRE.	43
FIGURA 5-2. ESQUEMAS DEL CICLO DE SKARSTROM DE 3 ETAPAS	44
FIGURA 5-3 FLUJO DE GASES DEL CICLO BÁSICO DE SKARSTROM	46
FIGURA 5-4 CICLO TEÓRICO DE PRESIONES DENTRO DE UNA CAMA DE ADSORCIÓN	47
FIGURA 5-5 DETALLE DEL AVANCE DEL FRENTE DE CONCENTRACIÓN	48
FIGURA 5-6 FLUJO DE GASES DEL CICLO PSA CON DESPRESURIZACIÓN A FAVOR DE LA CORRIENTE	50
FIGURA 5-7 FLUJO DE GASES DEL CICLO PSA CON IGUALACIÓN DE PRESIÓN	52
FIGURA 6-1 RECUPERACIÓN VS. RELACIÓN DE PRESIONES PARA $\beta = 0,1$	56



## Generador de Oxígeno para uso Hospitalario

FIGURA 6-2 RECUPERACIÓN VS. RELACIÓN DE PRESIONES PARA $\beta = 0,9$	57
FIGURA 6-3 RECUPERACIÓN VS. RELACIÓN DE PRESIONES PARA CONCENTRACIÓN DE OXÍGENO; ( $y_0 = 0,78$ y $\beta = 0,582$ )	58
FIGURA 6-4 CAPTURA DE PANTALLA DEL ASPEN ADSIM	60
FIGURA 6-5 SIMULACIÓN DE UN PROCESO PSA EN ASPEN ADSIM	63
FIGURA 6-6 VISTA DE VENTANA PRINCIPAL DE SOFTWARE ASPEN ADSIM.	65
FIGURA 6-7 LAY-OUT: PLANTA PILOTO	65
FIGURA 6-8 CARACTERÍSTICAS Y DIMENSIONES DEL LECHO	67
FIGURA 6-9 CARACTERÍSTICAS Y DIMENSIONES DEL LECHO	68
FIGURA 6-10 DIAGRAMA DE PRESIONES DEL CICLO.	68
FIGURA 6-11 DIAGRAMA COMPOSICIÓN DE CORRIENTE INTERIOR AL LECHO DE ADSORCIÓN, A LO LARGO DEL MISMO	69
FIGURA 6-12 DIAGRAMA TEMPORAL DE: COMPOSICIÓN (FRACCIÓN MOLAR) DE CORRIENTE DE PRODUCTO	70
FIGURA 6-13 COMPOSICIÓN: CORRIENTE DE PRODUCTO SIMULACIÓN NÚMERO 2. (PUREZA APROX. $O_2=86,0\%$ )	71
FIGURA 7-1 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE ADSORCIÓN POR DIFERENCIA DE PRESIÓN	73
FIGURA 7-2 ELEMENTOS DEL PURGADOR DE CONSENSADOS	75
FIGURA 7-3 ESQUEMA DE TREN DE FILTROS	77
FIGURA 7-4 ELEMENTOS Y OPERACIÓN DEL SEPARADOR DE AGUA Y ACEITE	78
FIGURA 7-5 ESQUEMA DE TREN DE FILTROS	80
FIGURA 7-6 ESQUEMA ILUSTRATIVO 3D DEL SISTEMA.	82
FIGURA 8-1 MODELO DE COMPRESOR SELECCIONADO	84
FIGURA 8-2 IMÁGENES DE LOS FILTROS SELECCIONADOS	85
FIGURA 8-3 PLANO DE LA VÁLVULA FCD	86
FIGURA 8-4 PURGADOR ELECTRÓNICO	86
FIGURA 8-5 SEPARADOR DE AGUA Y ACEITE, VISTA EXTERIOR Y DIMENSIONES	87
FIGURA 8-6 MODELO DEL SECADOR SELECCIONADO	88
FIGURA 8-7 IMAGEN DEL SIMULADOR PV ELITE	90
FIGURA 8-8 ESQUEMA 3D DE LA CAMA DE ADSORCIÓN N°1	91
FIGURA 8-9 PLANO CONSTRUCTIVO EQUIPO PLANTA MEGA.	94
FIGURA 8-10 ESQUEMA 3D DEL PULMÓN DE AIRE	96
FIGURA 8-11- LONGITUDES EQUIVALENTES PARA ACCESORIOS DE CAÑERÍAS NEUMÁTICAS.	101
FIGURA 8-12 ESQUEMA DE UN SISTEMA PSA CON LLENADO DE GARRAFAS	118
FIGURA 9-1 PERIODO DE RECUPERACIÓN	135

FIGURA 9-2 TASA INTERNA DE RETORNO	137
------------------------------------	-----

## LISTA DE TABLAS

TABLA 3-1 DETALLE DE LA COMPOSICIÓN DEL AIRE.	14
TABLA 3-2 COMPARACIÓN ENTRE LOS DISTINTOS MÉTODOS DE SEPARACIÓN	25
TABLA 4-1 DIFERENCIAS ENTRE ADSORCIÓN FÍSICA Y ADSORCIÓN QUÍMICA	28
TABLA 4-2 USOS DE LAS ZEOLITAS	37
TABLA 6-1 CONSUMO GRANEL	52
TABLA 6-2 CONSUMO TANQUES	52
TABLA 6-3 CONSUMO	52
TABLA 6-4 CANTIDADES DE OXÍGENO NECESARIOS PARA CUBRIR LOS PICOS DE CONSUMO	54
TABLA 6-5 PENDIENTES DE ISOTERMAS DE EQUILIBRIO (KA Y KB) Y RELACIÓN DE SELECTIVIDAD (B) PARA NITRÓGENO Y OXÍGENO EN LA ZEOLITA 5A.	58
TABLA 6-6 RESUMEN DE CANTIDADES DE GAS DE ENTRADA Y SALIDA	59
TABLA 6-7 PROPIEDADES Y COMPONENTES DE LA CORRIENTE DE ENTRADA	67
TABLA 6-8 TABLA DE COMPOSICIÓN: CORRIENTE DE PRODUCTO. (PUREZA O <sub>2</sub> =89,7%)	70
TABLA 6-9 DETALLE DE VOLUMEN DE VACÍO ADOPTADO POR EL SOFTWARE PARA LOS CASQUETES INFERIOR Y SUPERIOR DEL LECHO DE ADSORCIÓN (%VOL. VACÍO DE TANQUE)	70
TABLA 8-1 COMPARACIÓN ENTRE RECIPIENTES	95
TABLA 9-1 COSTOS DE EQUIPOS	121
TABLA 9-2 ESTIMACIÓN DEL CAPITAL MEDIANTE LOS FACTORES DE PETER & TIMMERHAUS	122
TABLA 9-3 COSTO DE LOS SERVICIOS PARA EL 100% DE LA PRODUCCIÓN	123
TABLA 9-4 COSTOS DE MANO DE OBRA PARA EL 100% DE LA PRODUCCIÓN	125
TABLA 9-5 BENEFICIOS BRUTOS	131
TABLA 9-6 FLUJO DE CAJA	134
TABLA 9-7 VALOR ACTUAL NETO	137

## LISTA DE ECUACIONES

ECUACIÓN 4-1	33
ECUACIÓN 4-2	37
ECUACIÓN 6-1	55
ECUACIÓN 6-2	55
ECUACIÓN 6-3	55

ECUACIÓN 6-4	55
ECUACIÓN 6-5	56
ECUACIÓN 6-6	59

### LISTA DE SÍMBOLOS Y UNIDADES

T: TEMPERATURA

°F: GRADOS FARENHEIT

°C: GRADOS CENTIGRADOS

P: PRESION

KG/CM<sup>2</sup>: KILOGRAMO POR CENTIMETRO CUADRADO

PSI: POUND PER SQUARE INCH

MPA: MEGA PASCALES

MAWP: MAXIMUM ALLOWABLE WORKING PRESSURE (MAXIMA PRESIÓN ADMISIBLE DE OPERACIÓN)

HS: HORAS

MIN: MINUTOS

SEG: SEGUNDOS

M<sup>3</sup>: METROS CUBICOS

LTS: LITROS

%: PORCENTAJE

μ: MICRONES

### LISTA DE ACRÓNIMOS

HIGA: HOSPITAL INTERZONAL GENERAL DE AGUDOS

PSA: PRESSURE SWING ADSORPTION

VSA: VACUUM SWING ADSORPTION

TSA: TEMPERATURE SWING ADSORPTION

DFC: DEPRESURIZACIÓN A FAVOR DE LA CORRIENTE

ITM: ION TRANSPORT MEMBRANE

PH: PRESIÓN MÁXIMA

PL: PRESIÓN MÍNIMA

## 1 Motivación

Oxígeno, de símbolo O, es un elemento químico gaseoso ligeramente magnético, incoloro, inodoro e insípido. El oxígeno es el elemento más abundante en la Tierra y participa de manera importante en el ciclo energético de los seres vivos, siendo el gas vital por ser esencial en la respiración celular de los organismos aeróbicos.

El oxígeno respirado por los organismos aerobios participa en la conversión de nutrientes en energía. Casi todas las plantas y animales, incluyendo los seres humanos, requieren oxígeno, ya sea en estado libre o combinado, para mantenerse con vida. Su disminución provoca hipoxemia y la falta total de él puede producir anoxia pudiendo provocar la muerte.

El oxígeno es el gas que sostiene la vida para el ser humano y es utilizado ampliamente en el ámbito medicinal en el tratamiento de enfermedades respiratorias, como gas vital en la aplicación de anestesia y previene la hipoxemia post operatoria, que se presenta hasta en 50% de los pacientes sometidos a cirugía torácica o abdominal mayor; se ha encontrado que esta condición es común aún en pacientes considerados de bajo riesgo.

El Hospital Interzonal General de Agudos (de aquí en adelante H.I.G.A.) "Dr. Oscar E. Allende" ubicado en la ciudad de Mar del Plata utiliza actualmente oxígeno producido por Praxair, una de las mayores productoras de gases industriales a nivel mundial y la primera empresa proveedora en América. Este oxígeno es adquirido de dos formas: a granel o envasado en tubos. El primero es almacenado en grandes tanques ubicados en los terrenos del establecimiento, y los tubos son empleados para fines específicos o donde no es posible el transporte del primero.

Uno de los principales inconvenientes que afronta el H.I.G.A. es cubrir los picos de consumo de oxígeno, asegurando el cumplimiento de su deber como establecimiento público de salud sustentando el bienestar de la comunidad del partido de General Pueyrredón.

A partir de este problema, la motivación de este proyecto es alcanzar un sistema autosustentable de generación de oxígeno de forma tal que el establecimiento logre cubrir los picos de consumo, independizándose de forma parcial de las redes comercialmente de adquisición, distribución y almacenamiento del insumo en cuestión (Oxígeno hospitalario).

## **2 Objetivo y Alcance**

El objetivo del presente proyecto es el diseño de un sistema mecánico de separación de los gases presentes en el aire con el fin de obtener oxígeno de alta pureza apto para uso hospitalario.

Se realizará un estudio teórico de los principios físicos y químicos de la separación de gases y de la teoría de adsorción, se analizarán los distintos métodos de separación de gases, los distintos tipos de adsorbentes utilizables y se describirá el ciclo básico de separación de gases mediante el modelo de adsorción por variación de presión (PSA por sus siglas en inglés), sus variantes y mejoras.

Este desarrollo se aplicará a un caso real y práctico donde se obtendrán las variables de entrada a los cálculos posteriores de capacidad y dimensionamiento del sistema.

Además, se realizará una simulación de proceso para obtener una visión aproximada de las variables involucradas.

Se efectuarán el cálculo y comprobación mecánica de partes componentes del sistema y selección de equipos principales y accesorios implicados.

Se estimarán los costos de adquisición del sistema.

### 3 Separación de Gases

El aire es una mezcla de gases y, en proporciones ligeramente variables, está compuesto por nitrógeno (78%), oxígeno (21%), vapor de agua (0-7%), ozono, dióxido de carbono, hidrógeno y gases nobles como neón y argón (1%).



*Figura 3-1 Componentes del aire.*

Los componentes principales en el aire en la atmósfera terrestre son el nitrógeno y el oxígeno. Estos gases presentan diferentes características y propiedades físicas y/o químicas por lo que es posible realizar una separación de los mismos cuando están presentes en forma de mezcla en el aire.

De esta forma se puede lograr la obtención de cualquiera de ellos con una pureza determinada y para ello existen diferentes procesos para lograrlo donde se diferencian principalmente tres métodos: la separación a bajas temperaturas (criogénica), la separación por membrana y la separación por adsorción. El método utilizado depende del gas que se desea obtener, de la cantidad que se desea producir y del costo de inversión y producción que se está dispuesto a destinar.

En la Tabla 3-1 se listan todos los componentes presentes en el aire y la proporción de cada uno de ellos en el aire que respiramos.

Componente	Símbolo Químico	% en aire
Nitrógeno	N	78.048
Oxígeno	O	20.946
Argón	Ar	0.9340
Dióxido de Carbono	CO <sub>2</sub>	0.035
Neón	Ne	0.001818
Helio	He	0.000524
Kriptón	Kr	0.000114
Xenón	Xe	0.000006
Hidrógeno	H	0.000055
Metano	CH <sub>4</sub>	0.0001745
Óxido Nitroso	N <sub>2</sub> O	0.00005
Vapor de Agua	H <sub>2</sub> O	Variable
Ozono	O <sub>3</sub>	Variable
Partículas	-	Variable

*Tabla 3-1 Detalle de la composición del aire.*

### 3.1 Separación Criogénica

La separación criogénica de aire es un proceso por el cual es posible obtener grandes cantidades de gases o líquidos de alta pureza. Éste proceso fue iniciado por el Dr. Carl von Linde en el siglo 20 y todavía se utiliza hoy en día para la producción de gases a gran escala.

Esta tecnología se basa en el hecho de que los diferentes constituyentes del aire tienen diferentes puntos de ebullición, y manipulando el entorno en términos de presión y temperatura, es posible separar el aire en sus componentes.

Varios procesos son necesarios en una planta de separación criogénica de aire entre los cuales se encuentra la compresión de aire, su purificación, el enfriamiento, la destilación y compresión del producto. Es por esto que se trata de un método que requiere de una gran cantidad de energía para su funcionamiento.

En la Figura 3-2 se muestra un diagrama de proceso de la separación criogénica del aire.

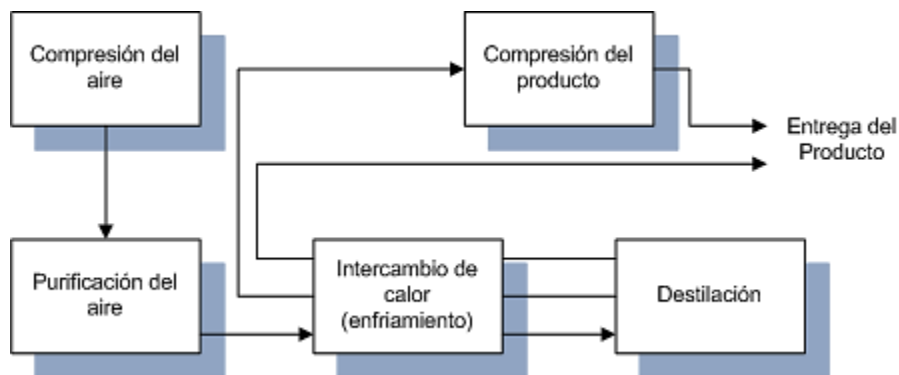


Figura 3-2 Procesos involucrados en la separación criogénica del aire

Vale destacar que este método es el único económicamente viable para la obtención de argón puesto que éste gas es tan sólo el 1% del aire y se obtiene como un sub-producto en plantas de oxígeno de alta pureza.

### 3.2 Separación por membrana

La separación de aire por membrana es otro de los métodos utilizados para separar gases. Se trata una tecnología que cuenta con más de 20 años de antigüedad y ha demostrado tener ventajas sobre otros métodos de separación tales como compacidad y poco peso, permite diseños modulares, es de bajo mantenimiento, bajo consumo de energía, bajo costo y amigable con el medio ambiente.

Este método está basado en el principio de que diferentes gases tienen diferentes tasas de permeabilidad a través de un film de polímero. Por ejemplo, el oxígeno (más vapor de agua y dióxido de carbono) es considerado un “gas rápido” que propaga más rápidamente a través de las paredes de los tubos que los “gases lentos” argón y nitrógeno. Esta difusión “gas rápido/gas lento” permite que el aire seco se convierta en un producto que es una mezcla de gases inertes, en su mayoría de nitrógeno y argón, y un “permeado” de baja presión, o gas de desecho enriquecido en oxígeno que es venteadado a través de la cáscara.



En la Figura 3-3 se muestra un esquema básico del principio de la separación por membrana donde se puede ver que de una mezcla de gases de alimentación se logra retener un gas y permear otro a través de la membrana. También existe la posibilidad de utilizar una corriente de barrido proveniente de alguna realimentación de gas permeado.

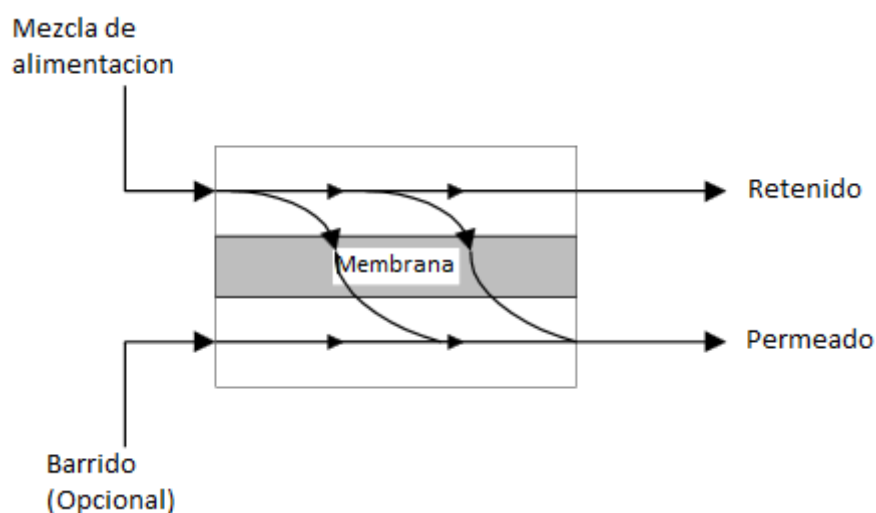


Figura 3-3 Separación por membranas

Las membranas presentan un método simple y menos costoso de producir oxígeno en comparación con otros procesos. El dilema asociado con la separación de membrana para la purificación de oxígeno es que las membranas requieren una gran cantidad de área superficial. Ciertas membranas cerámicas permiten la separación con un área más pequeña, pero requieren una alta corriente eléctrica. Esto presenta un problema de seguridad con la corriente y el calor que se produce. El equipo utilizado en la separación depende del tipo de membrana seleccionada. Por ejemplo, una membrana que separa utilizando un gradiente de presión como fuerza impulsora requiere un equipo que conste con un compresor y equipos que puedan soportar una presión sustancial.

En la Figura 3-4 se muestra el funcionamiento de la separación por membrana en un recipiente y la velocidad relativa de permeabilidad de los distintos gases de la mezcla de alimentación.

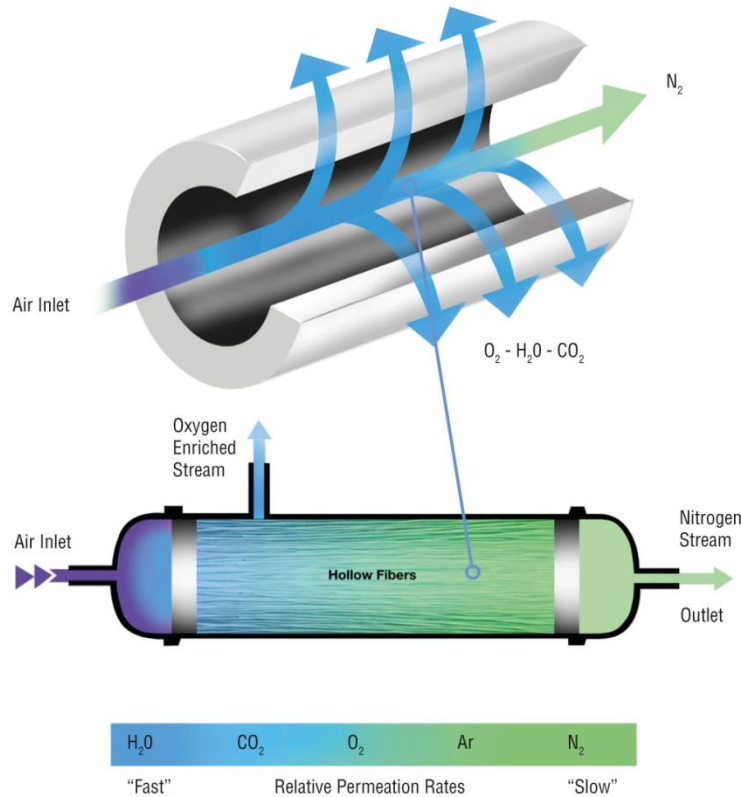


Figura 3-4 Funcionamiento de separación por membranas

### 3.3 Separación por adsorción

La adsorción es una operación de separación de mezclas fluidas que se produce por la retención de uno o varios componentes sobre la superficie interna de un sólido poroso. Esta adsorción se produce por la existencia de fuerzas de interacción entre el adsorbato y el adsorbente. Según el grado de interacción adsorbente-adsorbato la adsorción puede ser física, producida por fuerzas intermoleculares de tipo Van der Waals o puentes de hidrógeno, o química, donde la fuerza de atracción es similar a la de un enlace químico.

La retención de adsorbibles (moléculas o iones) en disolución por sólidos adsorbentes presenta un gran interés práctico por su aplicación en procesos de separación y purificación de efluentes. Esta técnica presenta la ventaja con respecto a otras operaciones de separación convencionales de permitir la separación de componentes con propiedades físicas similares, o bien, la separación de

componentes que se encuentren en bajas concentraciones (impurezas o contaminantes).

El conocimiento de la cinética y el equilibrio de adsorción es necesario para estimar la viabilidad de un material como adsorbente en un proceso, si bien, en muchos casos, el equilibrio de adsorción es la información más importante a la hora de seleccionar el adsorbente para dicho proceso.

A escala industrial, se opera mediante ciclos repetitivos cuyas dos etapas básicas son la adsorción y la regeneración. En la etapa de adsorción, el alimento se hace circular por el lecho que adsorbe uno o varios de los compuestos que se desea separar, ya sea porque se trate del adsorbato de interés o bien porque se trate de una impureza que se desea eliminar, dejando pasar el resto de la mezcla. Cuando el lecho llega a su capacidad máxima de adsorción, la alimentación se envía a otro lecho limpio mientras se procede a la regeneración del primero, extrayéndole las sustancias que han sido adsorbidas previamente. Dentro de la tecnología de adsorción para la separación en fase gas se puede distinguir entre:

- PSA (Pressure Swing Adsorption, adsorción con variación de presión): el adsorbente se regenera mediante reducción de la presión.
- VSA (Vacuum Swing Adsorption, adsorción con variación de vacío): el adsorbente se regenera mediante con variación de presión): el adsorbente se regenera mediante reducción por debajo de la presión atmosférica.
- TSA (Temperature Swing Adsorption, adsorción con variación de temperatura): el adsorbente se regenera mediante aumento de temperatura.
- ESA (Electric Swing Adsorption, adsorción con calentamiento por corriente eléctrica): el adsorbente se regenera al hacer pasar una corriente de bajo voltaje por el adsorbente.

La aplicación de una técnica de separación u otra depende principalmente de la composición de la mezcla a separar, tanto en el número y proporción de los componentes principales, como de las impurezas que puedan estar presentes y de las condiciones de operación.

Tras comentar las principales técnicas empleadas en la actualidad para la separación de gases, se describirán los fundamentos de la adsorción y en particular de la tecnología PSA, ya que ésta será la tecnología propuesta para la separación de oxígeno.

### 3.3.1 PSA – Pressure Swing Adsorption

Los procesos de separación de aire por adsorción (PSA) se basan en el hecho de que bajo presión los gases tienden a ser atraídos a superficies sólidas o "adsorbentes". Cuanto mayor sea la presión más gas es adsorbido y cuando se reduce la presión el gas se libera o es de-sorbido. Se pueden utilizar procesos PSA para separar gases en una mezcla de diferentes gases ya que estos tienden a ser atraídos a diferentes superficies sólidas más o menos fuertemente.

Por ejemplo, si una mezcla de gases como el aire, se hace pasar a presión a través de un recipiente que contiene un lecho adsorbente que atrae nitrógeno más fuertemente de lo que atrae oxígeno, parte o todo el nitrógeno se quedará en la cama, y el gas que sale del recipiente estará enriquecido en oxígeno. Cuando el lecho satura su capacidad para adsorber nitrógeno se puede regenerar mediante la reducción de la presión, liberando de este modo el nitrógeno adsorbido. Está entonces listo para otro ciclo de producción de aire enriquecido con oxígeno. Esto puede observarse en la Figura 3-5 donde se muestran dos recipientes llenos de adsorbente que atraen más fuertemente nitrógeno que oxígeno. En el recipiente de la izquierda se está produciendo la adsorción de nitrógeno y la salida de oxígeno, mientras que en el recipiente de la derecha se está llevando a cabo la desorción del nitrógeno del adsorbente y su posterior desechado.

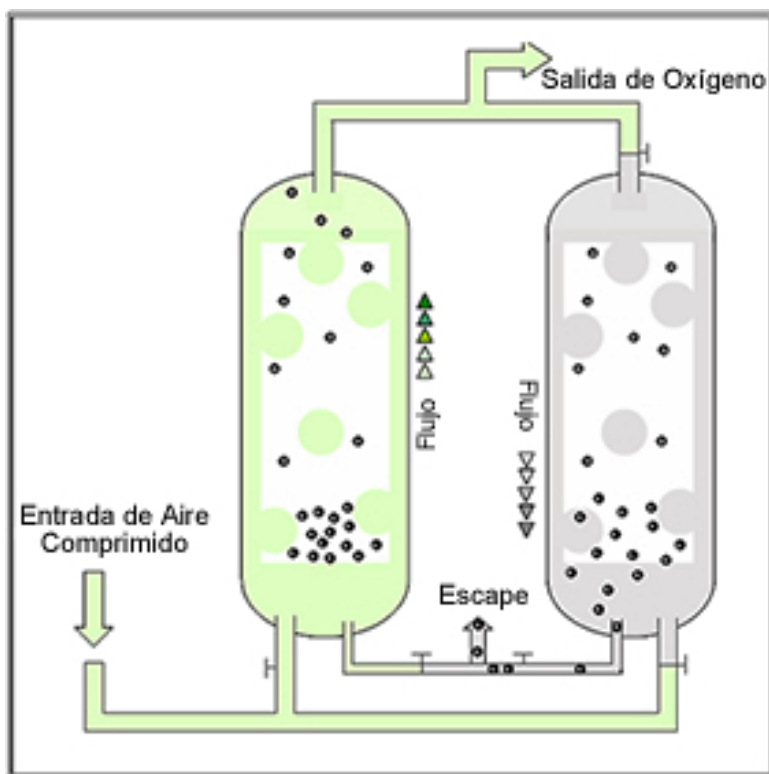


Figura 3-5 Esquema general de separación por variación de presión

### 3.3.1.1 Historia y Aplicaciones

Los primeros ciclos de adsorción por variación de presión fueron inventados entre 1957-1958 por Montgareuil, Domine y Skarstrom. El denominado “aparato de Skarstrom” fue utilizado para retirar vapor de agua del aire y se utilizó en unidades de separación de baja escala. Esta patente original se asignó a Exxon Research and Engineering en 1958. Otra patente fue la entregada a la empresa L’Air Liquide en 1964 desarrollada por Montgareuil y Domine, la cual contaba con algunas modificaciones con respecto a la patente original de Skarstrom.

Desde la invención de la PSA, el proceso se ha utilizado en diferentes aplicaciones:

- La mayoría de los sistemas PSA son utilizados en la purificación de hidrógeno generado por la reforma de vapor de combustibles fósiles, como el gas natural.

- Para la purificación del hidrógeno obtenido en reactores de oxidación parcial, o para extraer hidrógeno a partir de una corriente de desecho de gas diluido de planta, que de otra forma se quemaría para generación de vapor.
- La generación de Oxígeno también es beneficiosa en reacciones de oxidación donde la tasa es función de la presión parcial de oxígeno. Esto es cierto para hornos y motores de combustión interna.
- Sistemas de generación de oxígeno a bordo (OBOGs) se utilizan en fuerzas armadas y aviones civiles para proporcionar oxígeno respirable, en vez de llevar las botellas de gas.
- Remoción de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en la etapa final de síntesis comercial a gran escala de hidrógeno, para su uso en refinerías de petróleo y la producción de amoníaco ( $\text{NH}_3$ ).
- Separación de dióxido de carbono de un biogás, para incrementar el contenido de metano. Gracias al ciclo de PSA el biogás puede ser mejorado para alcanzar una calidad similar al gas natural.
- Unidades generadoras de nitrógeno de alta pureza (hasta un 99.9995%) a partir de aire comprimido.
- Producción en pequeña escala de oxígeno y nitrógeno de puridades razonables. La tecnología PSA tiene una importante utilización en la industria médica para la producción de oxígeno, particularmente en zonas remotas donde el almacenamiento criogénico y mediante cilindros de alta presión no es posible, o para concentradores de oxígeno hogareño empleados por personas que requieren de una fuente constante o intermitente de oxígeno concentrado.

### 3.3.2 VSA – Vacuum Swing Adsorption

La adsorción por variación de vacío (VSA) difiere de la técnica de adsorción por variación de presión (PSA) debido al hecho de que opera a temperaturas y presiones cercanas a las del ambiente. VSA podría ser descrito como un

subconjunto de la categoría PSA. Se diferencian principalmente en que el PSA normalmente expulsa el aire a presiones atmosféricas, y utiliza una alimentación de gas a presión en el proceso de separación. VSA extrae el gas a través del proceso de separación por medio de vacío. Para los sistemas de oxígeno y nitrógeno VSA, el vacío se genera típicamente por medio de una bomba de vacío. Sistemas VPSA (adsorción por variación de presión y vacío) aplican gas a presión para el proceso de separación y también aplican un vacío para el gas de purga.

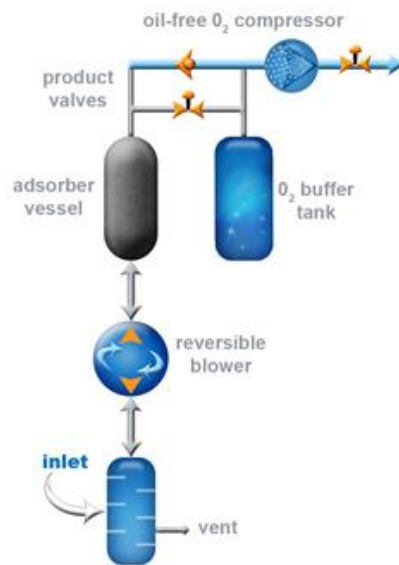


Figura 3-6 Esquema simplificado de un sistema de VSA

### 3.3.3 TSA – Temperature Swing Adsorption

La adsorción por variación de temperatura (TSA) es otra técnica usada para regenerar un lecho de adsorbente saturado con el gas de desecho. Considerando que la adsorción por variación de presión (PSA) utiliza cambios en la presión para liberar gas adsorbido, TSA varía o modula cambios de temperatura para eliminar el gas adsorbido.

La tecnología de TSA comenzó comercialmente en los años 60 y continúa en la actualidad para el secado de aire comprimido y de gas natural. TSA explota la capacidad de ciertos materiales adsorbentes, tales como alúmina activada, gel de

sílice y zeolitas, para adsorber los gases a temperaturas moderadas (40 °C, 100 °F) y más tarde liberarlos cuando la temperatura sube por encima de 120 °C (250 °F). TSA puede separar un solo gas a partir de una mezcla de gases. Un sistema típico de TSA emplea un proceso cíclico donde una serie de vasos comunicantes que contienen adsorbente se someten a carga sucesiva con el gas objetivo seguido de calentamiento y enfriamiento de pasos para producir un flujo continuo de gas producto seco o purificado.

Las ventajas de TSA por sobre PSA son que opera a menores presiones, tiene más bajos costos de producción (aunque cuesta más el costo de adquisición) y pueden lograrse mayores valores de pureza.

### **3.3.4 ESA – Electric Swing Adsorption**

Si bien se han desarrollado métodos de adsorción actuales como la Adsorción por cambio de presión (PSA) y la Adsorción por cambio de temperatura (TSA), existe un costo de energético no deseado durante la etapa de desorción.

Esto reduce en gran medida la eficiencia de generación de energía y se debe a las condiciones termodinámicas requeridas para la liberación de CO<sub>2</sub>, incluidas bajas presiones y altas temperaturas. La adsorción de oscilación de campo eléctrico (EFSA) está diseñada para reducir la carga de energía parásita utilizando un campo eléctrico aplicado para impulsar el ciclo del O<sub>2</sub> con un interruptor básico on / off para la separación de gases. La termodinámica de las interacciones adsorbente / adsorbato se modifica instantáneamente con el campo externo. Si tiene éxito, el proceso se puede realizar con adsorbentes estacionarios en condiciones ambientales, evitando la necesidad de grandes cambios en la temperatura, la presión o la concentración del sistema. El material absorbente se puede reutilizar después de liberar O<sub>2</sub> con el campo apagado, haciendo que el proceso sea reversible de forma inherente.

La reversibilidad de este modelo estacionario también reducirá los tiempos de ciclo de captura y liberación de O<sub>2</sub>, ya que la termodinámica del absorbente se cambia rápidamente en relación con las tecnologías existentes. Además, la



liberación repentina de grandes volúmenes de O<sub>2</sub> en un espacio pequeño puede comprimir el gas y comenzar el proceso de presurización necesario para contener grandes cantidades de oxígeno. La realización completa de la EFSA a su máximo potencial debería aumentar la eficiencia de la producción total de energía, haciendo de la EFSA una opción deseable para la captura de gases.

### 3.4 Condensación

El proceso consiste en enfriar la corriente de gas a una temperatura tal que condense el componente que se desea separar, que debe tener una baja presión de vapor, y así poder recoger el condensado. La condensación del gas puede realizarse por aumento de presión, por descenso de temperatura o por una combinación de ambas, aunque suele utilizarse la disminución de temperatura ya que resulta más económico. Este proceso suele emplearse a modo de pretratamiento antes de aplicar un proceso de incineración, absorción o adsorción. Como técnica para la depuración de gases, su interés se centra en la eliminación de compuestos orgánicos volátiles procedentes de gases de combustión. Esta técnica presenta como ventajas el tratarse de una tecnología relativamente sencilla y barata. Como principales desventajas, presenta bajas eficiencias y tendencia de las instalaciones al ensuciamiento (Yazbek y Delebarre, 2005).

### 3.5 Absorción

La absorción es el proceso por el que un componente de una mezcla gaseosa se transfiere hacia una fase líquida (disolvente). El componente debe tener una elevada difusividad y solubilidad, y también es necesario que el área interfacial gas-líquido sea grande. Por eso, a escala industrial se suele operar con torres de absorción, que presentan bajas pérdidas de carga. Una de las aplicaciones de esta técnica más extendidas industrialmente es la eliminación de dióxido de carbono y compuestos de azufre del gas natural o gases de combustión con aminas (Khoo y Tan, 2006).

Actualmente, ésta es la técnica más ampliamente utilizada para capturar dióxido de carbono de gases de combustión, si bien presenta los inconvenientes de un elevado consumo energético y la baja resistencia de las aminas a la degradación

### 3.6 Otros Métodos de Separación

Existen, también, otros métodos de separación de gases menos utilizados, tales como ITM (Ion transport membrane), separación química, separación con solventes, etc.

### 3.7 Resumen

Como resumen se muestran en la Tabla 3-2 detalles comparativos de los distintos métodos descritos para la separación de gases.

Método	Estado	Capacidad de subproducto	Pureza (%)	Tiempo arranque
Separación Criogénica	Maduro	Excelente	>99	Horas
Separación por Membrana	Semi maduro	Pobre	40	Minutos
Separación por Condensación	Maduro	Pobre	<40	Horas
Separación por Adsorción	Semi maduro	Pobre	85-95	Minutos
Separación Química	En desarrollo	Pobre	>99	Horas
ITM	En desarrollo	Pobre	>99	Horas

*Tabla 3-2 Comparación entre los distintos métodos de separación*

### 3.8 Elección del método de separación

La elección del método de separación se basó en que, dentro de los métodos de obtención de gases, la separación por variación de presión es el método que más se ajusta a las necesidades del caso de estudio como se explicará más adelante en esta tesis.

Dejando de lado la separación criogénica que se utiliza sólo para la generación de grandes cantidades de producto, o sea en forma industrial, PSA es uno de los métodos de obtención de gases con menor tiempo de puesta en marcha y con una pureza obtenible de hasta un 95%, y es un método ya maduro entre los

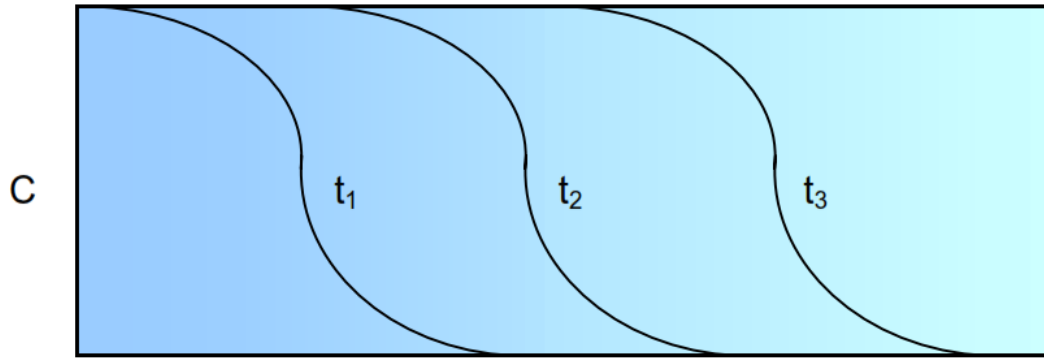
existentes en la actualidad. No cuenta con capacidad de obtención de subproductos, pero para el caso en estudio, esto no es un requisito a considerar.

## 4 Proceso PSA

### 4.1 Teoría de la adsorción

Se cree que el término adsorción fue introducido por primera vez por Kayser en 1881 para describir sus observaciones sobre la condensación de gases sobre una superficie, fenómeno descubierto por Scheele en 1773 y Fontana en 1777 independientemente.

La adsorción es una operación de separación en la que ciertos componentes de una fase gaseosa se transfieren a la superficie de un sólido adsorbente donde quedan retenidos. Generalmente las partículas de adsorbente se mantienen en un lecho fijo mientras que el gas pasa continuamente a través del lecho hasta que el sólido esté prácticamente saturado o no sea posible alcanzar la separación deseada. En la adsorción en lecho fijo las concentraciones en ambas fases varían con el tiempo y la posición en el lecho. La transferencia de materia de la fase gaseosa a la sólida ocurre en una zona del lecho denominada “Zona de transferencia de Materia” (MTZ). Antes de esta región, el lecho está esencialmente saturado con el adsorbato (gas con mayor afinidad a ser adsorbido por el adsorbente) mientras que más adelante está prácticamente sin adsorbato. Cuando esta zona alcanza el final del lecho en la corriente de salida se comienza a detectar el adsorbato. La Figura 4-1 muestra el perfil de concentración en función de la posición en un lecho fijo para diferentes tiempos.



Entrada Lecho L Salida Lecho  
 Figura 4-1 Perfil de concentración a lo largo del lecho de adsorbente

Los resultados de la adsorción de un determinado adsorbato sobre un adsorbente bajo unas condiciones determinadas, son característicos de ese sistema y dependen también de la forma en la que ambos compuestos se hayan puesto en contacto. El hecho de que especies diferentes presenten diferentes afinidades con respecto a un adsorbente en particular proporciona las bases para la separación de componentes de mezclas mediante esta técnica.

La mayor parte de los adsorbentes son materiales altamente porosos y la adsorción tiene lugar fundamentalmente en el interior de las partículas sobre las paredes de los poros. La separación puede producirse debido a que diferencias de peso molecular o polaridad dan lugar a que unas moléculas se adhieran a la superficie más fuertemente que otras.

La adsorción se puede clasificar en dos tipos en función de las fuerzas responsables de la adhesión. La adsorción física suele ser resultado de fuerzas de Van der Waals, con lo que por naturaleza al ser la unión bastante débil la adsorción física puede ser reversible ya que la unión puede romperse por cambios en parámetros como la temperatura, presión o concentración. Por otro lado, la adsorción química (Quimisorción) es el resultado de la interacción química entre una molécula de adsorbato y la superficie del adsorbente, esto hace que este tipo de adsorción sea irreversible. Este último tipo de adsorción es de gran interés en catálisis, pero raramente se usa para separaciones.

Las principales diferencias entre ambos tipos de adsorción se muestran en la Tabla 4-1:

<b>Adsorción física</b>	<b>Quimisorción</b>
Bajo calor de adsorción	Alto calor de adsorción
No específica	Altamente específica
Formación de monocapa o multicapa	Formación de monocapa
Sin disociación de las especies adsorbidas	Puede existir disociación de las especies adsorbidas
Importante únicamente a bajas temperaturas	Posible en un amplio intervalo de temperatura
Rápida, no activada, reversible	Activada, puede ser lenta e irreversible
No hay transferencia de electrones, aunque puede tener lugar una polarización del adsorbato	Hay transferencia de electrones, formando enlaces químicos entre el adsorbato y la superficie del adsorbente

Tabla 4-1 Diferencias entre adsorción física y adsorción química

Distintos tipos de isotermas de adsorción son mostrados en la Figura 4-2. En ellos se grafica la cantidad de gas adsorbida ( $q$ ) en función de la presión a la cual está sometido el gas ( $P$ ). La eficacia del proceso depende del equilibrio sólido-gas, de ahí que sea imprescindible para la caracterización y modelado del proceso.

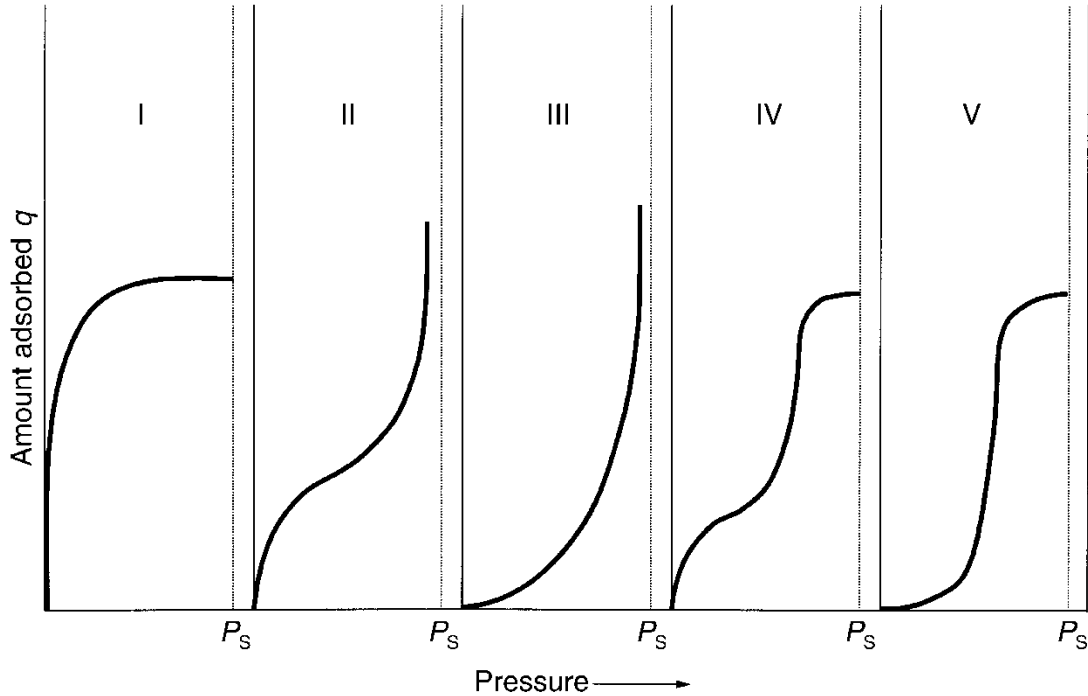


Figura 4-2 5 tipos de isothermas de adsorción

La isoterma de tipo I es característica de procesos de quimisorción, en los que el límite de saturación corresponde a la ocupación de todos los sitios superficiales, o a la adsorción física sobre un material micro-poroso en el que la saturación corresponde al llenado completo de los micro-poros. El tipo III corresponde al caso de que la interacción adsorbato-superficie es más débil que la interacción adsorbato-adsorbato. En los sistemas PSA las isothermas suelen ser de tipo I o tipo II.

Generalmente todos los procesos de adsorción se complementan con una etapa de desorción ya que la regeneración del sólido suele ser preferible antes que su vertido. Los métodos típicos pueden conllevar lavado químico, purgas a elevadas temperaturas, cambios de presión en el caso de gases, etc.

El calor de adsorción proporciona una medida directa de la fortaleza del enlace entre el adsorbato y la superficie. La adsorción física es invariablemente exotérmica, como se puede deducir a partir de argumentos termodinámicos. Debido a que la molécula adsorbida tiene a lo sumo dos grados de libertad en movimientos de traslación, y la libertad rotacional de la especie adsorbida siempre es menor que

las de las moléculas en la fase fluida, el cambio en la entropía de adsorción ( $\Delta S = S_{Ads} - S_{Gas}$ ) es necesariamente negativo. Para que tenga lugar la adsorción física en una cantidad significativa, la variación de energía libre ( $\Delta G$ ) del proceso de adsorción también debe ser negativa:

$$\Delta G = \Delta H - T * \Delta S$$

Una variación de energía libre negativa implica que la variación de entalpía ( $\Delta H$ ) sea negativa, por lo que la adsorción debe ser exotérmica. Esto también suele ser cierto para la adsorción en fase líquida, aunque en estos casos puede haber algunas excepciones (Ruthven, 1984).

Los factores que afectan a la adsorción pueden clasificarse en tres grupos: factores de capacidad, factores cinéticos y factores fluidodinámicos. Los factores de capacidad son aquellos que determinan la distribución de equilibrio de los solutos adsorbidos entre la fase líquida y sólida. Esta influencia vendrá representada por la isoterma de adsorción. Los factores cinéticos son aquellos que gobiernan la velocidad de transferencia de soluto de una fase a otra. Finalmente, los factores fluidodinámicos pueden deberse al tipo de flujo del gas o a sus propiedades que afectarán al tiempo de residencia y, por tanto, al proceso de adsorción.

En cualquier proceso químico las distintas fases o especies presentes en él, pueden presentar estados de equilibrio. De igual modo ocurre en el caso de la adsorción. Es por eso que cualquier proceso de adsorción puede caracterizarse mediante la curva de equilibrio correspondiente. Esta vendrá dada para unas condiciones concretas de presión y temperatura, por lo que en ocasiones es denominada “Isoterma de adsorción”.

### 4.2 Adsorbentes

Como se dijo, un adsorbente es un material que cuenta con la característica de atraer diferentes gases en diversos grados. Generalmente adoptan la forma del

área superficial más alta (pellets porosos o granos) con el fin de contar con la mayor superficie de contacto con el gas a adsorber.

Los adsorbentes más empleados son carbón activado, tamices moleculares, gel de sílice, polímeros orgánicos y alúminas activadas. En los diferentes periodos de la historia, el adsorbente mayoritario ha ido variando: antes de la Primera Guerra Mundial los que más se empleaban eran los carbones; en el periodo entre las Guerras Mundiales, se trabajó con carbones activos, gel de sílice y óxidos de aluminio; después de la Segunda Guerra Mundial, se produjo un progreso revolucionario con el descubrimiento y aplicación de numerosos tipos de zeolitas.

La selección del adsorbente más indicado para una aplicación concreta puede estar sujeta a diversos criterios. Entre las propiedades que destacan encontramos su capacidad, coste, regeneración y vida. Aunque estos factores dependen del sistema a secar, podemos hacer algunas comparaciones cualitativas para el caso de la adsorción de agua: la alúmina y el gel de sílice, con pocas excepciones, destacan con mayores capacidades que las zeolitas para elevadas concentraciones de agua y requieren menores temperaturas de regeneración (100-200 °C frente a 200-300 °C). Los precios de estos dos desecantes en los tipos comerciales genéricos son aproximadamente la cuarta parte o la mitad del precio de los tamices moleculares respectivamente. Por otro lado, las zeolitas proporcionan grandes capacidades para bajos niveles de humedad en un amplio rango de temperatura. La información sobre la vida o pérdida de actividad es algo confusa; pero cualquiera de los tres adsorbentes pierde una media de 1,5-2% de su capacidad inicial de uso al año.

### 4.2.1 Carbón Activado

El carbón activado fue el primer adsorbente empleado en la historia; algunas aplicaciones se han encontrado descritas en papiros egipcios del año 3750 a.C. Atendiendo a la cantidad, el carbón activado es el adsorbente más empleado. Su proceso de fabricación conlleva distintas etapas: partiendo de alguna sustancia



carbonosa como madera, carbón, etc. se carboniza. A continuación, este material es gasificado parcialmente con un gas ligeramente oxidante como CO o vapor. Este proceso de activación crea la porosidad y área superficial deseadas. Está generalmente aceptado que la capacidad de adsorción para el carbón activado depende de la naturaleza del adsorbato, las condiciones de adsorción (tales como temperatura, pH, etc.) y de la naturaleza del adsorbente y los grupos funcionales formados en la superficie del carbón. Algunas de sus múltiples aplicaciones son: purificación de gases, máscaras antigás, recuperación de disolventes, control de la contaminación, decoloración de azúcar, purificación de alcohol, adsorción de vapores de gasolina procedentes de automóviles, etc. La Figura 4-3 muestra distintas formas de carbón activado.



Figura 4-3 Carbón activo

La superficie del carbón activado es esencialmente no polar, por ello no adsorbe fuertemente agua, así que puede ser utilizado para purificación de aguas o en procesos con gases húmedos. En cualquier caso, el agua se puede adsorber, pero de un modo muy débil. Generalmente presenta gran capacidad para adsorber compuestos orgánicos no polares o de baja polaridad (Wankat, 1994). Por esto, una de las aplicaciones más importantes de la adsorción con carbón activo es la purificación de efluentes acuosos. En este campo se dispone de abundante bibliografía.

### 4.2.2 Zeolitas

El término zeolita fue acuñado originalmente en 1756 por el mineralogista sueco Axel Fredrik Cronstedt, quien observó que al calentar rápidamente stilbita, se producen grandes cantidades de vapor de agua que había sido adsorbida por el

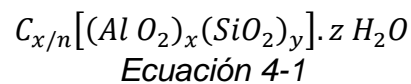
material. Con base en esto, llamó zeolita al material, donde el ζέω griego (zeo) significa "hervir" y λίθος (lithos) significa "piedra".

Las Zeolitas son rocas compuestas de aluminio, silicio, y oxígeno. Es posible hallarlas en una variedad de regiones del mundo donde la actividad volcánica prehistórica ocurrió cerca del agua, o donde el agua ha estado presente por milenios desde las erupciones. En la Figura 4-4 se muestran imágenes de distintas formas de zeolitas comerciales



Figura 4-4 Distintas formas de zeolitas comerciales

Estos aluminosilicatos cristalinos porosos responden a la fórmula general



En esta fórmula  $x$ ,  $y$ ,  $n$ ,  $z$  son números enteros e  $y \geq x$ .  $n$  es la valencia del catión C mientras que  $z$  es el número de moléculas de agua por unidad estructural cristalina. Existen zeolitas naturales que se comercializan; pero también existen

muchas que se pueden sintetizar. Estos compuestos son muy útiles en algunas ocasiones ya que se puede disponer de una estructura en tres dimensiones rígida y de dimensiones exactas en la que sólo quepan moléculas de un tamaño determinado y las mayores no se adsorberán.

La estructura de un cristal de zeolita se basa en un tetraedro que está formado por cuatro átomos de oxígeno enlazados con un átomo de silicio por medio de sus cuatro electrones de valencia. Estos tetraedros se conectan en las “esquinas” de los oxígenos para formar los cristales. Cuando el aluminio está presente durante la formación de los cristales, se sustituye el silicio por los átomos de aluminio, el cual tiene solamente tres electrones de valencia. El electrón de valencia que falta es proporcionado generalmente por un átomo de hidrógeno o de sodio debido a que estos elementos se encuentran típicamente en el agua hidratante. Esto distorsiona el tetraedro y hace un “sitio ácido” para el intercambio de otros iones. Esto además hace que la estructura sea hidrofílica. Si la zeolita se forma en una mezcla que contenga un catión orgánico (por ejemplo, un catión que tenga un núcleo de carbón), la estructura se puede formar alrededor del catión orgánico, utilizándolo como patrón. Esto ha dado lugar a zeolitas hidrofílicas ricas en silicio con un “tamaño de poro” (o tamaño de ventana) lo suficientemente grande como para dejar pasar todo salvo las moléculas de petróleo que son más grandes. La Figura 4-5 muestra la estructura de la zeolita.

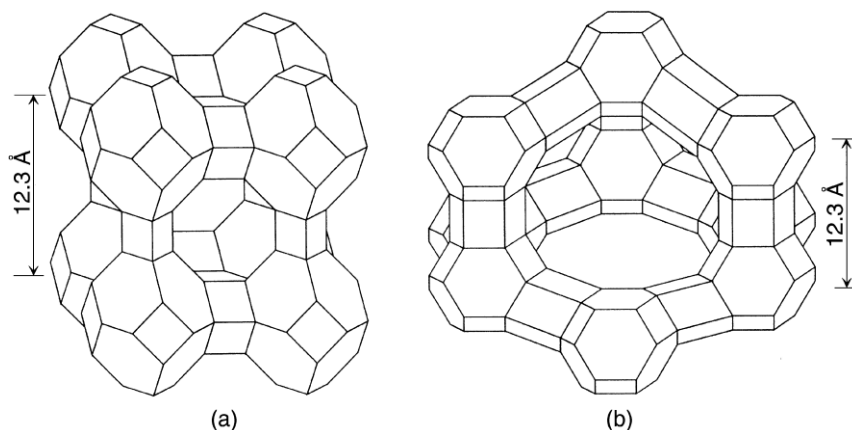


Figura 4-5 Estructura tetraédrica de la zeolita

La estructura cristalina de una zeolita consiste de ventanas, jaulas, y super-jaulas. Es por las ventanas que las moléculas llegan para ser adsorbidas.

#### 4.2.2.1 Características principales

1. La zeolita es capaz del intercambio selectivo de iones.
2. La zeolita puede adsorber moléculas en su gran área interna, siempre que puedan pasar por las ventanas. La zeolita y el carbón son iguales en este aspecto, y se diferencian solamente en el área de adsorción a la que puede tener acceso una molécula dada que pase por sus poros.
3. La zeolita puede ser un catalizador ácido sólido. Puede funcionar como un ácido fuerte (aunque se mantiene como un sólido) cuando la hidratación ha sustituido un hidrógeno, por un electrón de 3 valencia adicional, o un intercambio iso-electrónico con el aluminio.
4. Se puede usar la zeolita como un tamiz molecular debido a que tiene un tamaño de ventana (o poro) uniforme.
5. La zeolita es meta-estable; quiere decir, es estable siempre que se mantenga a una temperatura y a un pH adecuados. Dentro de este rango, no se ve afectada por oscilaciones grandes de temperatura, presión, o radiación ionizante.

#### 4.2.2.2 Aplicaciones y usos

Existen 3 usos principales de las zeolitas en la industria: catálisis, separación de gases e intercambio de iones.

**Catálisis:** las zeolitas son muy útiles como catalizadores en reacciones con moléculas orgánicas. Las más importantes son agrietamiento, isomerización y síntesis de hidrocarburos. Las principales áreas de aplicación son: la refinación de petróleo, la producción de combustibles sintéticos y la producción petroquímica.

**Adsorción:** las zeolitas se utilizan para adsorber una gran variedad de materiales. Esto incluye aplicaciones de secado, purificación y separación. Pueden

eliminar agua a presiones muy bajas y son muy eficaces desecantes. Altamente utilizadas para separación de gases por su gran porosidad siendo utilizadas como tamices y esta propiedad puede ser ajustada variando su estructura.

Intercambio de iones: utilizadas para ablandamiento de agua, formación de detergentes y jabones.

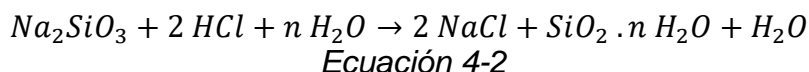
Desde un punto de vista práctico, las zeolitas pueden adaptarse a una variedad de usos, tales como los mostrados en la Tabla 4-2.

USO	Ejemplo
<b>Acuicultura</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Filtración de amoníaco en criaderos de peces</li> <li>• Como biofiltros</li> </ul>
<b>Agricultura</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Control de olores</li> <li>• Control ambiental de animales confinados</li> <li>• Aditivos para alimentos de ganado</li> </ul>
<b>Horticultura</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Viveros, invernaderos</li> <li>• Floricultura</li> <li>• Verduras/hierbas</li> <li>• Follaje</li> <li>• Trasplante de árboles y arbustos</li> <li>• Recuperación, revegetación, paisajismo</li> <li>• Silvicultura</li> </ul>
<b>Productos para el hogar</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Control de olores hogareños</li> <li>• Control de olores de mascotas</li> </ul>
<b>Productos industriales</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Adsorbente para petróleo y derrames</li> <li>• Separación de gases</li> </ul>
<b>Residuos radioactivos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Limpieza y descontaminación</li> </ul>
<b>Tratamiento de agua</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Filtración de agua</li> <li>• Eliminación de metales pesados</li> <li>• Piletas de natación</li> </ul>
<b>Tratamiento de aguas residuales</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eliminación de amoníaco</li> <li>• Eliminación de metales pesados</li> <li>• Lechos filtrantes sépticos</li> </ul>

Tabla 4-2 Usos de las Zeolitas

### 4.2.3 Gel de Sílice

El gel de sílice es un sólido amorfo compuesto de partículas esféricas de sílice, SiO<sub>2</sub>. Se produce a partir de la siguiente reacción:



La superficie de la sílice tiene gran afinidad por el agua por lo que el uso más habitual del gel de sílice es para secar gases y líquidos. Además, es más barata y fácil de regenerar que las zeolitas, aunque no es óptima para secar gases a altas temperaturas. Es recomendable evitar su contacto con agua líquida porque puede dañarla. Imágenes de gel de sílice se muestran en la Figura 4-6.



Figura 4-6 Gel de sílice

Dentro de las aplicaciones del gel de sílice no sólo aparece la adsorción de agua sino también la adsorción de compuestos orgánicos como el benceno u otros.

#### 4.2.4 Alúmina Activada

La alúmina activada,  $Al_2O_3$ , se obtiene deshidratando hidratos de aluminio. Así su superficie presenta una gran afinidad por el agua y además no resulta dañada si es introducida en agua líquida. La aplicación más habitual es el secado de gases y líquidos, aunque también puede adsorber otros compuestos. La Figura 4-7 muestra distintos tipos de alúminas activadas.





Figura 4-7 Distintos tipos de alúminas activadas

Una de las primeras referencias al empleo de alúmina activada para deshidratar líquidos orgánicos se remonta a los estudios de Derr y Willmore (1935).

#### 4.2.5 Otros adsorbentes

En la actualidad, se están realizando muchas investigaciones en el desarrollo de nuevos adsorbentes basados en polímeros. Las resinas poliméricas orgánicas se han venido usando durante años en intercambio iónico. Con el paso del tiempo, estas resinas se han usado para la adsorción de compuestos orgánicos disueltos en agua, aplicación en la que compiten con el carbón activo; y aunque en algunos casos sean más caros, el coste global de la operación puede ser menor en el caso de tratar corrientes residuales concentradas.

Mobil Oil Corporation ha desarrollado una nueva familia de materiales mesoporosos llamados materiales MCM (Mobil Composition of Matter) cuya principal peculiaridad es que poseen poros uniformes.



Otro nuevo tipo de materiales porosos, muy útiles para adsorción y catálisis, son un tipo de arcillas denominadas PILC. Son semejantes a las arcillas clásicas, pero se les han intercalado cationes metálicos u óxidos entre sus capas, con lo que se consigue un tipo de porosidad muy práctica para ser empleada en procesos de adsorción.

Los cristales micro-porosos (especialmente “Vycors”) son otros adsorbentes inorgánicos que destacan como adsorbentes de oxígeno.

### 4.3 Elección del adsorbente

Dado que la selección del adsorbente más indicado para una aplicación concreta está sujeta a diversos criterios y que entre las propiedades más significativas para su selección se encuentran su capacidad, costo, regeneración y vida, se centró la atención en estas variables para la selección del adsorbente.

El tipo de adsorbente seleccionado para el diseño del sistema es la zeolita, y entre las distintas zeolitas existentes en el mercado la que mejor se adapta a las exigencias del caso es la zeolita tipo 5A.

La denominación 5A se debe a que tiene 5 Armstrong (0,5 nm) de apertura efectiva de poro y la forma cálcica de estructura cristalina es expresada por la A.

Las características principales por las cuales se optó por una zeolita 5A son:

- Alta selectividad hacia el nitrógeno respecto al oxígeno
- Bajo costo por kg respecto a otros tipos
- Fácil disponibilidad de adquisición en el mercado
- Alta capacidad de regeneración ante la disminución de presión
- Larga vida útil

A las anteriores se suman las siguientes características secundarias que acompañan la selección de este tipo de zeolita:

- Baja apertura de poros
- Altamente recomendada para sistemas PSA
- Muy usada para concentradores de oxígeno

En la Figura 4-8 y Figura 4-9 se muestran las isotermas de adsorción de la zeolita 5A para nitrógeno y para oxígeno respectivamente. Se puede ver que para una misma presión (por ejemplo 5 bar) y una misma temperatura (35°), este tipo de zeolita adsorbe una mayor cantidad de nitrógeno (0,8 moles de nitrógeno/Kg de adsorbente) y una menor cantidad de oxígeno (0,45 moles de oxígeno/Kg de adsorbente). Es decir, que para las mismas condiciones de presión y temperatura, este tipo de zeolita adsorbe casi el doble de nitrógeno que de oxígeno.

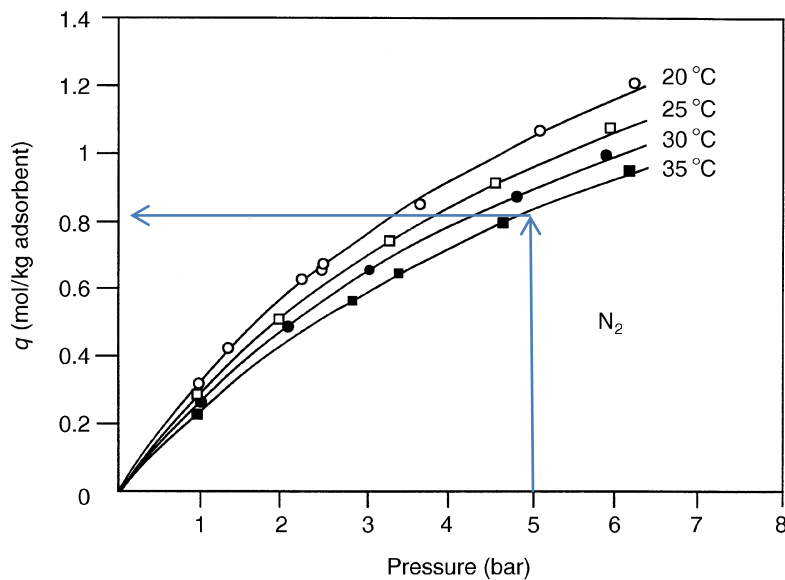


Figura 4-8 Isothermas de adsorción de  $N_2$  para una zeolita 5A

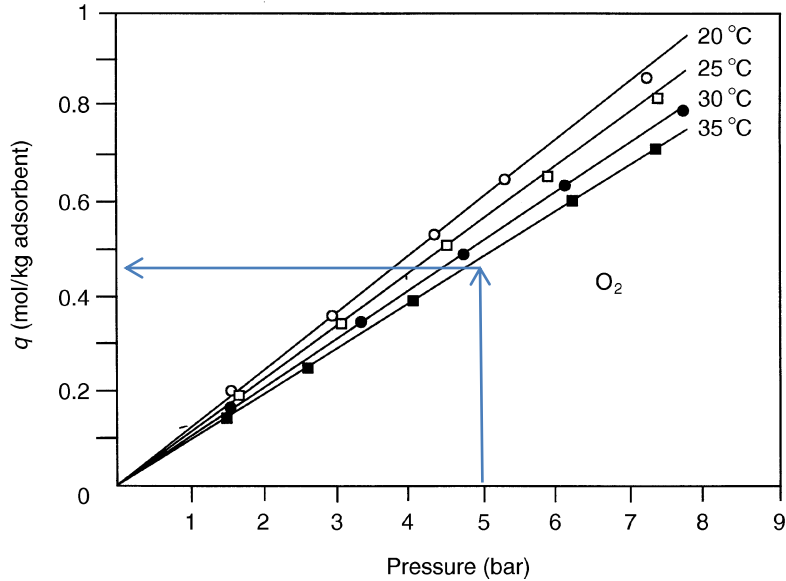


Figura 4-9 Isotermas de adsorción de O<sub>2</sub> para una zeolita 5A

La alta selectividad, debida a la baja relación Si/Al, que tiene este tipo específico de zeolita con el nitrógeno, respecto al oxígeno, es la razón principal por la cual se optó por este tipo específico de zeolita.

De aquí en adelante cuando se hable del adsorbente se estará haciendo referencia a la zeolita 5A seleccionada.

## 5 Ciclo de adsorción en etapas

El ciclo continuo de adsorción por variación de presión más simple de dos camas, fue desarrollado por Skarstrom (1960). Cada cama actúa alternada y secuencialmente como adsorbedor y regenerador para completar un ciclo de eventos. El layout de planta y el diagrama de tuberías entre ambas columnas se ilustra en la Figura 5-1. Los ciclos de 3 y 4 etapas se describirán a continuación. Para ilustrar la operación, suponemos que cada cama en la Figura 5-1 contiene un tamiz molecular adsorbente de zeolita cuya capacidad para adsorber nitrógeno del aire es superior que su capacidad para adsorber el oxígeno del aire.

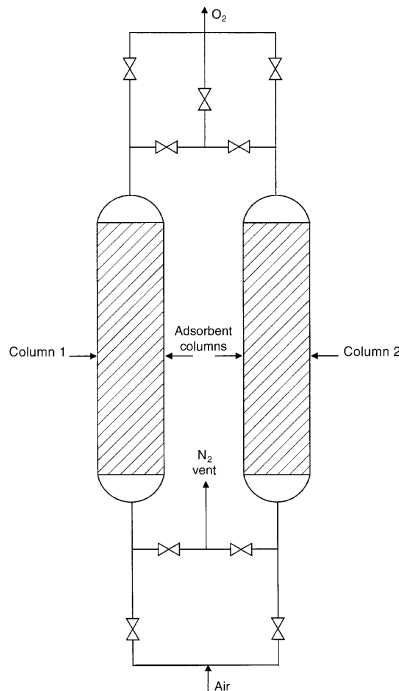


Figura 5-1 Lay-out básico de una planta proceso PSA de 2 columnas para separación de aire.

### 5.1 Ciclo de 3 etapas

El ciclo básico de 3 etapas fue desarrollado por Guerin de Montgareuil y Domine (1964) y es conocido como el ciclo Guerin-Domine. Se involucran tres etapas para las 2 columnas. La primera etapa consiste en la presurización de la columna 1 mientras la 2 es evacuada. La segunda etapa consiste en la purga hacia debajo de la columna 1 a través de la previamente evacuada columna 2 de la cual el oxígeno es recolectado. El tercer paso consta de la evacuación de la columna 1. Los roles de las columnas son invertidos para el siguiente ciclo. El nitrógeno es liberado de la columna 1 y 2 durante la evacuación.

Las etapas operativas del ciclo de 3 etapas se muestran en la Figura 5-2 y se pueden describir de la siguiente forma:

#### Etapa 1: Presurización

Se alimenta a la columna 1 con aire comprimido. Las partículas de nitrógeno y argón son adsorbidas por la zeolita mientras que las de oxígeno pasan a través

del lecho egresando de la columna. Mientras tanto la columna 2 finaliza su etapa de despresurización.

### Etapa 2: Alimentación

Cuando el adsorbente en la primera columna se satura de nitrógeno y argón, el flujo de aire es dirigido hacia la columna 2. La columna 1 continúa liberando oxígeno hasta comenzar la siguiente etapa.

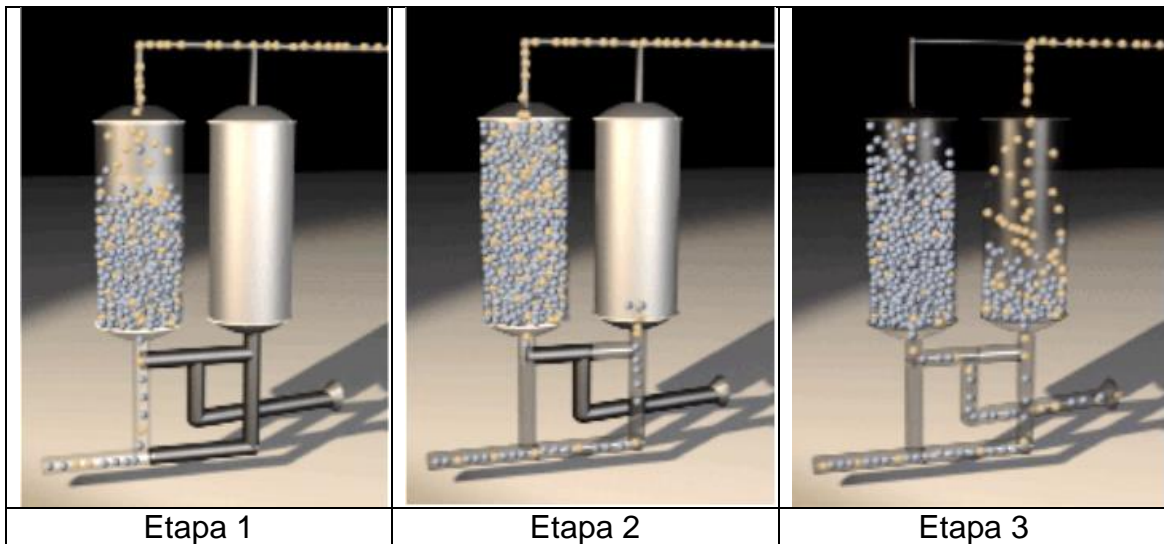


Figura 5-2. Esquemas del ciclo de skarstrom de 3 etapas

### Etapa 3: Despresurización

El adsorbente adsorbe nitrógeno y argón en la columna 2. La columna 1 es despresurizada permitiendo al argón y al nitrógeno ser purgado fuera del sistema y soltado a la atmósfera.

Luego el proceso comienza de nuevo. Aire comprimido es introducido en la columna 1. La columna 2 es despresurizada liberando moléculas de argón y nitrógeno a la atmósfera. El proceso se repite continuamente produciendo un flujo constante de oxígeno purificado.

## 5.2 Ciclo de Skarstrom de 4 etapas

Con la finalidad de remover completamente todo el nitrógeno de la columna, se adiciona una etapa de purga. La purga consiste en reciclar parte del aire

enriquecido de la otra columna que está fluyendo por la diferencia de presión entre ambas. Cuando el adsorbente está listo para cargar más nitrógeno, la presión promedio del sistema debe ser restaurada. Este se logra en la etapa de presurización usando la corriente de alimentación. Luego que estas etapas finalizan, un ciclo está completo.

Este proceso para la separación de aire fue desarrollado por Skarstrom (1960 y 1975) y fue utilizado para unidades de separación de pequeña escala. La patente original fue asignada a “Exxon Research and Engineering” en 1958.

### Etapa 1: Presurización

Durante la primera etapa se introduce aire presurizado a la columna 1. El adsorbente seleccionado, que es mayormente selectivo con el nitrógeno, genera un flujo rico en oxígeno. Este proceso continúa hasta cierta presión manteniendo la columna aislada de la columna número 2.

### Etapa 2: Alimentación

Durante la segunda etapa del ciclo, denominada alimentación, en la columna 1 continúan la presurización y adsorción de nitrógeno dando lugar al comienzo de evacuación del producto. Al mismo tiempo ambas columnas se conectan pasando el oxígeno (que es el componente menos fuertemente adsorbido por la zeolita) junto con algo de nitrógeno hacia la columna 2 facilitando la purga de nitrógeno.

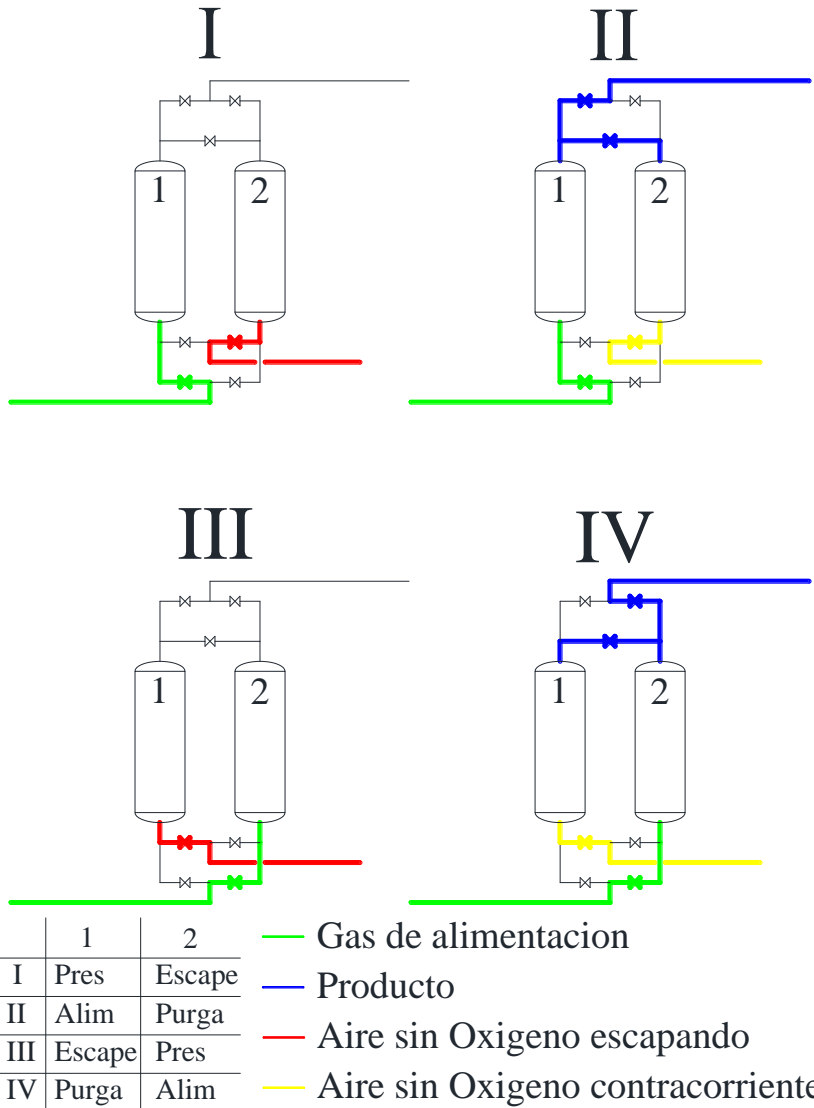


Figura 5-3 Flujo de gases del ciclo básico de Skarstrom

### Etapa 3: Escape

Quando el adsorbente dentro de la columna 1 se satura y no puede adsorber más nitrógeno, las columnas son aisladas nuevamente, la columna 1 es despresurizada a la presión atmosférica y la alimentación se dirige a la columna 2. Con el fin de liberar parte del nitrógeno adsorbido en la columna 1, la dirección de flujo se revierte y la presión total en la columna se reduce venteadando a la atmósfera. En esta etapa el nitrógeno es desorbido del adsorbente y liberado.

Etapa 4: Purga

La cuarta y última etapa reconecta ambas columnas y algo del oxígeno producido pasa a través de ambas columnas en contra-corriente a la alimentación de aire. Esta etapa de purga más tardía del ciclo asegura que todo el nitrógeno adsorbido en la columna es eliminado a través de la entrada permitiendo que la mayor parte de la columna quede libre de nitrógeno y lista para repetir todo el ciclo nuevamente.

El ciclo teórico de presiones que experimenta una cama de adsorción se muestra en la Figura 5-4, donde se visualiza como varía la presión en función del tiempo en cada una de las 4 etapas del ciclo básico de Skarstrom.

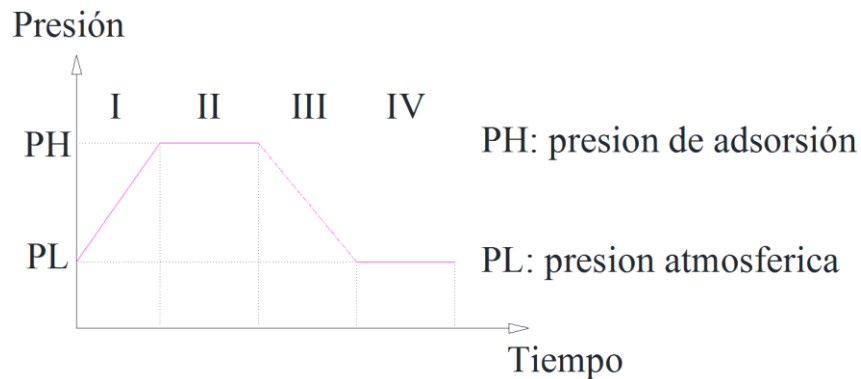


Figura 5-4 Ciclo teórico de presiones dentro de una cama de adsorción

En la Figura 5-5 se muestra, de izquierda a derecha, el frente de concentración avanzando, desde el comienzo de la presurización, hacia arriba. En un punto medio, dependiente de la configuración del sistema, de la zeolita utilizada, del tamaño del sistema y de la presión de trabajo, se realiza la apertura del sistema para comenzar a obtener el producto por la parte superior.



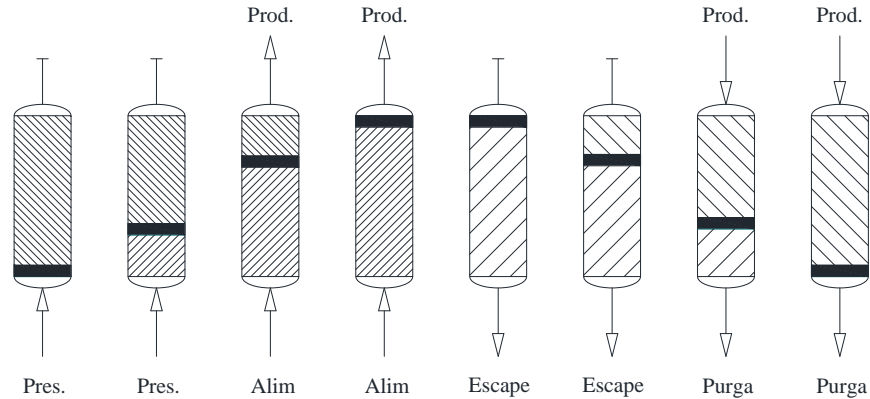


Figura 5-5 Detalle del avance del frente de concentración

Cuando el frente de concentración alcanza la parte superior, el lecho está totalmente saturado del componente adsorbido, momento en el cual se completa la producción y se cierra la misma por la parte superior y la alimentación, comenzando la etapa de escape por la parte superior. Luego de un tiempo determinado, también dependiente de variables del sistema anteriormente nombradas, comienza a ingresar parte del producto por la parte superior para favorecer el vaciado del lecho, etapa llamada de escape asistido.

Comparando el ciclo de Skarstrom con el de Guerin-Domine, el primero entrega una performance mejorada porque el nitrógeno se remueve eficientemente por evacuación dejando una columna limpia para la extracción de oxígeno. Sin embargo, la introducción de una etapa de evacuación, en el ciclo de Skarstrom, incrementa la necesidad de energía mecánica y, por ende, los costos.

### 5.3 Mejoras al ciclo PSA básico.

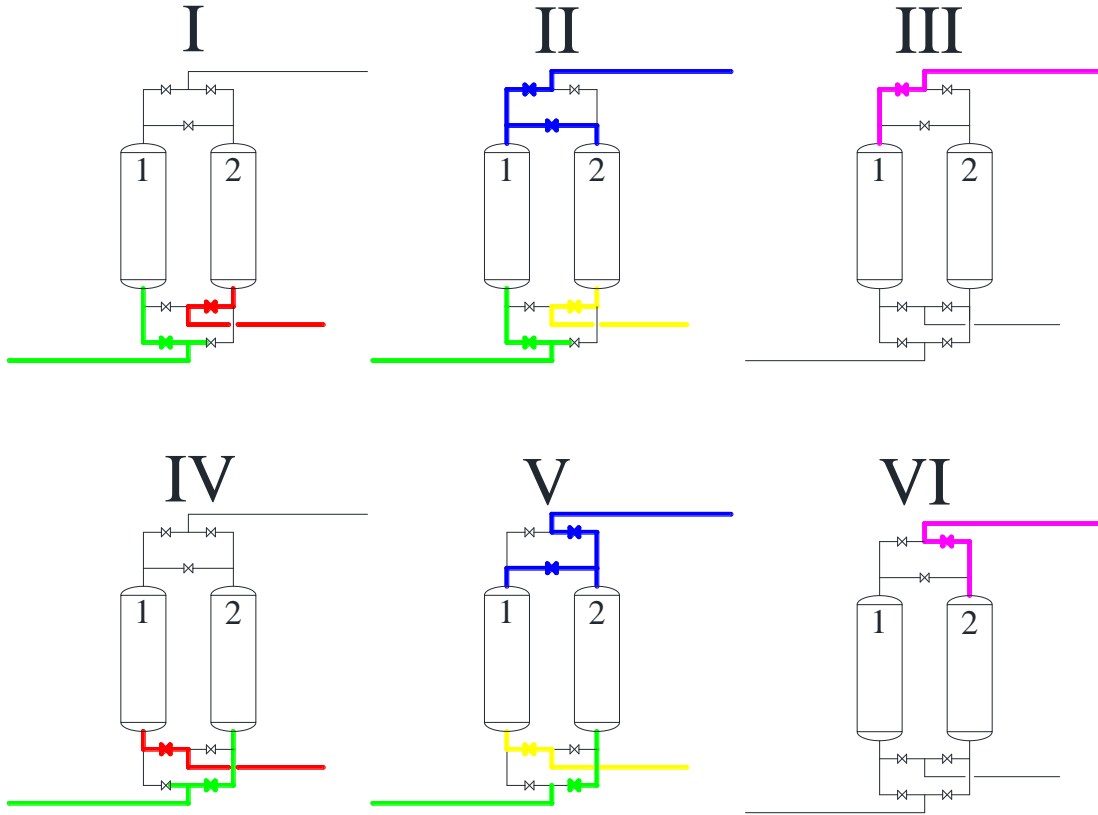
A pesar de que el ciclo de Guerin-Domine probó ser más efectivo para la separación de aire que el ciclo de Skarstrom, este ciclo no resultó económico viable (bajo rendimiento). Las mejoras principales sobre el ciclo básico de dos columnas que aparecieron en los últimos años fueron la introducción del ciclo de despresurización a favor de la corriente y el de igualación de presión (entre columnas). También el aumento en el número de columnas en serie y la secuencia de pasos operacionales en el ciclo han guiado a mayores mejoras del proceso.

#### 5.3.1 Despresurización a favor de la corriente (DFC)

La incorporación de un paso de despresurización a favor de la corriente inmediatamente después de los pasos de presurización y alimentación al ciclo básico de Skarstrom eleva la concentración del componente adsorbido más fuertemente (nitrógeno). Esto es logrado removiendo el gas contenido en los espacios vacíos del adsorbente quien, luego de los dos primeros pasos, habrá atrapado gas con igual concentración que el de alimentación. Los pasos de presurización y alimentación, durante los cuales ocurre la adsorción, son acortados en duración para que la DFC pueda ser iniciada lo antes posible. Luego la columna es desorbida por los pasos de purga (libre y asistida) en el ciclo. El beneficio neto de la DFC es la pureza incrementada del componente más fuertemente adsorbido (nitrógeno) en la corriente de desecho, en consecuencia, mejora la recuperación del componente menos fuertemente adsorbido (oxígeno).

En la Figura 5-6 se muestra un esquema del ciclo PSA con DFC.

## Generador de Oxígeno para uso Hospitalario

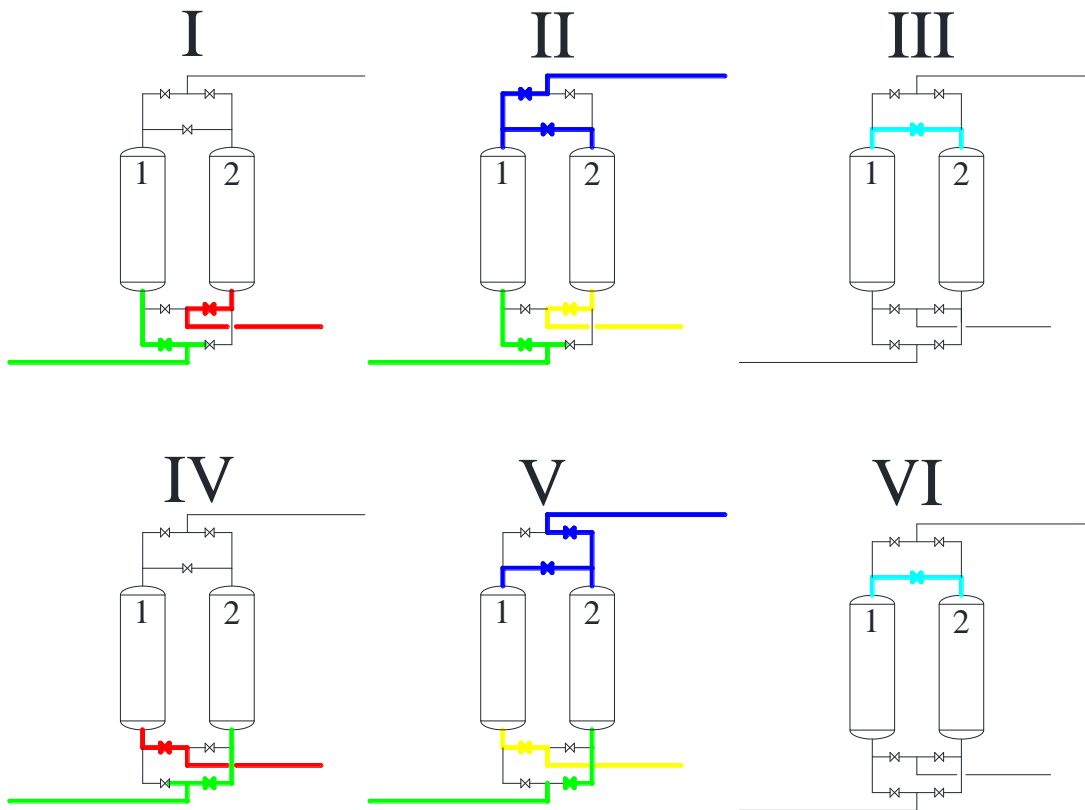


	1	2	
I	Pres	Escape	— Gas de alimentación
II	Alim	Purga	— Producto
III	Depres	-	— Aire sin Oxígeno escapando
IV	Escape	Pres	— Aire sin Oxígeno
V	Purga	Alim	— Oxígeno para depresurización
VI	-	Depres	

Figura 5-6 Flujo de gases del ciclo PSA con depresurización a favor de la corriente

### 5.3.2 Igualación de presión (IP).

Para ayudar a ahorrar gastos de energía mecánica durante el ciclo PSA fue sugerido, por Marsh en 1969, que las dos columnas podían ser interconectadas durante una etapa particular del ciclo para que la energía de presión contenida por el gas en la columna a alta presión pueda ser compartida con la columna que ha sido sometida a purga (por lo tanto, a una menor presión), quien resultará parcialmente presurizada quedando lista para la represurización. Es común, actualmente, incluir la IP en el ciclo cuando cuatro o más columnas en serie componen la unidad PSA. Los beneficios de la IP incluyen el aumento de la recuperación de oxígeno y un flujo más estacionario y continuo del componente más fuertemente adsorbido. Un esquema básico de un ciclo PSA con IP es mostrado en la Figura 5-7.



	1	2	
I	Pres	Escape	— Gas de alimentacion
II	Alim	Purga	— Producto
III	Igualac	Igualac	— Aire sin Oxigeno escapando
IV	Escape	Pres	— Aire sin Oxigeno
V	Purga	Alim	— Oxigeno para igualación de presión
VI	Igualac	Igualac	

Figura 5-7 Flujo de gases del ciclo PSA con igualación de presión

Allí puede verse la etapa extra III de igualación de presión en la primera parte del ciclo, y en la etapa VI en la segunda parte del ciclo. De esta forma el ciclo básico de Skarstrom de 4 etapas se transforma en un ciclo de 6 etapas, adoptando 2 de ellas para la igualación de presión.

## 6 Análisis del problema y Definición de la Capacidad

Los consumos del H.I.G.A., en el año 2015, discriminados por modalidad de adquisición, son los mostrados en las Tabla 6-1, Tabla 6-2, Tabla 6-3.

Consumo Granel	
Mes	Consumo (m3)
Enero	8004
Febrero	11972
Marzo	14720
Abril	3884
Mayo	24660
Junio	16928
Julio	12560
Agosto	7792
Septiembre	16748
Octubre	15616
Noviembre	11360
Diciembre	11076
<b>Total</b>	<b>155320</b>
<b>Promedio</b>	<b>12943</b>

Tabla 6-1 Consumo Granel

Consumo Tanques	
Mes	Consumo (m3)
Enero	3581
Febrero	4645
Marzo	3900
Abril	4275
Mayo	4606
Junio	5379
Julio	6312
Agosto	6938
Septiembre	10540
Octubre	8158
Noviembre	8089
Diciembre	8321
<b>Total</b>	<b>74744</b>
<b>Promedio</b>	<b>6229</b>

Tabla 6-2 Consumo Tanques

Total	
Mes	Consumo (m3)
Enero	11585
Febrero	16617
Marzo	18620
Abril	8159
Mayo	29266
Junio	22307
Julio	18872
Agosto	14730
Septiembre	27288
Octubre	23774
Noviembre	19449
Diciembre	19397
<b>Total</b>	<b>230064</b>
<b>Promedio</b>	<b>19172</b>

Tabla 6-3 Consumo Total

A partir de los consumos en tubos y a granel, se calcularon los totales y promedios de cada uno de ellos, y el consumo total del H.I.G.A. (o pequeñas clínicas) mes a mes y anual, mostrado en la Tabla 6-3.

Se analizó la posibilidad de diseñar un sistema que cubra con la totalidad del consumo del establecimiento, con el objetivo de lograr una independencia con respecto a la adquisición del gas en cuestión, y con la consecuente disminución del costo que esto conlleva. Pero para lograr dicho objetivo sería necesario contar con un sistema de proporciones industriales, lo cual no justificaría la implementación del proceso PSA para lograrlo, y se tornaría económicamente inviable. Para producción a gran escala de oxígeno, el proceso por separación criogénica es el que mejor se ajusta en cuanto a costo vs nivel productivo.

Por lo relatado anteriormente, se optó por el diseño de un sistema capaz de producir el oxígeno necesario para cubrir los picos de consumo. Para ello se calculó el mayor pico de consumo, considerando el mes donde se presenta el mayor requerimiento de oxígeno y el consumo total promedio.

El mes donde se identificó el mayor consumo de oxígeno es el mes de mayo con un consumo de  $29266 \text{ m}^3$  y el promedio total mensual es de  $19172 \text{ m}^3$ . A continuación se muestra el cálculo del pico de consumo.

$$\textit{Pico de consumo} = \textit{Consumo mayo} - \textit{Consumo promedio}$$

$$\textit{Pico de consumo} = 29266 \text{ m}^3 - 19172 \text{ m}^3 = 10094 \text{ m}^3/\textit{mes}$$

A partir éste consumo pico mensual se pueden calcular los consumos anuales, diarios, por hora, por minuto o por segundo, en  $\text{m}^3$  o en litros, las cuales son las unidades más comúnmente utilizadas para caudales de gases. Estos son mostrados en la Tabla 6-4.

Unidad	Anual	Mensual	Diario	Hora	Minuto	Segundo
m <sup>3</sup>	121128	10094	326	13,6	0,23	0,004
Litros	121128000	10094000	325613	13567,2	226,1	3,769

*Tabla 6-4 Cantidades de oxígeno necesarios para cubrir los picos de consumo*

Por lo tanto:

O<sub>2</sub> necesario a la salida del sistema = 0,23 Nm<sup>3</sup>/min

Estos son los consumos de oxígeno, objetivos que representan el punto de partida para el cálculo de aire necesario para alcanzar los niveles productivos deseados. Son la base para el dimensionamiento de los equipos, la selección de accesorios necesarios, realización de simulaciones de proceso (datos de entrada) y para análisis económico del proyecto.

## 6.1 Cálculos y diseño

Luego de consultar bibliografía pertinente a temas de adsorción química y en particular sobre el proceso analizado en cuestión, se pudieron establecer algunos parámetros importantes de caracterización del proceso a ensayar.

Las ecuaciones que se utilizan para desarrollar cálculos (rendimiento de proceso) que rigen el sistema a diseñar se basan principalmente en las deducciones, demostraciones y planteos de fundamento “químico” desarrollados en la bibliografía (tesis de post-grado): **“Energy Efficiency of Gas Separation by Pressure Swing Adsorption”**; presentada por el Ing. Christopher Ross Mc Lean de la Universidad de Columbia Británica de Vancouver Canadá publicada en el año 1994.

Según lo desarrollado en el trabajo académico citado, en el capítulo: 3. Modeling PSA Cycle Energy Consumption, dentro del punto **3.2 Four-Step Cycle**, donde se estudia un proceso de las mismas características que el aplicado en el

caso de estudio de este proyecto (Ciclo PSA de 4 etapas con adsorbente Zeolita 5A), caben resaltar las siguientes nomenclaturas y ecuaciones:

$P_H$ : Presión máxima

$P_L$ : Presión mínima

$\pi$ : relación de presiones =  $P_H/P_L$

$N_{O_2}$ : número de moles de oxígeno en la entrada del sistema (alimentación)

$N_{pO_2}$ : número de moles de oxígeno en la purga (producto)

$Y_0$ : Fracción molar (Concentración) de oxígeno en la entrada del sistema

$\beta$ : Fracción molar de componentes que no corresponden a oxígeno en la alimentación =  $1 - Y_0$

En el trabajo citado, se estudia la cinética de un proceso PSA de 4 etapas, mediante el análisis energético de todas las etapas implicadas en el ciclo.

Se establece la recuperación de oxígeno mediante la siguiente ecuación (3.62 según bibliografía):

$$\text{Recuperación } O_2 = \frac{N_{pO_2}}{N_{FO_2}}$$

*Ecuación 6-1*

Sustituyendo resulta (3.63 según bibliografía):

$$\text{Recuperación } O_2 = \frac{P_H (1 - y_0) - P_L}{P_H (1 - y_0)} (1 - \beta)$$

*Ecuación 6-2*

Introduciendo el coeficiente adimensional de relación de presiones de trabajo como:

$$\pi = \frac{P_H}{P_L}$$

*Ecuación 6-3*

Reemplazando en la ecuación anterior (3.63 según bibliografía) resulta:

$$\text{Recuperación } O_2 = \frac{\pi(1 - y_0) - 1}{\pi (1 - y_0)} (1 - \beta)$$

*Ecuación 6-4*

Siendo:



$$\pi > \frac{1}{1 - y_0}$$

Ecuación 6-5

El estudio presenta (Figura 6-1 y Figura 6-2) dos ejemplos de recuperación vs. Relación de presiones y fracción molar. El primer caso corresponde a  $\beta = 0,1$  y muestra el efecto de modificar  $y_0$ , la fracción en la entrada. La variación de relación de presiones se muestra desde el valor 1 a 300, que resulta extremadamente elevado, en orden de demostrar que para todos los valores de  $y_0$ , la recuperación de  $O_2$  se aproxima al límite de  $(1 - \beta)$ . La segunda figura corresponde al caso donde  $\beta = 0,1$ . Esta figura indica que bajos valores de  $\beta$  implican altas recuperaciones, y que altos valores de  $\beta$  implican bajas recuperaciones. Por esta razón, a la hora de separar gases, son deseables bajos valores de  $\beta$ , y son asociados con altos factores de separación ( $K_A/K_B$ ).

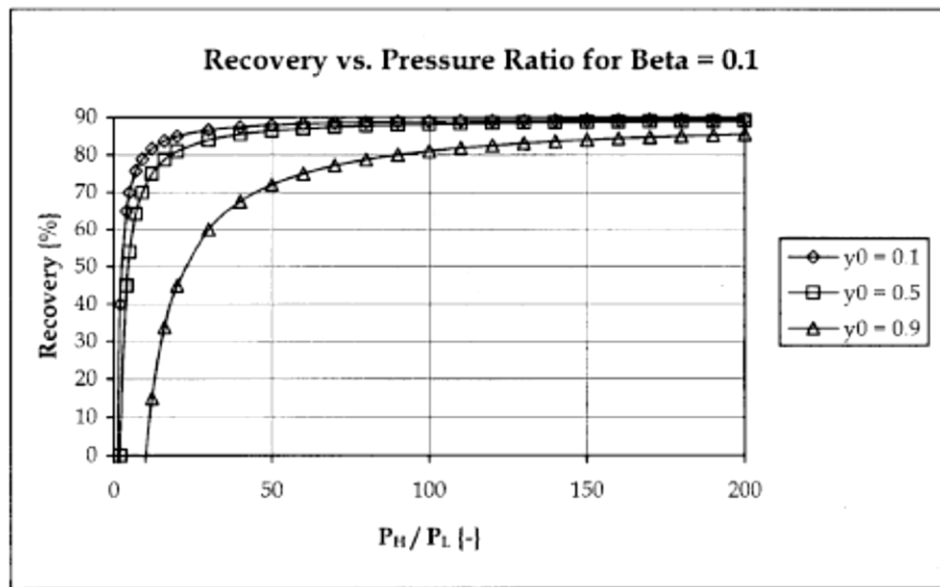


Figura 6-1 Recuperación vs. Relación de presiones para  $\beta = 0,1$

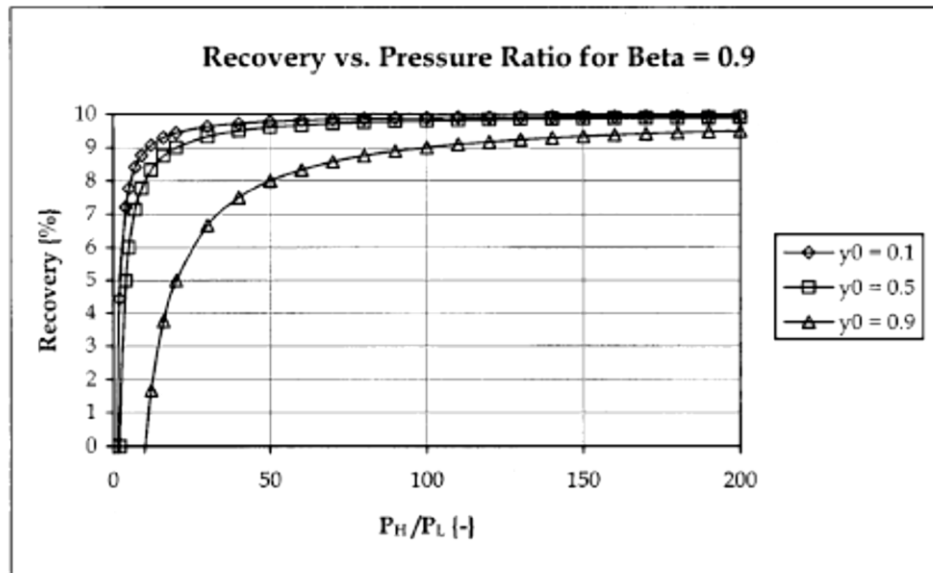


Figura 6-2 Recuperación vs. Relación de presiones para  $\beta = 0,9$

En la Tabla 6-5 se listan los parámetros del adsorbente (Zeolita 5A) de estudio determinados experimentalmente por Kayser and Knaebel (1986).

Temperatura [°C]	$k_A(N_2)$	$K_B(O_2)$	$\beta$
30	9.94	5.40	0.582
45	8.24	4.51	0.593
60	7.55	3.723	0.548

Tabla 6-5 Pendientes de isotermas de equilibrio ( $K_A$  y  $K_B$ ) y relación de selectividad ( $\beta$ ) para Nitrógeno y Oxígeno en la zeolita 5A.

La Figura 6-3 grafica Recuperación vs. Relación de presiones para concentración de oxígeno ( $y_0 = 0,78$  y  $\beta = 0,582$ ). La relación de presiones mínima para concentración de oxígeno utilizando el ciclo de 4 etapas es 4,55, y la máxima recuperación posible es del 41,82 % ( $1 - \beta$ ).

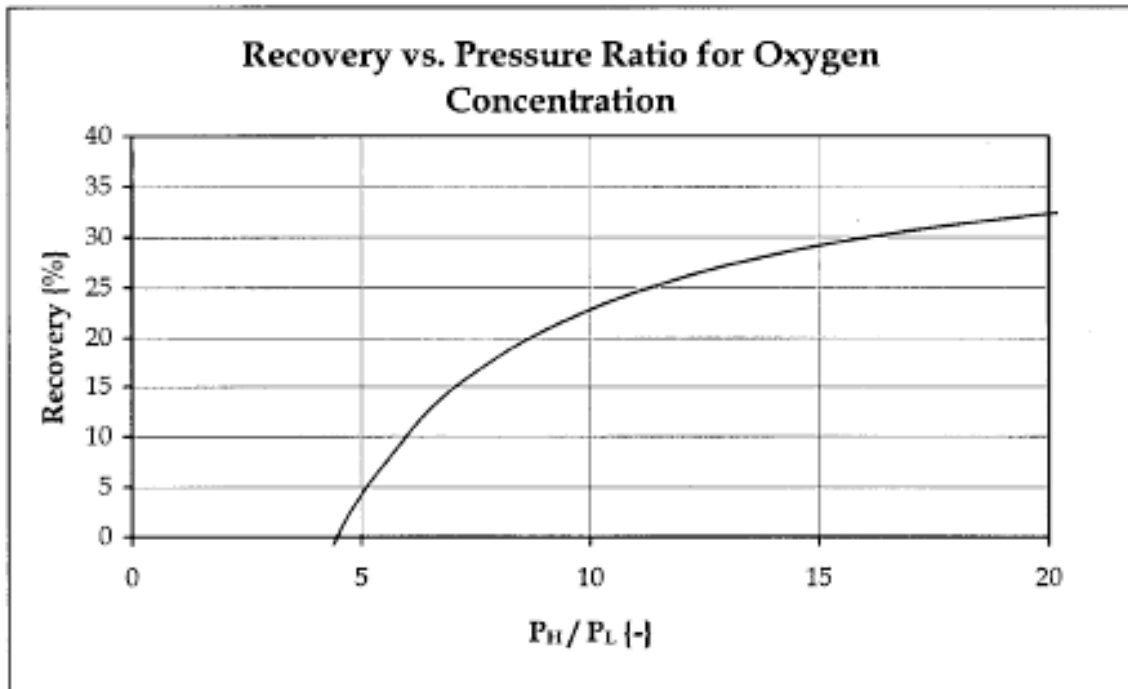


Figura 6-3 Recuperación vs. Relación de presiones para Concentración de Oxígeno; ( $y_0 = 0,78$  y  $\beta = 0,582$ )

Considerando los siguientes parámetros de operación del presente caso de estudio:

$$P_H = 8,5 \text{ Kg/cm}^2$$

$$P_L = 1 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\pi = P_H/P_L = 8,5$$

$$Y_0 = 0,78$$

$$\beta = 0,582$$

Resulta:

$$\text{Recuperación } O_2 = \frac{P_H(1-y_0) - P_L}{P_H(1-y_0)} (1 - \beta) = 19\%$$

*Ecuación 6-6*

Por lo tanto, el sistema PSA de cuatro etapas con dos camas de adsorción bajo las condiciones de operación planteadas en éste proyecto *será capaz de recuperar el 19% del oxígeno que ingresa al sistema*. Considerando el porcentaje de oxígeno presente en el aire, podemos establecer a continuación, en la Tabla 6-6, el caudal de entrada de aire al sistema a fin de cubrir el consumo requerido:

O2 necesario a la salida [m3/min]	Porcentaje de O2 en el aire	Porcentaje de Recuperación de O2	Porcentaje de Perdidas	Aire necesario a la entrada [m3/min]
0,23	0,22	0,19	0,10	6,0

*Tabla 6-6 Resumen de cantidades de gas de entrada y salida*

A partir de estas necesidades se realizará la selección de equipos y partes componentes del sistema.

## 6.2 Software de simulación de proceso PSA

### 6.2.1 Descripción

Aspen Adsim™ es un software que cuenta con un simulador de flujo comprensivo desarrollado para el óptimo diseño, simulación, optimización y análisis de procesos de adsorción de líquidos y gases. La aplicación cubre la necesidad de ingenieros y usuarios de similar formación en un amplio y variado rango de procesos de adsorción industriales de gases, con soporte adicional para procesos de adsorción líquida. Puede ser utilizado para identificar adsorbentes óptimos, diseñar mejores ciclos de adsorción (tiempos y etapas) y mejorar la operación general de la planta. Una captura de pantalla del software es mostrado en la Figura 6-4.

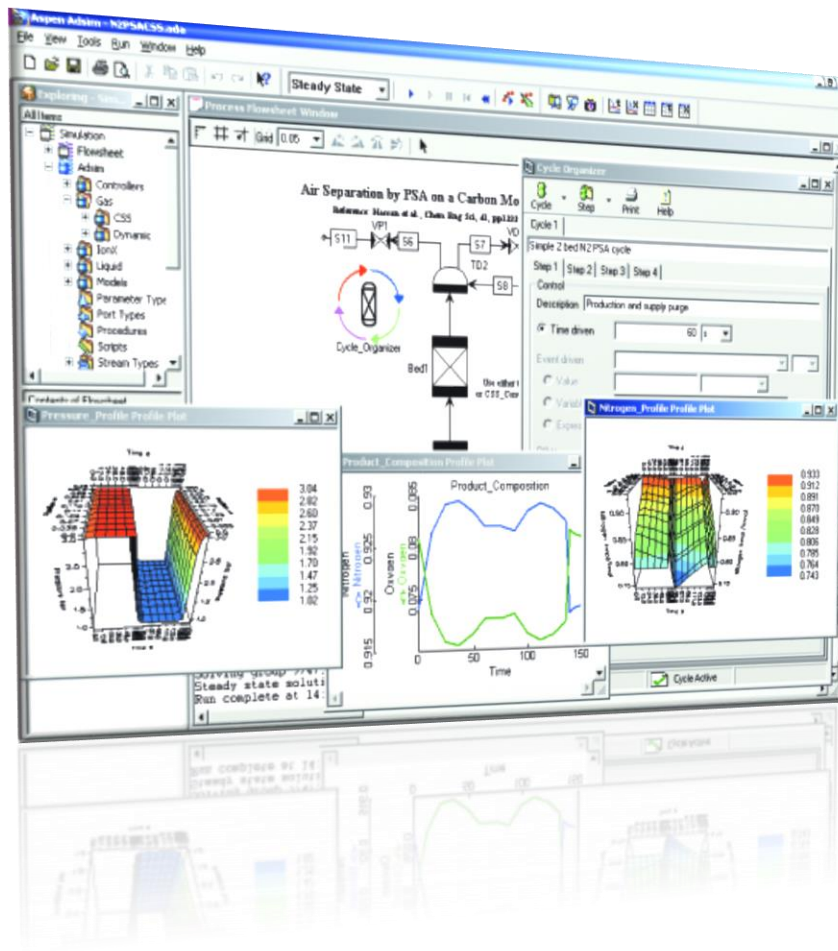


Figura 6-4 Captura de pantalla del Aspen Adsim

## 6.2.2 Características:

### 6.2.2.1 Aplicaciones de proceso:

• Aspen Adsorbim soporta ambos laboratorios/planta piloto y aplicaciones industriales. Los posibles procesos incluidos son: Pressure Swing Adsorption (PSA), Temperature Swing Adsorption (TSA), Vacuum Swing Adsorption (VSA) y otras variantes.

• Aspen Adsorbim puede modelar una amplia variedad de adsorbentes, incluyendo carbón activado, zeolitas, alúmina, sílica y tamiz molecular.

• Aspen Adsorbim contempla una variedad de estrategias de separación, incluyendo capas simples y múltiples de adsorbente, transferencia de masa equilibrada o variable y operación cíclica.

### 6.2.2.2 Resumen técnico.

- Modelo riguroso de Cama de Adsorbente.
  - ✓ Diferentes geometrías incluyendo la columna axial, cama horizontal y radial
  - ✓ Opciones para incluir dispersión axial y forma en el balance de materiales
  - ✓ Amplia gama de modelos cinéticos incluyendo resistencia concentrada, micro / macro-poro y modelo de tipo general. Otras aplicaciones permiten al usuario definir como son expresados los coeficientes de transferencia de masa y film.
  - ✓ Un amplio rango de modelos de isothermas estándar de equilibrio permiten el comportamiento tanto para componentes puros o casos de competitividad de componentes múltiples.
  - ✓ Isothermas incluidas: Langmuir, Freundlich, B.E.T. y Dubinin variantes que se suman a la solución ideal de adsorción (Teoría IAS).
  - ✓ Alta configurabilidad del balance de energía para permitir el comportamiento de temperatura variable, conducción, operación no adiabática y adición de efectos de pared.

- Paradigma de modelación de ciclo de estado estacionario.
  - ✓ Discretización completa del espacio y tiempo del ciclo de adsorción para permitirle al usuario determinar la condición de estado-estacionario cíclico.
  - ✓ Permite hacer uso de la estimación del estado-estacionario y técnicas de optimización para alcanzar un rápido diseño y optimización de ciclos.
- Manejo de ciclos:
  - ✓ El usuario puede definir cualquier cantidad de ciclos operados independientemente, cada cual conteniendo el número de ciclos de proceso deseado (por ejemplo: producción, purga, igualación de presiones y represurización).
  - ✓ Los pasos del proceso pueden ser controlados por un temporizador y por eventos monitoreados.
  - ✓ Cambios tipo escalón o rampa pueden ser impuestos en las variables manipulables.
- Regresión de parámetros:
  - ✓ Ajustar el modelo frente a resultados experimentales o de proceso.
  - ✓ Realizar la Regresión contra el estado-estacionario o resultados experimentales dinámicos.
  - ✓ Acceder a todas las constantes del modelo (de: dispersión, cinética, equilibrio y térmicas).
- Integración de programas:
  - ✓ Aspen Properties TM – Para información rigurosa y consistente.
  - ✓ Extender los diagramas de flujo de Aspen Adsime importando diagramas de Aspen Dynamic R.

### 6.2.3 Beneficios:

- **Reducción de costos** – Un modelo de Aspen Adsime puede resultar en la reducción de tiempos y costos de pruebas en plantas piloto.

- **Entendimiento del proceso mejorado** – Usando un modelo validado en Aspen Adsim, el ingeniero es capaz de explorar la envolvente de operación del proceso en menos tiempo, reduciendo peligros e inconvenientes al proceso real.
- **Diseño de proceso mejorado** – Aspen Adsim permite a los ingenieros probar alternativas antes de comprometerse con un diseño fijo.
- **Operaciones de planta mejoradas** – Los ingenieros pueden utilizar Aspen Adsim para encontrar nuevas condiciones de operación que respondan a cambios en las demandas de pureza, cargas de capacidad y consumos de alimentación.

En la Figura 6-5 se muestra una captura de pantalla de una simulación de un proceso PSA donde se puede ver la edición de variables de proceso, esquema del proceso, salida de gráficos de variables involucradas, etc.

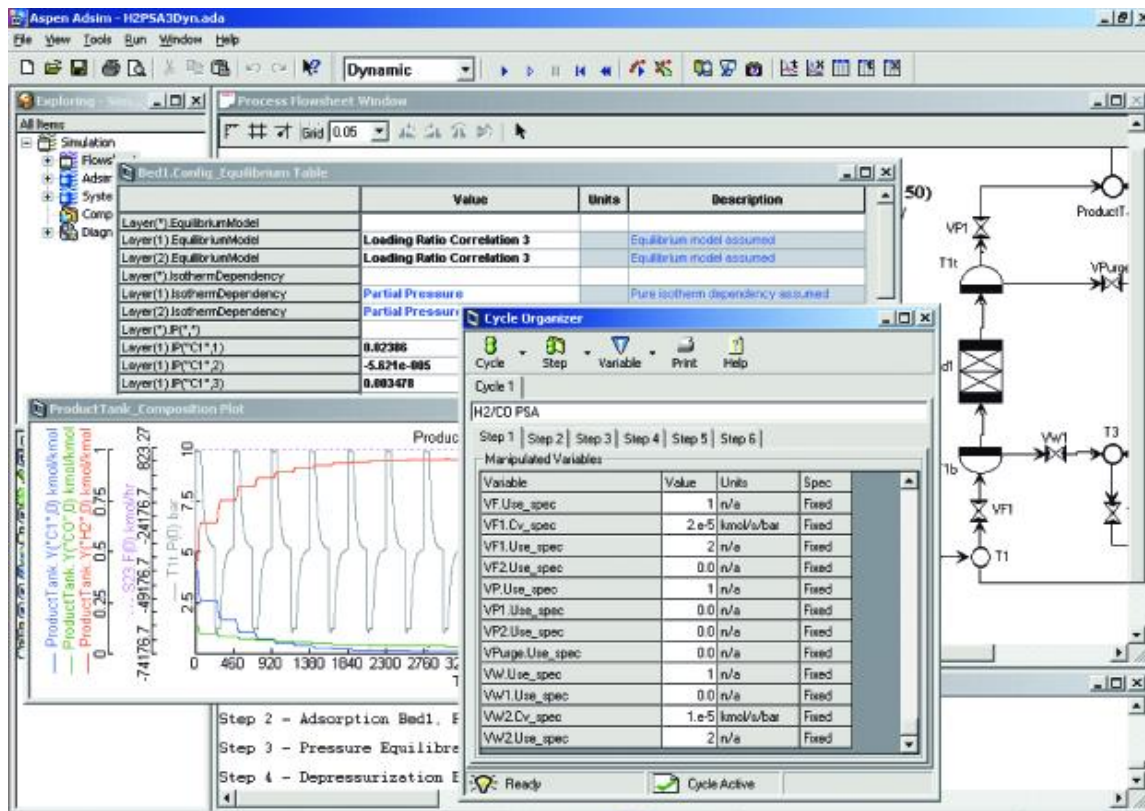


Figura 6-5 Simulación de un proceso PSA en Aspen Adsim



## 6.3 Simulación

Se listan a continuación los aspectos principales y consideraciones tomadas a la hora de modelar, simular y optimizar el proceso de separación de gases y obtención de oxígeno utilizado.

### 6.3.1 Condiciones de simulación:

- CICLO: Ciclo de Skarstrom de 4 etapas.
- Material adsorbente utilizado: Zeolita 5 A (comercial).
- PH= 8,5 Kg/cm<sup>2</sup>.
- PL=1 Kg/cm<sup>2</sup>.
- Hb (altura capa adsorbente) = 1,5 m.
- Db (diámetro capa adsorbente) = 0,45 m.

### 6.3.2 Capturas de simulación en software:

En la Figura 6-6 se observa una captura de pantalla de la pantalla principal del software utilizado para realizar la simulación y optimización del proceso físico-químico detallado.

Pueden detallarse tres zonas principales de trabajo:

1. Layout de planta piloto.
2. Lista de componentes.
3. Menú y opciones de simulación.

# Generador de Oxígeno para uso Hospitalario

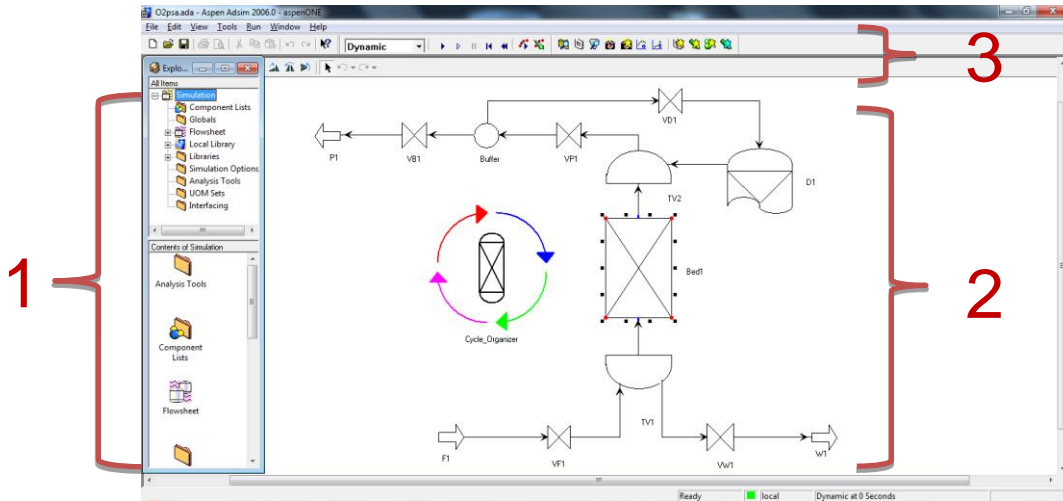


Figura 6-6 Vista de ventana principal de software Aspen Adsim.

La imagen del Lay-out de la planta piloto ensayada se puede visualizar en la Figura 6-7.

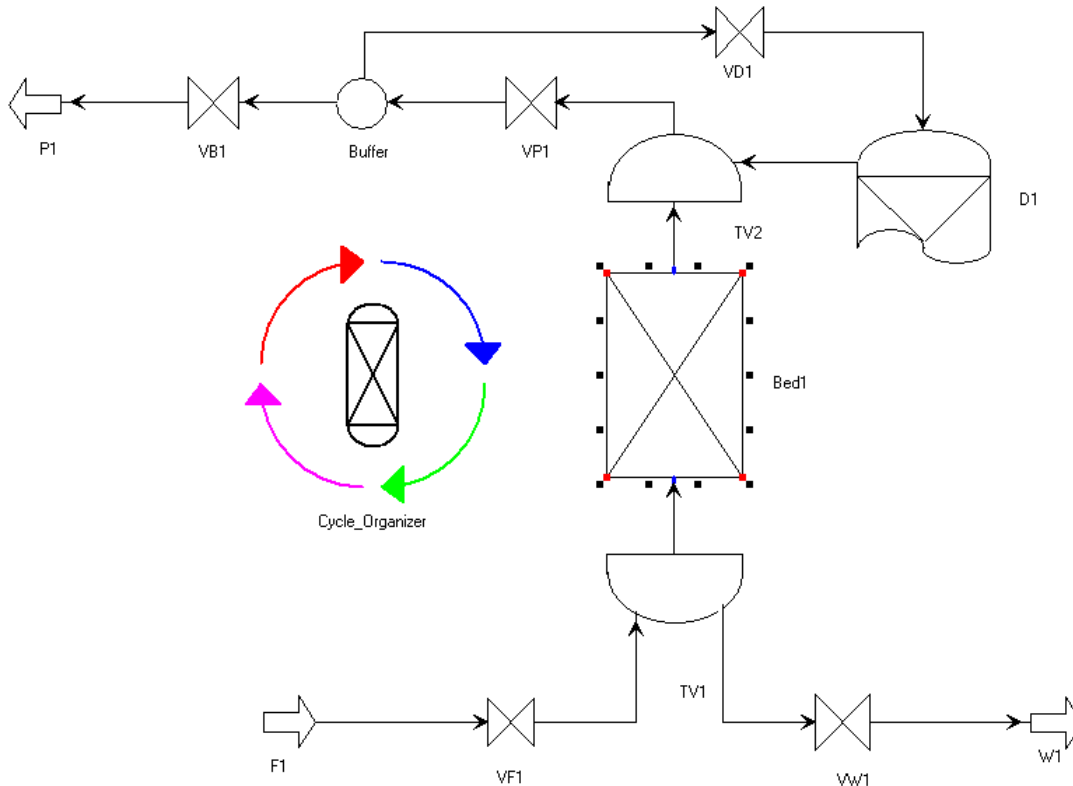


Figura 6-7 Lay-out: planta piloto

A continuación, se listan y nombran los elementos los componentes presentes en este diagrama de flujo:

F1: Flujo de aire de entrada con temperatura presión y composición definida.

VF1: Válvula de paso. (Representa una electro-válvula controlada por PLC).

TV1: Casquete inferior de recipiente de adsorción 1. (Representa el % volumen inferior libre de la cámara de adsorción).

Bed1: Cámara de adsorción 1. (Representa el % volumen cubierto por el material adsorbente).

TV2: Casquete inferior de recipiente de adsorción 1. (Representa el % volumen superior libre de la cámara de adsorción).

D1: Semi-ciclo de adsorción en recipiente número 2. (Representa el 2do recipiente de adsorción y así también la interacción y ejecución de las distintas etapas del ciclo secundario).

VP1: Válvula de paso. (Representa una electro-válvula controlada por PLC).

Buffer: recipiente colector.

VB1: Válvula de paso. (Represente una electro-válvula controlada por PLC).

VD1: Válvula de paso. (Representa una electro-válvula controlada por PLC).

P1: Flujo de producto de la planta. Producto final de todo el proceso.

VW1: Válvula de paso. (Representa una electro-válvula controlada por PLC).

W1: Flujo de desecho del proceso. Corriente de eliminación de gases no deseados, mayormente N<sub>2</sub> y Argón.

Cycle\_Organizer: Elemento ficticio que dictamina el orden y tiempo de cada ciclo y ejecuta cada uno.

En la Tabla 6-7 se observan las propiedades y componentes mayoritarios de la corriente de entrada de la simulación:

## Generador de Oxígeno para uso Hospitalario

	Value	Units	Spec	Description
F	4,49825e-004	kmol/s	Free	Flowrate
Y_Fwd(*)				
Y_Fwd("Ar")	0,01	kmol/kmol	Fixed	Composition in forward direction
Y_Fwd("N2")	0,79	kmol/kmol	Fixed	Composition in forward direction
Y_Fwd("O2")	0,2	kmol/kmol	Fixed	Composition in forward direction
T_Fwd	298,15	K	Fixed	Temperature in forward direction
P	8,5	bar	Fixed	Boundary pressure

Tabla 6-7 Propiedades y componentes de la corriente de entrada

Las características y dimensiones principales del lecho de adsorción simulado se muestran en las Figura 6-8 y Figura 6-9.

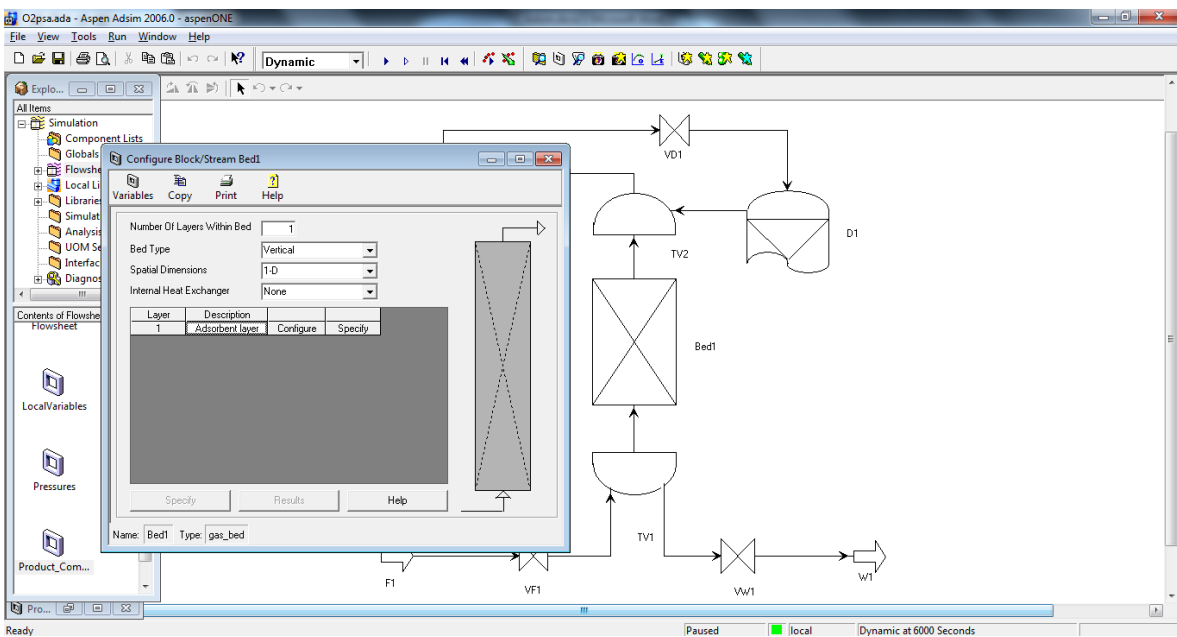


Figura 6-8 Características y dimensiones del lecho

## Generador de Oxígeno para uso Hospitalario

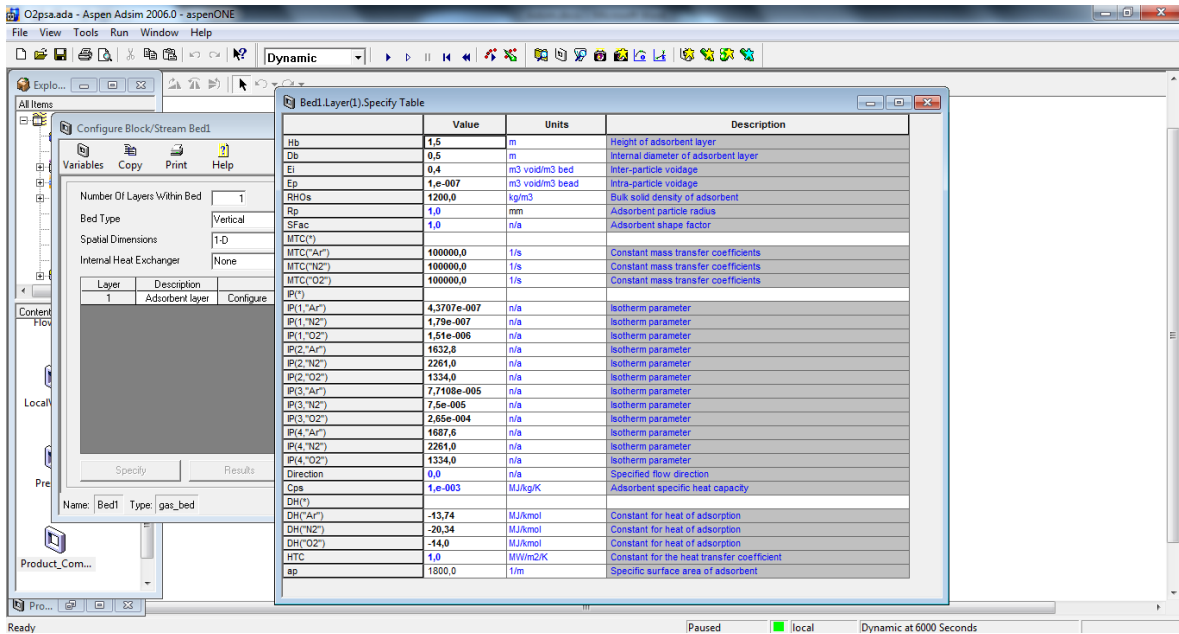


Figura 6-9 Características y dimensiones del lecho

En la Figura 6-10 se aprecia el detalle del ciclo de presión del proceso en función del tiempo. El mismo se lleva a cabo entre dos presiones: máxima (PH) de 8,5 Kg/cm<sup>2</sup> y mínima (PL) de 1 Kg/cm<sup>2</sup>. Se puede apreciar un tiempo total de ciclo de 120 segundos. Separándose el ciclo en dos partes de 20 segundos y otras dos de 40 segundos de duración, para cada lecho de adsorción.

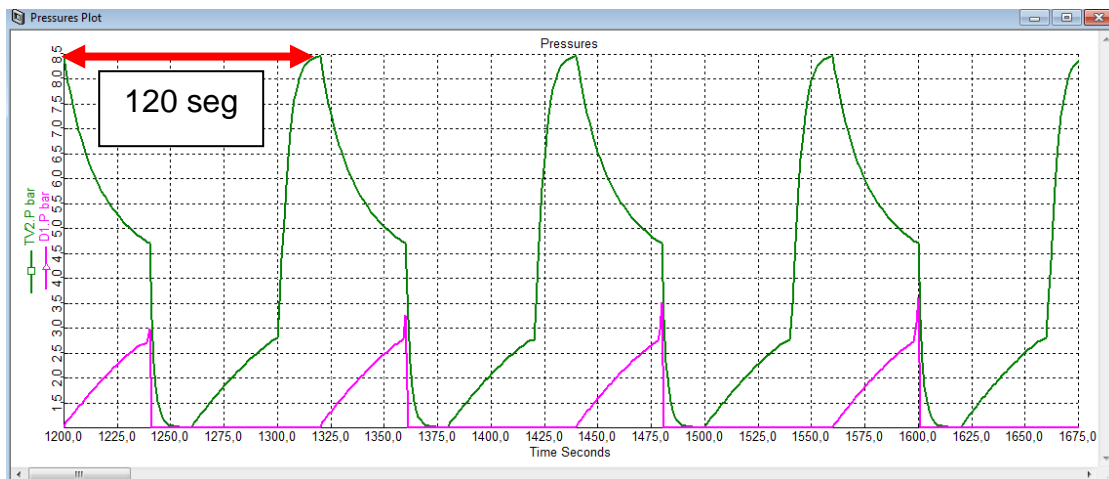


Figura 6-10 Diagrama de presiones del ciclo.

Esta selección de tiempos corresponde a la optimización del ciclo, para las condiciones adoptadas, realizada en el software. Se observan dos líneas de presión: la de color verde describe la presión dentro del casquete superior del primer lecho

de adsorción; en color rosa se marca la presión representativa del segundo módulo de adsorción. Pueden distinguirse (con mayor facilidad para el diagrama de color verde) las cuatro etapas teóricas del ciclo.

En la Figura 6-11 puede observarse la composición axial (fracción molar de cada componente) de la corriente que circula por el lecho de adsorción. La concentración de oxígeno a la entrada es notablemente inferior a la que se tiene a la salida (posición = 1,5 m.), mostrando la actuación del paquete de adsorción que va capturando los demás componentes y deja circular mayoritariamente el oxígeno.

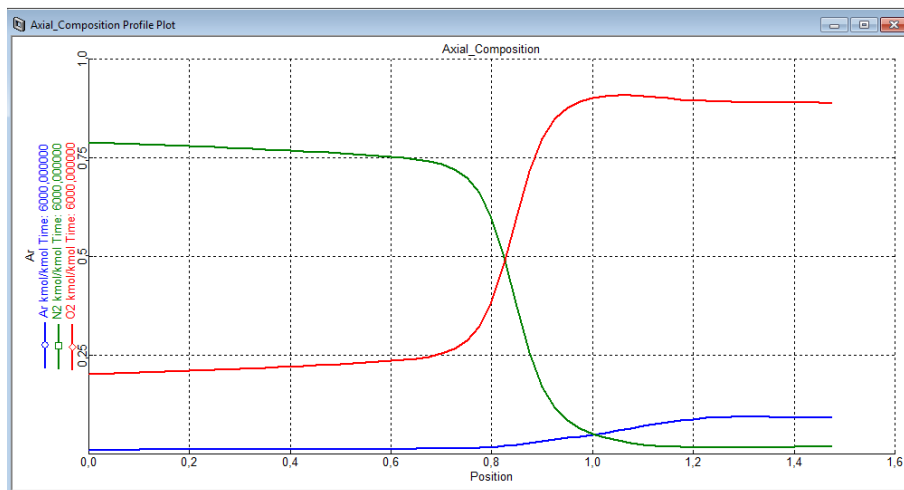


Figura 6-11 Diagrama Composición de corriente interior al Lecho de adsorción, a lo largo del mismo

A continuación, en la Figura 6-12 se muestra la composición (fracción molar) en el tiempo, de la corriente de producto. Se marca una fracción molar final de oxígeno de  $X=0,895$ ; resultando en un producto simulado (oxígeno) de 89,5 % de pureza. En la Tabla 6-8 se detallan las fracciones molares de los gases involucrados en el proceso.

## Generador de Oxígeno para uso Hospitalario

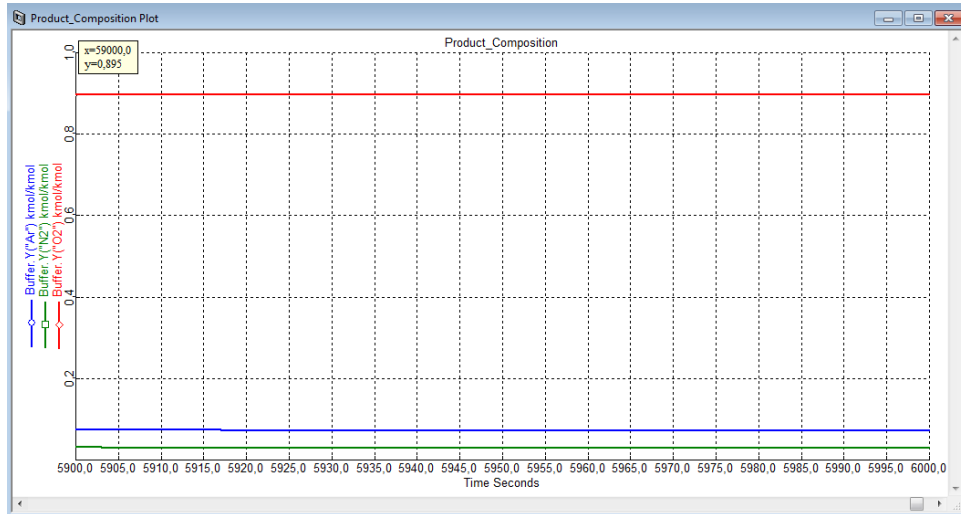


Figura 6-12 Diagrama temporal de: Composición (fracción molar) de corriente de producto

	Value	Units	Description
Y(*)			
Y("Ar")	0,072774	kmol/kmol	Composition within tank/void
Y("N2")	0,0299226	kmol/kmol	Composition within tank/void
Y("O2")	0,897303	kmol/kmol	Composition within tank/void
Mc(*)			
Mc("Ar")	0,0353765	kmol	Individual component holdup
Mc("N2")	0,0145458	kmol	Individual component holdup
Mc("O2")	0,436192	kmol	Individual component holdup
T	309,835	K	Temperature within tank/void
P	4,17422	bar	Pressure within tank/void
H	1,05742	MJ/kmol	Enthalpy of material within tank/void

Tabla 6-8 Tabla de composición: corriente de producto. (Pureza O<sub>2</sub>=89,7%)

La Tabla 6-9 muestra el detalle considerado por el software de vacío de los casquetes del lecho.

TV1.Specify Table				
	Value	Units	Spec	Description
Tank Volume	1,e-005	m3	Fixed	Total volume of tank/void

TV2.Specify Table				
	Value	Units	Spec	Description
Tank Volume	1,e-005	m3	Fixed	Total volume of tank/void

Tabla 6-9 Detalle de volumen de vacío adoptado por el software para los casquetes inferior y superior del lecho de adsorción (%Vol. Vacío de tanque)

### 6.3.3 Resultados de Simulación:

Los resultados arrojados por la simulación con las condiciones de entrada detalladas con anterioridad fueron:

- Pureza del producto (Oxígeno) = 89,7 %
- Tiempo total optimizado del ciclo = 120 segundos

### 6.3.4 Ensayos Complementarios

A modo de prueba se realizaron algunas simulaciones extras bajo diferentes condiciones:

#### 6.3.4.1 Simulación adoptando tiempos parciales de ciclo duplicados:

Al simular el ciclo con un tiempo total de proceso duplicado (240 seg.) se concluyó que aumentar los tiempos de semi-ciclos del proceso no decanta en un aumento de la pureza del producto, por lo contrario, disminuye la cantidad de oxígeno a la salida a un 86% de pureza en este caso. En la Figura 6-13 se muestra un gráfico con las composiciones del producto simulado.

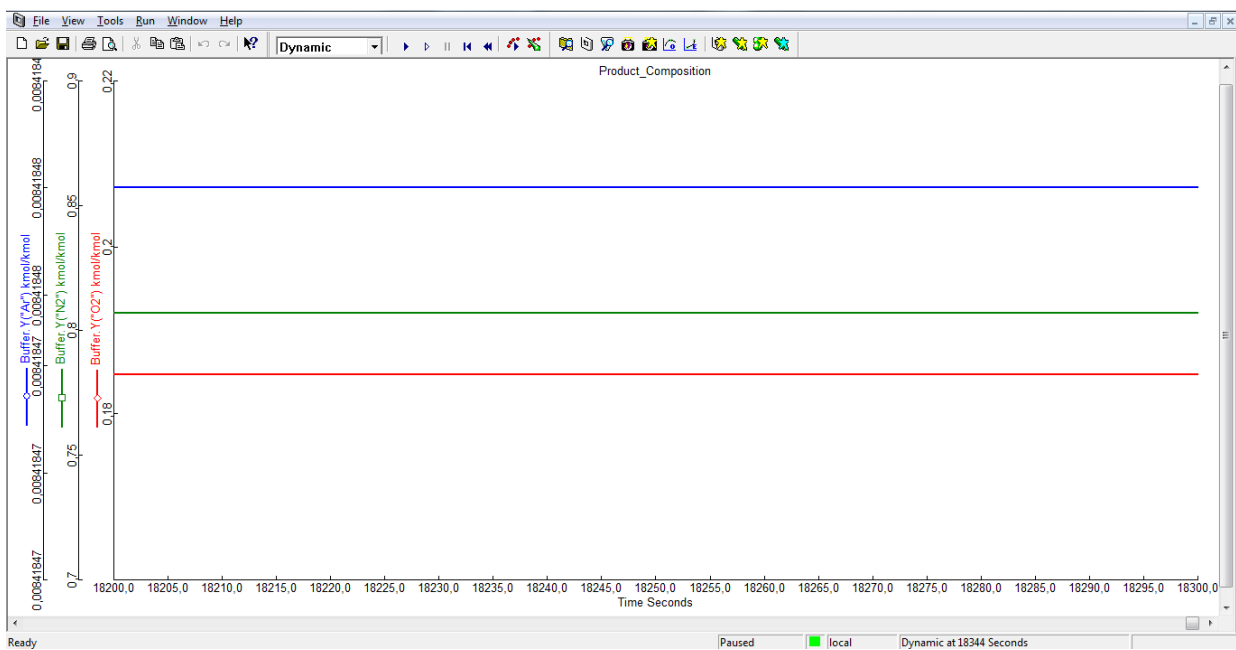


Figura 6-13 Composición: corriente de producto simulación número 2. (Pureza aprox. O<sub>2</sub>=86,0%)



### 6.3.4.2 Otros casos

Se realizaron una serie de simulaciones modificando dimensiones (altura y diámetro) del lecho de adsorción, presión máxima de proceso y tiempos de semi-ciclos. En ninguno de los casos simulados se logró una pureza de oxígeno final mayor que la obtenida con las condiciones de contorno adoptadas para la primera simulación detallada. Razón por lo cual esto confirma que ellas son las condiciones ideales para la operación del sistema, logrando una optimización de los tiempos de ciclo y porcentaje de pureza de oxígeno.

## 7 Descripción del Sistema y Componentes

El oxígeno se obtiene a partir del aire atmosférico por adsorción de nitrógeno en un lecho de tamices moleculares de zeolita en una unidad de adsorción por cambio de presión (PSA). El aire atmosférico, que es el gas materia prima de este proceso, presenta una composición en volumen de 78,084 % N<sub>2</sub>, 20,946 % O<sub>2</sub>, 0,934 % Ar y 0,036 % de otros gases entre los que se encuentran otros dos componentes mayoritarios, el dióxido de carbono y el vapor de agua. De estos cinco componentes principales del aire, el nitrógeno, el oxígeno y el argón son considerados gases permanentes, porque su concentración no varía de forma sustancial en el tiempo, ya que tienen un periodo de permanencia muy grande en la atmósfera (10<sup>6</sup> años). Por el contrario, la cantidad de vapor de agua que se encuentra en el aire es muy variable, ya que depende de su humedad relativa, función de factores como la temperatura ambiente, así como de las condiciones climatológicas, constituyendo entre aproximadamente el 0 y 4 % de la composición total [16]. Por ello, a efectos de cálculos, la composición total del flujo de aire de entrada al proceso se aproxima a 78 % N<sub>2</sub>, 21 % O<sub>2</sub> y 1 % Ar que, a la salida de la unidad de PSA, conformarán las corrientes de producto y gases de escape.

En la Figura 7-1 se muestra el diagrama de flujo del proceso que se describe a continuación.

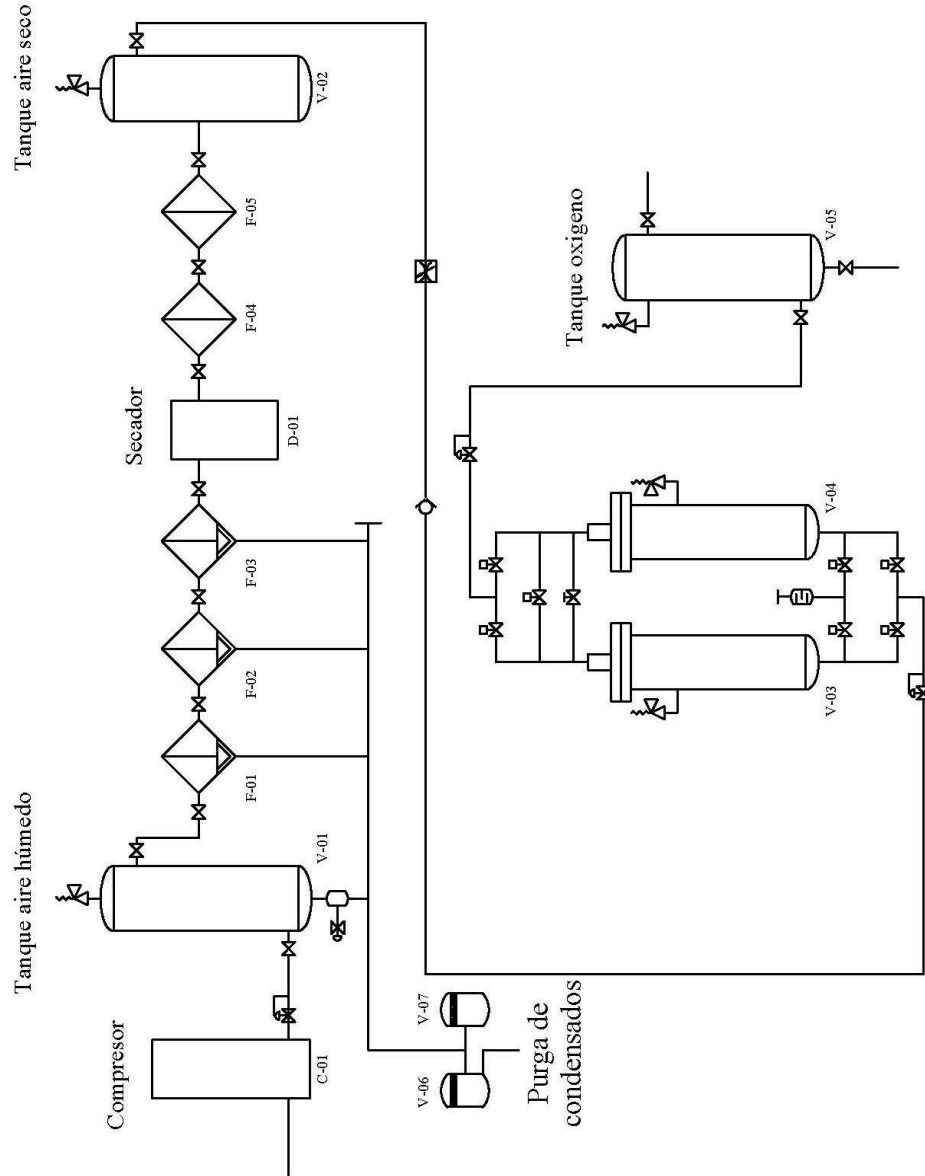


Figura 7-1 Diagrama de Flujo del proceso de adsorción por diferencia de presión

El caudal de aire a la entrada de la planta es de  $6 \text{ m}^3/\text{min}$ , este fue calculado en la sección 6.1 Cálculos y diseño, y la presión de entrada es la atmosférica de  $1 \text{ Kg}/\text{cm}^2$ . Con este caudal se da respuesta a la demanda de oxígeno del Hospital, tal como se planteó en el apartado 6 Análisis del problema y Definición de la Capacidad.

## 7.1 Equipo de compresión

El proceso comienza con la entrada de la mezcla de aire atmosférico a la unidad compresora (C-01). El cual es comprimido desde la presión atmosférica hasta los 10 Kg/cm<sup>2</sup> necesarios para el normal funcionamiento de la planta.

## 7.2 Pulmón de estabilización de aire húmedo

El flujo de aire entra en un tanque receptor (V-01) de 0,68 m<sup>3</sup> a una presión de 10 Kg/cm<sup>2</sup>, donde se estabiliza causando que las posibles fluctuaciones en las condiciones del aire comprimido y en el régimen de trabajo del compresor se neutralicen proporcionando una fuente constante de aire controlado. También enfría el aire de forma adicional, lo cual conduce a la condensación de la humedad remanente en el flujo de aire que se elimina a través de un purgador de condensados (CD-01). Además, realiza una función de protección de los equipos siguientes en caso de fallo del compresor.

### 7.3 Equipo de purga de condensados

A continuación, se detalla el funcionamiento del purgador de condensados (CD-01).

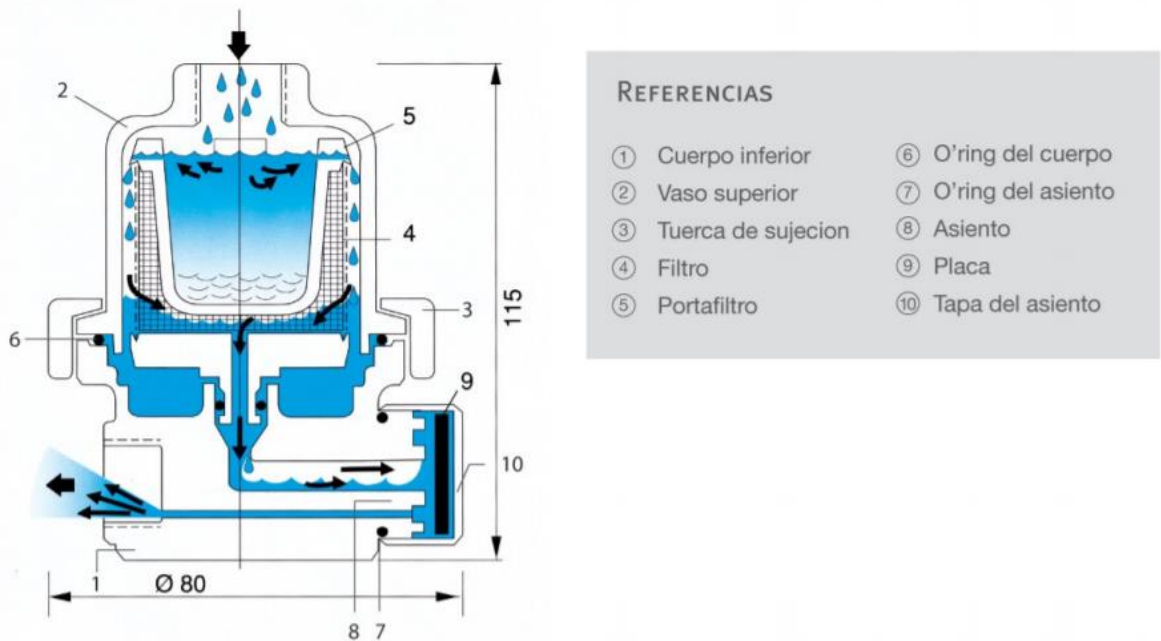


Figura 7-2 Elementos del purgador de condensados

El condensado ingresa al purgador y es recibido por el vaso porta-filtros (5) donde son retenidos los sedimentos y sólidos de gran tamaño, los líquidos rebalsan el colector y caen atravesando la malla filtrante (4), donde quedan retenidas las partículas más pequeñas.

El condensado ya filtrado pasa al sistema automático de drenaje, que opera por el juego de presiones sobre las caras de una placa de acero inoxidable (9) (única pieza móvil).

La propia presión del aire comprimido genera contrapresiones variables que producen la apertura y cierre del sistema, asegurando el drenaje del condensado ya sea mediante descargas intermitentes o en forma continua.

## 7.4 Equipo de filtración previo

A continuación, el aire se trata para eliminar las impurezas que pueda contener en función del uso que se le va a dar, en este caso uso médico. La calidad del aire se define mediante el estándar internacional ISO 8573-1:2010 para aire comprimido que clasifica los contaminantes y las clases de pureza independientemente de la localización del sistema de aire comprimido. El aire empleado para el uso clínico es de clase 2.2.1.

La primera cifra hace referencia a la concentración de partículas sólidas que contiene, en este caso un máximo de 100 partículas/m<sup>3</sup> de hasta 5 μ de tamaño y cantidades permisibles mayores para diámetros menores de partícula; la segunda indica que su contenido en agua se reduce hasta el punto de ebullición a presión de -40 °C o menos y la última cifra señala que tiene una concentración total de aceite (líquido, en aerosol y vapor) menor o igual a 0,01 mg/m<sup>3</sup>.

Para llevar a cabo el tratamiento del aire se emplean 3 filtros en serie, el primero (F-01) es un filtro separador de líquidos que atrapa grandes cantidades de emulsión de agua y aceite y sólidos de más de 15μ. Esto se logra mediante la circulación de aire a través de un lecho de microfibras de vidrio o malla de acero inoxidable (para grandes caudales), que cambia constantemente la dirección del flujo (flujo sinuoso) y obliga a las pequeñas gotas a chocar y adherirse a la malla agrupándose entre sí para formar gotas más grandes que caen por gravedad al fondo de la carcasa.

Debe instalarse delante de filtros de partículas o coalescentes (aumenta la vida útil de los elementos filtrantes).

Luego el aire pasa a través de un filtro coalescente (F-02) el cual capta y separa por coalescencia aerosoles líquidos y micro-gotas de agua y aceite con una eficiencia mayor al 99,99%. Retiene partículas sólidas de 1 o 0,3 μ (micrones).

Cuenta con un elemento filtrante de microfibras de vidrio y celulosa de varias etapas y trabaja con flujo inverso.

Por último, se utiliza un filtro de carbón activa (F-03) indispensable para la respiración humana. Éste retiene el aceite que se halla en forma residual en estado de vapor y que escapa de los otros filtros, también elimina los olores.

Debe instalarse en los puntos de utilización de aire después de los filtros coalescente (F-02) y antes de los filtros bacteriológicos (F-05).



Figura 7-3 Esquema de tren de filtros

### 7.5 Equipo de separación de agua y aceite

El condensado drenado por los equipos se reúne para ser tratado en el separador de agua y aceite (V-06 y V-07) de acuerdo a los requerimientos fijados por la legislación. El límite de aceites y grasas para poder realizar el vertido al sistema público de saneamiento se fija en 10 g/l según ordenanza n° 23023 del ente regulador Obras Sanitarias del Estado (OSSE).

El separador opera según el siguiente esquema.

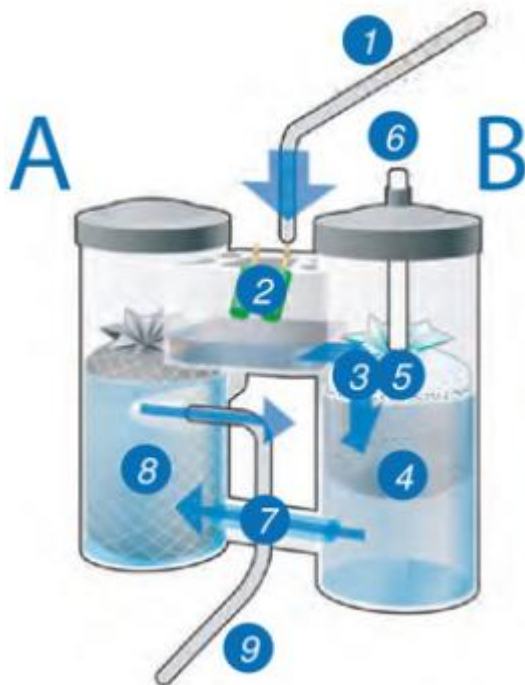


Figura 7-4 Elementos y operación del separador de agua y aceite<sup>1</sup>

1. Recogida de condensado.
2. Los silenciadores situados en una cámara de expansión recogen el condensado y se produce la primera separación por despresurización.
3. La emulsión de agua/aceite entra en la columna B y pasa a través del medio oleófilo, consistente en fibras que absorben el aceite y dejan pasar el agua.
4. El filtro oleófilo flota en la columna B. Su misión es absorber el aceite residual que flota en la superficie.
5. El peso del filtro aumenta a medida que crece la saturación de aceite. El aceite comienza a alcanzar progresivamente el indicador de servicio. La parte del filtro que no está saturada se mantiene en contacto con la superficie del agua.
6. Indicador de saturación del filtro.
7. El condensado limpio fluye del fondo de la columna B a la columna A.

<sup>1</sup> Fuente: ABAC. Disponible en la URL:  
[http://viewer.abacaircompressors.com/ABAC\\_QAS\\_catalogue\\_Spanish\\_LR/#page/15](http://viewer.abacaircompressors.com/ABAC_QAS_catalogue_Spanish_LR/#page/15)

8. La columna A contiene carbón activado que absorbe el aceite que queda en el condensado. La gran capacidad del sistema evita cualquier riesgo de derrame en caso de bloqueo del sistema o si este produce una cantidad excesiva de condensado.
9. El contenido de aceite en la salida es aproximadamente de 15 mg/l, en condiciones de referencia, un nivel que permite eliminar el condensado en el desagüe sin riesgos para el medio ambiente

## 7.6 Equipo de secado de aire

El siguiente equipo que se dispone para tratar el aire es un secador de aire (D-01). El secador se encarga de eliminar una última fracción de vapor de agua para obtener aire muy seco, necesario para preservar el estado de los lechos del equipo PSA y, por tanto, la eficiencia de la operación.

## 7.7 Equipo de filtración secundaria

Una vez obtenido el aire seco este pasa por un par de filtros de alta eficiencia para la protección contra las partículas de polvo. Éstos entregan aire comprimido de acuerdo con las mayores exigencias, retención de sólidos muy finos. Se instala después de los filtros coalescentes (F-02).

Uno de ellos llamado filtro de Partículas de Alta Eficiencia (F-04) retiene partículas sólidas mayores a  $0,3\mu$  con una eficiencia superior al 99,99%. El siguiente filtro Bacteriológico de Alta Eficiencia (F-05) entrega aire libre de bacterias y partículas sólidas mayores a  $0,01\mu$ .

Con esta operación se terminan de cumplir los requisitos exigidos para producir aire de alta calidad útil tanto para la industria alimentaria como para uso medicinal.

En la Figura 8-3 se muestra un plano del modelo de válvulas seleccionadas





Figura 7-5 Esquema de tren de filtros

## 7.8 Pulmón de estabilización de aire seco

Tras finalizar el tratamiento del aire, se estabiliza de nuevo el flujo, ahora de aire limpio y seco, en un depósito de inercia (V-02), de  $0,68 \text{ m}^3$  a una presión de  $10 \text{ Kg/cm}^2$ , que reduce las fluctuaciones producidas por los cambios en las condiciones de operación de los equipos y lo prepara para la demanda del siguiente equipo. De esta forma actúa como elemento protector evitando que los posibles fallos en el régimen de operación del secador dejen pasar la humedad hasta los lechos de adsorción.

El flujo de aire, cuya temperatura ha seguido disminuyendo a lo largo del proceso, se encuentra aproximadamente a temperatura ambiente,  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , óptima para la operación de los lechos de PSA. Además, este descenso de la temperatura favorece la condensación y separación de la fracción de vapor de agua a su paso por los diferentes equipos hasta conseguir una concentración de agua despreciable.

El contenido del pulmón se utiliza para alimentar las camas de adsorción a la presión requerida ( $8,5 \text{ Kg/cm}^2$ ) la cual es gobernada por una válvula reguladora.

## 7.9 Equipo de separación por adsorción

A continuación, el gas comprimido, a temperatura ambiente y sin partículas, pasa por los módulos de PSA donde se produce la separación de los gases que

componen la corriente de aire en oxígeno puro como producto y nitrógeno como gas de escape.

El proceso llevado a cabo en las camas de adsorción fue descrito en detalle en la sección 5 Ciclo de adsorción en etapas.

### **7.10 Pulmón de oxígeno**

Finalizada la separación del aire en oxígeno como producto principal y nitrógeno como gas de escape, se lleva el flujo de oxígeno a un recipiente (V-06) donde es almacenado para su posterior utilización. La presión del gas será la de salida del sistema PSA, 8 Kg/cm<sup>2</sup>.

Más adelante se presentarán una serie de mejoras al sistema planteado, donde serán necesarios otros componentes para lograr las funciones requeridas en cada caso.

### 7.11 Esquema del sistema

Con lo descrito anteriormente el sistema está compuesto por los siguientes componentes:

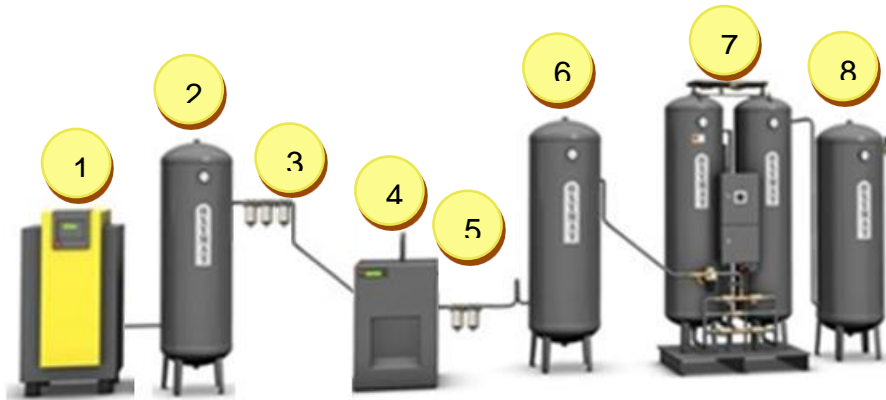


Figura 7-6 Esquema ilustrativo 3D del sistema.

1. Compresor
2. Pulmón de aire
3. Tren de filtros N°1
4. Secador de aire
5. Tren de filtros N°2
6. Pulmón de aire seco
7. Sistema PSA
8. Pulmón de Oxígeno

## 8 Selección de componentes y equipos

En base a la optimización por simulación del proceso descrito en el apartado anterior y a los requerimientos operativos del sistema, se procedió a seleccionar los equipos y componentes necesarios para la planta de separación de oxígeno.

### 8.1 Selección de componentes (cantidad, tamaño, especificaciones)

#### 8.1.1 Unidad compresora

De acuerdo a las presiones y caudales requeridos por el sistema, se procedió a seleccionar un compresor que cumpla con dichas características. Se optó por seleccionar un compresor rotativo a tornillo, ya que los alternativos a pistón, a pesar de ser más económicos a la hora de la adquisición, se tornan económicamente inconvenientes en cuanto al consumo de energía a la hora de entregar las presiones y los caudales requeridos. Por lo tanto, un compresor a tornillo, de mayor costo, pero de menor consumo se adapta mejor a las condiciones dadas.

Se seleccionó un compresor del fabricante Sullair con las siguientes características y prestaciones:

- Modelo: S-Energy 4510
- Marca: Sullair
- Origen: Argentina
- Potencia nominal del motor: 60 HP (44.7 kW)
- Caudal aspirado: 6,7 m<sup>3</sup>/min
- Presión de trabajo: 10 Kg/cm<sup>2</sup>
- Conexión de aire: 2" NPT
- Dimensiones: (L 1570 x A 880 x H 1560) mm
- Peso: 995 Kg
- Nivel de ruido: 69 dBA

En la Figura 8-1 se muestra el modelo seleccionado



Figura 8-1 Modelo de compresor seleccionado

Este equipo cuenta con las siguientes características técnicas:

- Tablero de arranque estrella - triangulo
- Cabina de insonorización y protección insonorizada.
- Muy bajo nivel de ruido.
- Control de capacidad con Modulación y On/off ambos incorporados.
- Acople directo entre motor y unidad compresora sin correas de transmisión.
- Unidad compresora de bajas revoluciones y mayor vida útil.
- Post-enfriador con filtro separador ciclónico y trampa automática de drenaje temporizada.
- Panel de control programable con microprocesador de última generación WS.
- Aceite sintético Sullube biodegradable de 8000 Hs. De duración o un año.
- Rodamientos con vida útil extendida
- Pasaje de aceite a la línea menor a 1 ppm.
- Dimensiones compactas – menor footprint.
- Motor IP55 3 x 380V x 50 Hz
- Temp. mínima de trabajo compresor standard 0°C.
- Temp. máxima de trabajo 40°C.

### 8.1.2 Filtros

Como se indicó en el apartado “7 Descripción del ” los filtros necesarios son  
5.

Marca: DRECAF

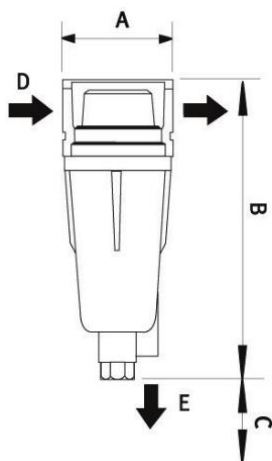
Modelo: FCD-1020

- FCD-L: Filtro de líquidos
- FCD-C: Filtro coalescentes
- FCD-A: Filtro de carbón activado
- FCD-S: Filtros de alta eficiencia
  - FCD-SP: Filtro de partículas de alta eficiencia
  - FCD-SH: Filtro bacteriológico



Figura 8-2 Imágenes de los filtros seleccionados

En la Figura 8-3 se muestra un plano del modelo de válvulas seleccionadas



Modelo	A	B	C	D	E
FCD-1020	91	258	200	1"	1/4"
FCD-1030	123	390	330	1/2"	1/4"
FCD-1040	160	680	570	2"	1/4"
FCD-1041	160	1070	950	2"	1/4"
FCD-1050	228	1270	930	3"	1/4"
FCD-1051	228	1490	1330	3"	1/4"

Figura 8-3 Plano de la válvula FCD<sup>2</sup>

### 8.1.3 Purgador Electrónico



Figura 8-4 Purgador electrónico<sup>3</sup>

Purgador electrónico de condensado (CD-01)

- Marca: DRECAF
- Modelo: DA-100
- Conexión de entrada y salida: 1/2"

<sup>2</sup>Fuente: Catalogo del fabricante DRECAF. Disponible en la URL: [http://www.drecaf.com/downloads/Catalogo\\_Drecaf.pdf](http://www.drecaf.com/downloads/Catalogo_Drecaf.pdf)

<sup>3</sup>Fuente: Catalogo del fabricante DRECAF. Disponible en la URL: [http://www.drecaf.com/downloads/Catalogo\\_Drecaf.pdf](http://www.drecaf.com/downloads/Catalogo_Drecaf.pdf)

- Presión máxima de trabajo: 14 kg/cm<sup>2</sup>
- Presión mínima de trabajo: 4.21 kg/cm<sup>2</sup>
- Temperatura máxima de trabajo: 40°C
- Peso: 0,415 Kg
- Drenaje máximo de condensado a 7 kg/cm<sup>2</sup>: 100 lts/h

#### 8.1.4 Separador de agua y aceite



Figura 8-5 Separador de agua y aceite, vista exterior y dimensiones<sup>4</sup>

- Separador de agua y aceite (V-03 y V-04)
- Empresa: ABAC
- Modelo: WS425
- Caudal instalado: 5.238 m<sup>3</sup>/h
- Conexiones: Entrada: 2x3/4" Salida: 1x3/4"

<sup>4</sup> Fuente: ABAC. Disponible en la URL [http://viewer.abacaircompressors.com/ABAC\\_QAS\\_catalogue\\_Spanish\\_LR/ABAC%20QAS%20catalogue%20Spanish%20LR.pdf](http://viewer.abacaircompressors.com/ABAC_QAS_catalogue_Spanish_LR/ABAC%20QAS%20catalogue%20Spanish%20LR.pdf)



- Dimensiones (a x b x c): 0,945 x 0,695 x 1,1 m

### 8.1.5 Secador

De acuerdo a las necesidades planteadas se seleccionó un secador no cíclico de aire del fabricante SULLAIR por refrigeración con las siguientes características:

- Marca: Sullair
- Modelo: RN-325
- Caudal Nominal: 9,20 m<sup>3</sup>/min
- Punto de Rocío: 2/4°C



Figura 8-6 Modelo del secador seleccionado

### Características técnicas:

- Válvula automática de drenaje.
- Gas ecológico R-134a.
- Intercambiador de calor 3 en 1 de material de aluminio con aislante
- Paneles fácilmente removibles
- Punto de rocío real de 2 a 4°C sin oscilaciones
- Bajo consumo energético
- Muy baja pérdida de carga
- Ventiladores de alta calidad
- Condensadores sobredimensionados
- Dimensiones compactas
- Capacidad variable entre el 10% y 100% del caudal nominal.
- Indicador de encendido lumínico
- Indicador de humedad de banda
- Temperatura máxima de entrada: 65,5°C
- Presión máxima de entrada: 16,7 kg/cm
- Temperatura ambiente máxima: 48,9 °C

### 8.1.6 Camas de Adsorción

#### 8.1.6.1 Diseño según ASME VIII Div. 1.

Para la selección de las camas de adsorción se realizará en primera instancia el diseño de las mismas bajo las condiciones definidas anteriormente en este trabajo.

El diseño de las camas de adsorción se realizó utilizando el software de diseño de recipientes a presión “PV Elite”, herramienta utilizada para el diseño, análisis y evaluación de recipientes sometidos a presión según ASME VIII Div. 1.

Mediante esta herramienta fue posible realizar esquemas de los recipientes (forma, componentes), definir las variables de diseño (dimensiones, materiales, presiones, temperaturas, espesores) y obtener las máximas presiones admisibles y espesores requeridos.

Una imagen de la herramienta utilizada para el diseño de los recipientes a presión se muestra en la Figura 8-7.

## Generador de Oxígeno para uso Hospitalario

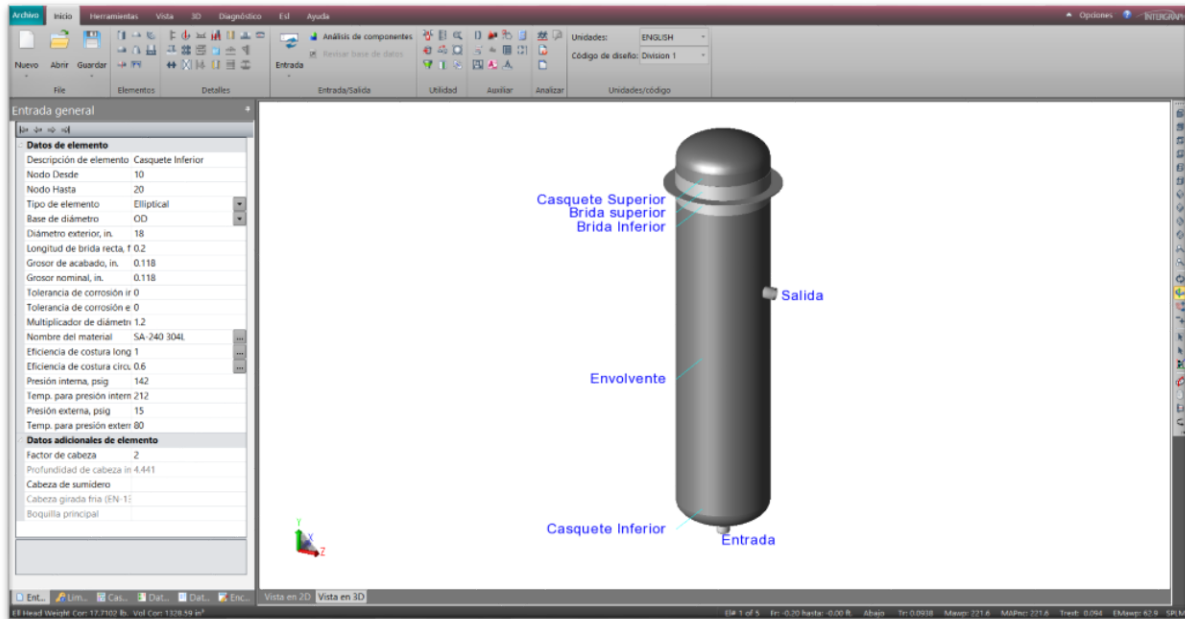


Figura 8-7 Imagen del simulador PV Elite

Se realizó la simulación de una de las camas de adsorción, la cama restante resulta exactamente igual a diferencia de la posición radial de la conexión de salida.

El diseño de las camas de adsorción se realizó bajo los lineamientos definidos en ASME VIII Div. 1, estándar internacional utilizado para diseño, construcción e inspección de tanques y recipientes a presión.

Los datos de entrada utilizados para el diseño fueron los siguientes:

- Materiales:
  - Casquetes: ASTM SA-240 Gr 304 L
  - Envoltente: ASTM SA-240 Gr 304 L
- Tipo de Casquetes: Elípticos relación 2:1
- Presiones
  - Diseño: 10 Kg/cm<sup>2</sup> (142 PSI)
  - Operación: 8.5 Kg/cm<sup>2</sup> (120 PSI)
  - MAWP: 10 Kg/cm<sup>2</sup> (142 PSI)

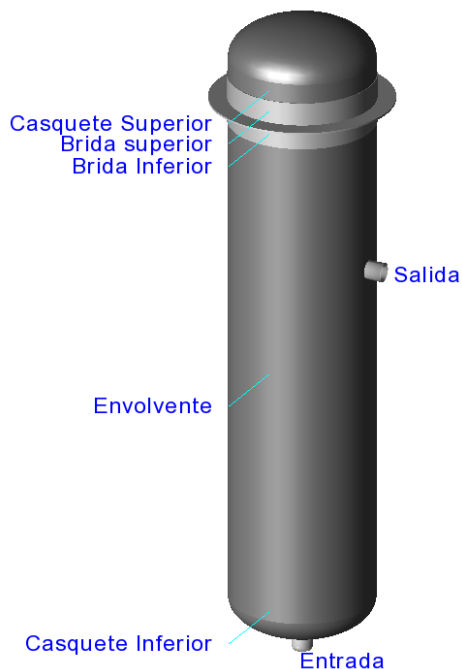


Figura 8-8 Esquema 3D de la cama de adsorción N°1

- Conexiones: Threadolet
- Temperaturas
  - Diseño: 100 °C (212°F)
  - Operación: 26 °C (80°F)
  - MDMT: -29°C (-20 °F)
- Diámetro: 0.45 m (18 in)
- Altura de envoltorio: 1.5 m (60 in o 5 ft)
- Espesor nominal
  - Casquetes: 4,76 mm (3/16 in)
  - Envoltorio: 4,76 mm (3/16 in)

La memoria de cálculo para el diseño de la cama de adsorción N°1 se presenta en el Apéndice A. Cabe recordar que el diseño de la cama de adsorción N°2 es análoga a la presentada para la cama N°1.

Los resultados obtenidos a partir del diseño de las camas de adsorción son los siguientes:

- Espesores requeridos por presión interna

- Casquetes: 2.4 mm (0.094 in)
- Envoltente: 2.4 mm (0.094 in)

Con lo cual, los espesores seleccionados para las camas de adsorción son mayores que los mínimos requeridos por presión interna, lo cual cumple con la norma referida.

En el apéndice D se muestra el plano constructivo de una de las camas de adsorción.

### 8.1.6.2 Análisis de fatiga

El código ASME VIII Div. 2 define fatiga como “condiciones que conducen a fracturas bajo tensiones repetidas o fluctuantes que tienen un valor máximo menor que la resistencia a la tracción del material”. El daño por fatiga en un metal es un cambio estructural progresivo, localizado y permanente.

Según Harvey<sup>5</sup>, el factor importante es la cantidad de repeticiones de estrés, no el tiempo de servicio. La fatiga en los metales es una progresión que comienza con cambios sub-microscópicos en la estructura del grano del metal, y consta de tres etapas principales: iniciación de grietas, propagación de grietas y ruptura. Una vez que se inicia una grieta, la grieta crece una cantidad finita con cada ciclo de tensión hasta que el área de la sección transversal restante es tan pequeña que ocurre la ruptura. Enderezar un clip y doblarlo hacia adelante y hacia atrás alrededor de un punto hasta que la falla sea un ejemplo común de fatiga.

Un recipiente bajo las condiciones planteadas en este proyecto está sujeto a cargas cíclicas de presurización y despresurización, lo cual puede llevar a que se produzca fatiga en el material.

---

<sup>5</sup> Fuente: Harvey, John F. Theory and Design of Modern Pressure Vessels. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1974.

De acuerdo al código ASME VIII Div.2 “Reglas alternativas para el diseño y construcción de recipientes a presión” sección 5.5 “Protección contra fallas por cargas cíclicas”, párrafo 5.5.2.2, si existiesen experiencias exitosas sobre un equipo comparable bajo condiciones similares que opere durante un tiempo suficiente, puede inferirse que no es necesario realizar un análisis de fatiga como parte del diseño del recipiente.

Para lo cual, se mostrará el caso de un sistema de generación de nitrógeno que opera actualmente en la planta de fraccionamiento ubicada en la ciudad de Bahía Blanca operada por la compañía MEGA S.A. Este sistema, análogo al planteado en este proyecto, pero para la generación de nitrógeno, cuenta con dos recipientes a presión de características muy similares a los diseñados anteriormente.



A continuación, se muestra una tabla comparativa entre los dos equipos:

<b>Identificación</b>	<b>Recipiente O<sub>2</sub> propio</b>	<b>Recipiente N<sub>2</sub> Mega</b>
TAG	V-03 o V-04	SC 250-20/142
Código de diseño	ASME VIII Div. 1	ASME VIII Div. 1
Material	ASTM SA-240 Gr 304L	IRAM IAS F-24
Tensión admisible	1733 Kg/cm <sup>2</sup>	1167 Kg/cm <sup>2</sup>
Presión de diseño	10 Kg/cm <sup>2</sup>	10 Kg/cm <sup>2</sup>
Temperatura de diseño	100°C	80°C
Presión operación	8,5 Kg/cm <sup>2</sup>	6 Kg/cm <sup>2</sup>
Temperatura operación	26°C	50°C
Diámetro exterior	450 mm	420 mm
Longitud envolvente	1500 mm	1200 mm
Tipo cabezales	Elípticos 2:1	Toriférico
Espesor envolvente	4,76 mm	4,76 mm
Espesor Cabezales	4,76 mm	4,76 mm
Disposición	Vertical	Vertical
Volumen	239 lts	250 lts
Fluido a contener	Aire	Aire
Tiempo de ciclo	120 seg	114 seg
Ciclos en 5 años	1.314.000	1.383.350

*Tabla 8-1 Comparación entre recipientes*

Al comparar ambos recipientes se puede evidenciar que son muy similares en cuanto a su diseño y condiciones de operación, y que para un periodo de 5 años la cantidad de ciclos de presurización y despresurización son prácticamente iguales.

Por estas razones se puede inferir que, si el equipo en operación de MEGA no tuvo indicios de fatiga por cargas cíclicas, el diseñado en este proyecto tampoco presentará este tipo de falla, de acuerdo con lo que afirma el código ASME VIII Div.2.



### 8.1.7 Pulmones de Almacenamiento

Para el correcto funcionamiento del sistema de separación es necesario contar con tres pulmones de almacenamiento, uno de aire comprimido y otro de aire seco, ambos aguas arriba de las camas de adsorción y otro de oxígeno aguas debajo de las camas.

Las condiciones de diseño son las mismas que las planteadas para las camas de adsorción. La diferencia radica en el tamaño de los mismos.

#### Dimensiones

- Diámetro: 0.762 m (32 in)
- Altura: 1.5 m (60 in o 5 ft)

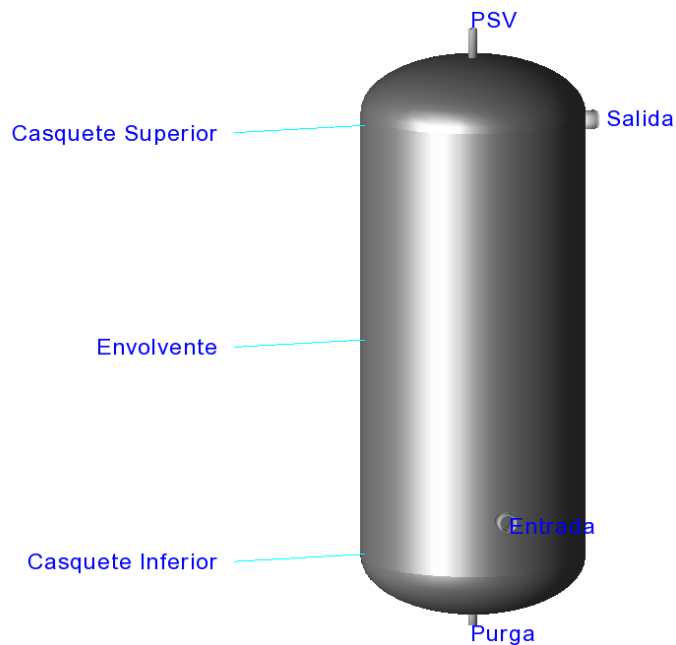


Figura 8-10 Esquema 3D del pulmón de aire

Los resultados obtenidos a partir del diseño de las camas de adsorción son los siguientes

- Espesores requeridos por presión interna
  - Casquetes: 4 mm (0.157 in)
  - Envolverte: 4 mm (0.157 in)

Las dimensiones del equipo se definieron en base a los materiales comercialmente disponibles, seleccionando así diámetros y espesores estándar en la industria.

La memoria de cálculo para el diseño de los tanques de almacenamiento se presenta en el Apéndice B.

De acuerdo al diseño se seleccionan 3 tanques con las siguientes características:

Fabricante	Hanson Tank
Código de Diseño	ASME VII Div.1
Presión de diseño	13,8 Kg/cm <sup>2</sup>
Temperatura de diseño	93°C
Material	SA-240 Gr 304
Espesor envolvente	3/16" (4,76 mm)
Espesor Casquete	3/16" (4,76 mm)
Tipo casquete	Elíptico 2:1

El plano constructivo de dicho recipiente puede visualizarse en el Apéndice E.

### 8.1.8 Válvulas

**Reguladora:** Se utilizarán tres válvulas reguladoras, una a la salida del compresor (C-01), la otra entre el pulmón de aire seco (V-02) y las camas de adsorción y la tercera a la entrada del pulmón de oxígeno. Sirve para regular y la presión.

**Solenoides:** Se utilizarán 7 válvulas electrónicamente controladas. Ellas se ubicarán según el esquema mostrado en el Apéndice D. Son propias del ciclo PSA y se activan o desactivan a través del sistema de control propio del sistema PSA.

**Retención con resorte:** Se utilizará 1 válvula de retención con resorte. Ella se ubica entre el pulmón de aire seco (V-02) y las camas de adsorción según el esquema mostrado en el Apéndice D.

De alivio: Se utilizará una válvula de alivio en cada uno de los pulmones de aire, protegiendo así a los equipos en caso de sobrepresiones.

Bloqueo: Se utilizarán válvulas de bloqueo antes y después de cada componente, su función es aislar cada componente del resto del sistema en caso de averías o reemplazo de componentes.

### **8.1.9 Tuberías y accesorios**

#### **8.1.9.1 Tuberías:**

La funcionalidad y diseño estructural de un sistema de tuberías, están íntimamente relacionados. El comportamiento estructural variado que presentan los sistemas de tuberías, son debido a los efectos de: temperatura, presión, peso propio, excitaciones inducidas por los equipos a que se conecta, viento, sismo, etc., a los cuales es sometida la tubería. Una etapa necesaria dentro del diseño estructural, es el análisis estructural que, para los efectos antes mencionados, es nombrado usualmente como “Análisis de Flexibilidad de Tuberías” o “Análisis de Esfuerzos de Tuberías”.

Para el diseño integral de cañerías del sistema se respetaron los siguientes lineamientos establecidos en las normas ASME B31.1 (Código ASME para tuberías de plantas industriales) y B31.3 – Código ASME para tuberías sometidas a presión:

1. Establecimiento de las condiciones de diseño incluyendo presión, temperaturas y otras condiciones, tales como la velocidad del viento, movimientos sísmicos, choques de fluido, gradientes térmicos y número de ciclos de varias cargas.
2. Determinación del diámetro de la tubería utilizando las condiciones del proceso (presión, caudal, temperatura, etc.) y el concepto de pérdida de carga.
3. Selección de los materiales de la tubería en base a corrosión, fragilización y resistencia.
4. Selección de las clases de “rating” de bridas y válvulas.

5. Cálculo del espesor mínimo de pared (Schedule) para las temperaturas y presiones de diseño, de manera que la tubería sea capaz de soportar los esfuerzos tangenciales producidos por la presión del fluido.

6. Análisis estructural de sistemas de tuberías.

7. Resumen de material comercial seleccionado.

### 1. Condiciones de diseño:

• Caudal del fluido (aire)	166,66 l/s
• Diámetro interior de cañerías (a comprobar por diseño)	40 mm
• Presión de trabajo	10 bar (145,04 psi)
• Presión de diseño	12,07 bar ( 175,04 psi)
• Presión de aspiración (compresor)	1 bar (14,5 psi)
• Temperatura de diseño	20 °C

### 2. Determinación de diámetro de cañerías mediante Pérdida de carga.

Las unidades de depuración y la red de tuberías que distribuyen el aire comprimido por toda la planta junto con los acoplamientos rápidos, filtros, mangueras, conexiones, que impiden la transmisión total de la energía (presión) desde el compresor hasta la máquina. El objetivo del diseño es limitar estas pérdidas a unos valores relativamente pequeños y que sean admisibles en la práctica.

Las pérdidas que se convierten en calor, producen una caída de presión que, para una tubería recta se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$\Delta P = 450 \cdot \frac{q_c^{1.85} \cdot l}{d^5 \cdot p}$$

*Ecuación 8-1*

$\Delta P$ : caída de presión en bares.

$q_c$ : Caudal de aire en FAD en l/s

$d$ : diámetro interno de la tubería en mm

$l$ : longitud de la tubería en m

$p$ : presión absoluta inicial en bares o atmósferas

Como premisas iniciales para este cálculo se consideró lo siguiente:

- Caudal de aire ( $q_c$ ): 166,66 l/s
- Diámetro interior de cañerías ( $d$ ): 40 mm
- Presión inicial ( $p$ ): 10 bar

Como consideración general, la caída de presión total en una instalación neumática no debe superar el 2% de la presión de trabajo del compresor. Por lo tanto, en nuestro sistema la máxima caída de presión permisible será 0,2 bar.

Según la Ecuación 8-1 la pérdida de carga del sistema depende de la longitud de tramos de cañería. En el caso de accesorios, para poder incluir las pérdidas de carga generadas por estos se deben considerar sus longitudes equivalentes según la siguiente figura:

## Generador de Oxígeno para uso Hospitalario

Longitud equivalente en metros											
Componente	Diametro interior de la tubería en mm (d)										
	25	40	50	80	100	125	200	250	250	300	400
Válvula de bola totalmente abierta	0.3 5	0.5 8	0.6 10	1.0 16	1.3 20	1.6 25	1.9 30	2.6 40	3.2 50	3.9 60	5.2 80
Válvula de diafragma totalmente abierta	1.5	2.5	3.0	4.5	6	8	10	-	-	-	-
Válvula angular totalmente abierta	4	6	7	12	15	18	22	30	36	-	-
Válvula de globo	7.5	12	15	24	30	38	45	60	-	-	-
Válvula antirretorno de clapeta	2.0	3.2	4.0	6.4	8.0	10	12	16	20	24	32
Codo R = 2d	0.3	0.5	0.6	1.0	1.2	1.5	1.8	2.4	3.0	3.6	4.8
Codo R = d	0.4	0.6	0.8	1.3	1.6	2.0	2.4	3.2	4.0	4.8	6.4
Ángulo 90°	1.5	2.4	3.0	4.5	6.0	7.5	9	12	15	18	24
Te, salida en línea	0.3	0.4	1.0	1.6	2.0	2.5	3	4	5	6	8
Te, salida angular	1.5	2.4	3.0	4.8	6.0	7.5	9	12	15	18	24
Reductor	0.5	0.7	1.0	2.0	2.5	3.1	3.6	4.8	6.0	7.2	9.6

Figura 8-11- Longitudes equivalentes para accesorios de cañerías neumáticas.

Según plano de planta incluido en ANEXO y Figura 8-11 se obtuvieron las siguientes cantidades de accesorios y longitudes equivalentes:

Accesorio	Cantidad	Longitud equivalente [m]	TOTAL [m]
Codo	20	0,5	10
Tee salida lineal	6	0,4	2,4
Tee salida angular	1	2,4	2,4
Válvula esférica	15	0,5	7,5
válvula reguladora	2	12	24
Válvula de retención	1	3,2	3,2
Reductor	4	0,7	2,8
<b>TOTAL</b>			<b>52,3</b>

Para tramos lineales del sistema se registra una longitud total de 10 metros, por lo tanto:

LONGITUD EQUIVALENTE – SISTEMA PSA	
Ítem	Largo [m]
Tramos lineales	10
Accesorios	52,3
<b>TOTAL</b>	<b>62,3</b>

Se consideró un 10% adicional en la longitud calculada con motivo de cuantificar las posibles pérdidas existentes.

La pérdida de carga total resulta:

$$\Delta P = 450 \cdot \frac{166,66^{1,85} \cdot 68,53}{40^5 \cdot 10} = 0,38 \text{ bar}$$

*Ecuación 8-2 – Caída de presión condiciones iniciales de diseño.*

Este valor se encontró por encima del límite seleccionado (0,2 bares), por lo tanto, se modificó el diámetro de cañerías a una medida interior de 50 mm y se recalculó el valor de pérdida de carga para esta condición.

Considerando un diámetro interno de 50 mm se obtuvo:

Accesorio	Cantidad	Longitud equivalente [m]	TOTAL [m]
Codo	20	0,6	12
Tee salida lineal	6	1	6
Tee salida angular	1	3	3
Válvula esférica	15	0,6	9
válvula reguladora	2	15	30
Válvula de retención	1	4	4
Reductor	4	1	4
<b>TOTAL</b>			<b>68</b>

LONGITUD EQUIVALENTE – SISTEMA PSA	
Item	Largo [m]
Tramos lineales	10
Accesorios	68
<b>TOTAL</b>	<b>78</b>

*Se consideró un 10% adicional en la longitud calculada con motivo de cuantificar las posibles pérdidas existentes.*

$$\Delta P_{\text{con diámetro corregido}} = 450 \cdot \frac{166,66^{1,85} \cdot 85,8}{50^5 \cdot 10} = 0,14 \text{ bar}$$

Este nuevo valor de pérdida de carga, por debajo del límite establecido, permitió determinar el diámetro interno mínimo (40 mm) de cañerías requerido por el sistema.

Finalmente se adoptó para las cañerías que trabajaran sometidas a presión la siguiente:

- Diámetro nominal (comercial): 2 inadas.
- Diámetro interno: a determinar por cálculo de espesor de pared por presión interna.

### *3. Determinación del material:*

Se seleccionaron tuberías de acero inoxidable SA-240 Gr 304L, mismo material que los recipientes por ser apto para uso medicinal.

Este material tiene la particularidad de no generar residuos producto de la oxidación del acero en contacto con el fluido, logrando que el oxígeno a la salida del sistema sea lo más limpio y puro posible. Facilitando así el posterior filtrado y asegurando un producto apto para el uso hospitalario.

### *4. Selección de ratings para válvulas y bridas:*

Se utilizó la Norma ASME B.16.5 – “Pipe Flanges and Flanged Fittings: NPS 1/2 through NPS 24 Metric/Inch Standard” para seleccionar el rating de válvulas y bridas requerido.



**Table 2-2.3 Pressure–Temperature Ratings for Group 2.3 Materials**

Nominal Designation	Forgings		Castings		Plates			
16Cr–12Ni–2Mo	A 182 Gr. F316L				A 240 Gr. 316L			
18Cr–8Ni	A 182 Gr. F304L (1)				A 240 Gr. 304L (1)			
Working Pressures by Classes, bar								
Class	Temp., °C	150	300	400	600	900	1500	2500
	-29 to 38	15.9	41.4	55.2	82.7	124.1	206.8	344.7
	50	15.3	40.0	53.4	80.0	120.1	200.1	333.5
	100	13.3	34.8	46.4	69.6	104.4	173.9	289.9
	150	12.0	31.4	41.9	62.8	94.2	157.0	261.6
	200	11.2	29.2	38.9	58.3	87.5	145.8	243.0
	250	10.5	27.5	36.6	54.9	82.4	137.3	228.9
	300	10.0	26.1	34.8	52.1	78.2	130.3	217.2
	325	9.3	25.5	34.0	51.0	76.4	127.4	212.3
	350	8.4	25.1	33.4	50.1	75.2	125.4	208.9
	375	7.4	24.8	33.0	49.5	74.3	123.8	206.3
	400	6.5	24.3	32.4	48.6	72.9	121.5	202.5
	425	5.5	23.9	31.8	47.7	71.6	119.3	198.8
	450	4.6	23.4	31.2	46.8	70.2	117.1	195.1

NOTE:

(1) Not to be used over 425°C.

*Figura 8-12 – Ratings de presión para materiales del grupo 2.3 (Acero Gr 304 L)*

Según la Figura 8-12 correspondiente al acero seleccionado se observó que, para la temperatura esperada de trabajo (20°C), la CLASE 150 soporta sin inconvenientes la presión (12,07 bar) de diseño.

Se adoptó entonces para todas la bridas y válvulas el rating: **CLASE 150**.

### 5. Cálculo del espesor mínimo de pared (*t*).

Toda tubería que contenga un fluido a presión interna, está sometida a fuerzas de tensión, según sus secciones longitudinales y transversales, por tanto, las paredes han de resistir estas fuerzas para evitar que falle por presión.

Para determinar el espesor mínimo de pared requerido en tuberías, es necesario considerar la temperatura de diseño, erosión, corrosión y tolerancia de fabricación.

El Código ANSI B31 en su párrafo 304, presenta la forma para evaluar el espesor mínimo de pared que debe tener una tubería sometida a presión interna, este procedimiento solo es aplicable para tuberías que cumplan con las siguientes relaciones:

$$t < \frac{D}{6}$$

$$\frac{P}{SE} < 0,385$$

Ambas condiciones deberán comprobarse antes de dar por finalizado el diseño.

A continuación, se describen los pasos a seguir para poder determinar este espesor:

$$t = \frac{P \cdot D}{2 \cdot (SE + PY)}$$

*Ecuación 8-3 – Espesor mínimo de pared según ASME B31.1*

Donde:

P = Presión interna de diseño (lbs/in<sup>2</sup>).

D = Diámetro exterior de la tubería (in).

S = Esfuerzo máximo permisible a la temperatura de diseño (lbs/in<sup>2</sup>), (por Código ASME).

E = Factor de junta, Según tipo de junta (soldadura) tomará distintos valores, al plantear la utilización de tubo sin costura este factor resulta igual a uno (1).

Y = Factor de corrección (ver ...) en función del material.

Se tienen las siguientes ecuaciones:

$$tm = t + C$$

$$tn = tm + tf$$

$$tc \geq tn$$

Donde:

$t_m$  = Espesor mínimo requerido (in.).

$t$  = Espesor por presión (in.).

$C$  = Suma de las tolerancias por corrosión y erosión (in.).

$t_n$  = Espesor nominal (in.).

$t_f$  = Tolerancia de fabricación (ver Figura 8-13).

$t_c$  = Espesor comercial (in.).

Según la norma ASME B31.1 los diferentes valores que toma el factor “Y” dependen de la temperatura de servicio y el material de las cañerías según se observa a continuación:

MATERIAL	TEMPERATURA DE TRABAJO					
	≤ 482 °C	510 °C	538 °C	566 °C	593 °C	>621 °C
Acero Ferrítico	0.4	0.5	0.7	0.7	0.7	0.7
<b>Acero Austenítico</b>	<b>0.4</b>	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7
Otros Metales	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Hierro Fundido	0	-	-	-	-	-

Tabla 8-2 – Factor de corrección (Y).

En cuanto a la tolerancia de fabricación, es decir variaciones en el espesor de pared del tubo fabricado, la norma ASTM Designación A 450/A 450M - 92a. establece en la tabla ... los valores máximos de variación permitida.

**TABLA 2 Variaciones Permisibles en Espesor de Pared<sup>A</sup>**

Diámetro Externo, pulgadas [mm]	Espesor de Pared, %							
	0.095 [2.4] y menos	más de 0.095 hasta 0.150 [2.4 a 3.8], incl.	más de 0.150 hasta 0.180 [3.8 a 4.6], incl.	más de 0.180 [4.6] y menos	más de 0.150 hasta 0.180 [3.8 a 4.6], incl.	más de 0.180 [4.6] y menos	más de 0.180 [4.6] y menos	más de 0.180 [4.6] y menos
<b>Tubos sin costura, terminados en caliente</b>								
4 [101.6] y menos	40	0	35	0	33	0	28	0
más de 4 [101.6]	...	...	35	0	33	0	28	0
<b>Tubos sin costura, terminados en frío</b>								
	más				menos			
1½ [38.1] y menos	20				0			
más de 1½ [38.1]	22				0			
<b>Tubos soldados</b>								
todos los tamaños	18				0			

<sup>A</sup> Estas variaciones permisibles en espesor de pared se aplican sólo a tubos, excepto tubos acortados internamente, tales como rolados o terminados en frío, y antes del estampado, expandido, doblado, pulido u otras operaciones de fabricación.

*Figura 8-13 - Variaciones permisibles en Espesor de Pared en tubos sin costura de aceros aleados según - ASTM Designación A 450/A 450M - 92a.*

*Algunas consideraciones de diseño:*

- Al tratarse de un tubo sin costura (junta) el factor de unión "E" tomará un valor igual a la unidad.
- Como se comentó para el caso de fabricación de recipientes a presión, se considerará un espesor de pared (c) relacionado con efectos de corrosión de 0,5 mm.
- Se parte de la suposición de cumplir con  $t < D/6$ .

Recordamos lo siguientes parámetros de diseño:

- Diámetro nominal (comercial): 2 pulgadas.
- Diámetro externo: 60,30 mm. (2,37 in.).
- Presión de diseño: 12,07 bar (175,04 psi)
- Material: Acero Inoxidable A304L – Grade: TP 304L.

En base a las condiciones de diseño y toda la información hasta aquí detallada se obtuvieron los siguientes valores de diseño:

$S = 16,7$  Ksi. Se obtiene de la figura ... extraída de la norma ASME B31.1

$E = 1$ . Por lo antes enunciado.

$Y = 0,4$ . Observar Tabla 8-2 extraída de la norma ASME B31.1

$C = 0,5$  mm.

# Generador de Oxígeno para uso Hospitalario

**TABLE A-1 (CONT'D)**  
**BASIC ALLOWABLE STRESSES IN TENSION FOR METALS<sup>1</sup>**  
 Numbers in Parentheses Refer to Notes for Appendix A Tables; Specifications Are ASTM Unless Otherwise Indicated

Material	Spec. No.	P-No. (5)	Grade	Notes	Min. Temp., °F (6)	Specified Min. Strength, ksi		Min. Temp.					
						Tensile	Yield	to 100	200	300	400	500	600
Stainless Steel (3) (4) Pipes and Tubes (2)													
18Cr-10Ni-Ti pipe smls > 3/8 in. thick	A 312	8	TP321	(30)(36)	-325	70	25	16.7	16.7	16.7	16.7	16.1	15.2
18Cr-10Ni-Ti pipe > 3/8 in. thick	A 376												
18Cr-8Ni tube	A 269	8	TP304L	(14) (36)	-425	70	25	16.7	16.7	16.7	15.8	14.8	14.0
18Cr-8Ni pipe	A 312	8	TP304L	...	-425								
Type 304L A 240	A 358	8	304L	(36)	-425								
16Cr-12Ni-2Mo tube	A 269	8	TP316L	(14) (36)	-325	70	25	16.7	16.7	16.7	15.5	14.4	13.5
16Cr-12Ni-2Mo pipe	A 312	8	TP316L	...	-325								
Type 316L A 240	A 358	8	316L	(36)	-325								
18Cr-10Ni-Ti pipe smls > 3/8 in. thick	A 312	8	TP321	(28)(30)(36)	-325	70	25	16.7	16.7	16.7	16.7	16.1	15.2
18Cr-10Ni-Ti pipe > 3/8 in. thick	A 376												
18Cr-10Ni-Ti pipe smls > 3/8 in. thick	A 312	8	TP321H	(30)(36)	-325	70	25	16.7	16.7	16.7	16.7	16.1	15.2
18Cr-10Ni-Ti pipe > 3/8 in. thick	A 376	8	TP321H	...	-325								
23Cr-13Ni	A 451	8	CPH8	(26) (28) (35)	-325	65	28	18.7	18.7	18.7	18.7	18.7	18.0
25Cr-20Ni	A 451	8	CPK20	(12) (28) (35) (39)	-325	65	28	18.7	18.7	18.7	18.7	18.7	18.0
11Cr-Ti tube	A 268	6	TP409	(35)	-20	60	30	20.0	...	...	...	...	...
18Cr-Ti tube	A 268	7	TP430Ti	(35) (49)	-20	60	40	20.0	...	...	...	...	...
15Cr-13Ni-2Mo-Cb	A 451	8	CPF10MC	(28)	-325	70	30	20.0	...	...	...	...	...
16Cr-8Ni-2Mo pipe	A 376	8	16-8-2H	(26) (31) (35)	-325	75	30	20.0	...	...	...	...	...

Figura 8-14 - Esfuerzo máximo permisible a la temperatura de diseño (lbs/in<sup>2</sup>).

Resulta entonces:

$$t = \frac{175,04 \text{ psi} \cdot 2,37 \text{ in}}{2 \cdot (16700 \text{ psi} \cdot 1 + 175,04 \text{ psi} \cdot 0,4)} = 0,012 \text{ in} = 0,31 \text{ mm}$$

$$tm = t + 0,5 \text{ mm} = 0,81 \text{ mm}$$

$$tn = tm + tf = 1,4 \cdot tm = 1,14 \text{ mm}$$

Por lo tanto, se adoptó un espesor comercial (tc), para el diámetro nominal (2 in) seleccionado, igual a 2,7 mm.

Este espesor corresponde a una designación de cañería SCH 10 tal cual se observa en la Figura 8-15.

CAÑERÍAS DE ACERO INOXIDABLE

CAÑERÍAS DE ACERO INOXIDABLE ASTM A312 GRADOS 304L Y 316L



Características

Cañerías con y sin costura fabricadas bajo norma ASTM A312.

Aplicaciones

Producto de uso Industrial, para la conducción de fluidos químicos o corrosivos. Es utilizado por la industria química, petroquímica, minera y de la celulosa, entre otras.

Colores



316 C/C 316 S/C 304 C/C 304 S/C

Composición Química

Grado	% C (máx.)	% Mn (máx.)	% Si (máx.)	% Ni	% Cr	% Mo	% P (máx.)	% S (máx.)
304L	0,035	2,00	1,00	8,00 - 11,00	18,00 - 20,00	-	0,045	0,03
316L	0,035	2,00	1,00	10,00 - 15,00	16,00 - 18,00	2,00 - 3,00	0,045	0,03

Diámetro Nominal(*)	Diámetro Exterior	SCH 10		SCH 40		SCH 80	
		Espesor de Pared	Peso Teórico	Espesor de Pared	Peso Teórico	Espesor de Pared	Peso Teórico
Pulgadas	mm	mm	Kg x mt	mm	Kg x mt	mm	Kg x mt
1/8"	10.28	1.24	0.28	1.73	0.36	2.41	0.47
1/4"	13.70	1.65	0.49	2.20	0.63	3.02	0.80
3/8"	17.14	1.65	0.63	2.31	0.84	3.20	1.10
1/2"	21.30	2.11	1.00	2.77	1.27	3.71	1.62
3/4"	26.67	2.11	1.28	2.87	1.68	3.91	2.19
1"	33.40	2.77	2.09	3.38	2.50	4.55	3.23
1 1/4"	42.20	2.77	2.69	3.56	3.38	4.85	4.46
1 1/2"	48.30	2.77	3.10	3.68	4.05	5.08	5.40
2"	60.30	2.77	3.93	3.91	5.44	5.54	7.47
2 1/2"	73.02	3.05	5.26	5.16	8.62	7.01	11.40
3"	88.90	3.05	6.45	5.49	11.27	7.62	15.25
3 1/2"	101.60	3.05	7.40	5.74	13.56	8.08	18.60
4"	114.30	3.05	8.35	6.02	16.06	8.56	22.29
5"	141.30	3.40	11.56	6.55	21.76	9.55	31.44
6"	168.30	3.40	13.80	7.11	28.23	10.97	45.52
8"	219.07	3.76	19.94	8.18	42.49	12.70	64.58
10"	273.05	4.19	27.83	9.27	60.24	12.70	81.47
12"	323.85	4.57	36.02	9.53	74.97	12.70	97.36

(\*) El diámetro nominal de la cañería no coincide con el diámetro interno ni externo.

Los valores de las tablas son referenciales.

Figura 8-15 – Medidas comerciales de cañería seleccionada.

Comprobamos finalmente que:

$$tc = 2,7 \text{ mm} \geq tn = 1,14 \text{ mm}$$

$$t = 2,7 \text{ mm} < \frac{D}{6} = 10,05 \text{ mm}$$

$$\frac{P}{SE} = \frac{175,04 \text{ psi}}{16700 \text{ psi} \cdot 1} = 0,01 < 0,385$$

La cañería seleccionada resulta:

- Diámetro nominal (comercial): 2 pulgadas.
- Espesor de pared = 2,7 mm. (0,106 in).
- Denominación por presión interna máxima: SCH 10.
- Material: Acero Inoxidable A304L – Grade: TP 304L.

### 6. Cálculo estructural de cañerías.

La norma ASME B.31.1 establece que el análisis estructural de sistemas de tuberías consta de tres etapas:

1) Análisis de Flexibilidades. Cuyo objeto es determinar las reacciones sobre apoyos, boquillas de equipos interconectados, así como las fuerzas internas y los desplazamientos a lo largo del trazo de la tubería. *Se propone la introducción de soportes en todos los puntos de flexión del sistema de cañerías con motivo de evitar la generación de estos esfuerzos. Por esto, se desestiman estos esfuerzos y sus efectos sobre las cañerías del equipo.*

2) Análisis de Esfuerzos. Cuyo objeto es obtener los esfuerzos resultantes a que están sujetos los diversos componentes de la tubería y de los equipos interconectados.

3) Fuerzas y Esfuerzos Permisibles. -Se comparan las fuerzas y esfuerzos actuantes con los valores permisibles que establecen los códigos o los fabricantes de los diversos equipos.



## ESFUERZOS PERMISIBLES

El efecto térmico en las tuberías, juega un papel muy importante en toda planta industrial, por lo tanto, es lógico pensar que los esfuerzos por expansión térmica, representan el rango que van desde cero (cuando no hay deformaciones por efecto térmico), como son las condiciones en instalación, hasta un valor máximo de temperatura en operación normal. Cuando los esfuerzos son de magnitud considerada, estos producen una deformación de tipo plástica permanente, como resultado de una cadencia local térmica (creep), lo cual produce una reducción de esfuerzos que aparecen en sentido inverso a la condición en frío.

Basándose en lo anterior, el Código ANSI B 31, establece como límite de esfuerzos por expansión térmica el llamado “Rango de Esfuerzo permisibles SA”, definido por la ecuación:

$$SA = f \cdot (1,25 Sc + 0,25 Sh)$$

Donde:

SA = Esfuerzo Permissible (lbs/in<sup>2</sup>).

Sc = Esfuerzo básico permisible del material de la tubería a la temperatura ambiente (lbs/in<sup>2</sup>).

Sh = Esfuerzo básico permisible del material de la tubería a la temperatura de operación (lbs/in<sup>2</sup>).

f = Factor de reducción de esfuerzos por condiciones cíclicas.

El factor de reducción cíclica “f”, depende del número total de ciclos (N) a los que el sistema estará sujeto durante su vida útil y puede ser obtenido directamente de tabla, suministrada por el Código ANSI B31.3.

Número de ciclos (N)	Factor "f"
7,000 y menos	1
7,000 a 14,000	0.9
14,000 a 22,000	0.8
22,000 a 45,000	0.7
45,000 a 100,000	0.6
Arriba de 100,000	0.5

*Tabla 8-3 - Factor de reducción de esfuerzos ("f").*

Se estimó "N" considerando los siguientes postulados:

- Vida útil sin intervenciones de mantenimiento mayor = 5 años continuos.
- Tiempo de ciclo esperado: 120 segundos.

Por lo tanto, N alcanzará un valor aproximado de 1,314,000 ciclos.

Resumiendo:

- $N > 100,000$  por lo tanto:  $f = 0,5$
- Temperatura ambiente = 10 °C.
- Temperatura de trabajo = 20 °C.
- $S_c = S_h = 16,7$  Ksi. (Se obtuvieron utilizando los datos en la Figura 8-14 ).

Por lo tanto:

$$SA = 0,5. (1,25 S_c + 0,25 S_c) = 0,75 S_c = 12,525 \text{ k si}$$

## ESFUERZOS DEBIDOS A CONDICIONES DE CARGAS: SOSTENIDAS Y OCASIONALES.

Toda tubería durante su vida útil de operación, está sometida, además del efecto de la temperatura, a condiciones de carga que no varían con el tiempo y que son denominadas como cargas sostenidas, como es el caso de su propio peso, la presión, accesorios, etc. y a condiciones de carga ocasionales, como son: vientos, sismo, acción de válvulas, etc. los cuales producen esfuerzos y que son manejados en forma diferente a los de origen térmico.

El Código ANSI B31.3 establece como límite para este tipo de cargas lo siguiente:

### CARGAS SOSTENIDAS.

Para Cargas Sostenidas (peso propio de la tubería, presión, etc.), el código para tuberías establece lo siguiente.

$$S_l = S_{lp} + S_b \leq 1.0 S_h$$

$$S_b = \frac{M_b}{Z}$$

$$S_{lp} = \frac{P \cdot D}{4t}$$

Donde:

$S_l$  = Esfuerzo Longitudinal (lbs/in<sup>2</sup>).

$S_{lp}$  = Esfuerzo longitudinal por presión (lbs/in<sup>2</sup>).

$S_b$  = Esfuerzo flexionante por cargas sostenidas (lbs/in<sup>2</sup>). Estos esfuerzos se desestiman para nuestro caso de estudio.

$S_h$  = Esfuerzo permisible a la temperatura de operación (lbs/in<sup>2</sup>).

$M_b$  = Momento flector resultante producido por cargas sostenidas (lbs-in).

Z = Módulo de sección (in<sup>3</sup>).

P = Presión de diseño (lbs/in<sup>2</sup>).

D = Diámetro exterior de la tubería (in.).

t = Espesor de pared de la tubería (in.).

Considerando las condiciones de diseño resulta:

$$S_b \approx 0$$

Por lo tanto, se cumple lo siguiente:

$$S_l = S_{lp} + S_b = 977,3 \text{ psi} \leq 1.0 S_h = 16700 \text{ psi}$$

CARGAS SOSTENIDAS MÁS CARGAS OCASIONALES.

Para el caso de Cargas Sostenidas más Cargas Ocasionales (peso propio de la tubería, presión más viento, sismo, etc.), el código para tuberías estable lo siguiente:

$$S_{lp} + S_b + S_e \leq 1.33 S_h$$

Donde:

$$S_e = \frac{M_e}{Z} \approx 0$$

$$S_{lp} = \frac{P \cdot D}{4t}$$

$S_e$  = Esfuerzo flexionante por cargas ocasionales (lbs/in<sup>2</sup>). *Se desestiman estos esfuerzos en nuestro diseño.*

$M_b$  = Momento flexionante resultante debido a las cargas ocasionales (lbs-in).

1.33 = Factor de incremento de esfuerzo permisible.

Cuando el esfuerzo permisible 1.33  $S_h$  es mayor a 2/3 del esfuerzo de fluencia ( $S_y$ ) del material a la temperatura de operación, la ecuación toma la forma:

$$S_{lp} + S_b + S_e \leq \frac{2}{3} S_y$$

En nuestro caso:

$$S_y = 25000 \text{ psi}$$

$$S_h = 16700 \text{ psi}$$

$$\frac{2}{3} S_y = 16666 \text{ psi}$$

$$1.33 S_h = 22211 \text{ psi}$$

$$1.33 S_h > \frac{2}{3} S_y$$

En consecuencia, debemos utilizar la ecuación modificada:

$$S_{lp} + S_b + S_e = 977,3 \text{ psi} + 0 + 0 \leq \frac{2}{3} S_y = 16666 \text{ psi}$$

Observamos que los esfuerzos considerados, comprobaron efectivamente la ecuación de diseño anterior.

#### ESFUERZOS ADITIVOS.

Según el Código ANSI B 31.1 para tuberías sujetas a presión se establece que cuando los esfuerzos por presión, peso, y cargas sostenidas (SL), son menores al esfuerzo básico permisible del material  $S_h$  el rango de esfuerzos permisibles (SA) del material, se ve incrementado por la diferencia  $f(S_h - SL)$  llamado "Esfuerzo Aditivo".

De esta forma, la ecuación de esfuerzos permisibles se transforma en:

$$SA = f \cdot [1,25 \cdot (S_c + S_h) - S_l] = 0,5 \cdot [2,5 \cdot S_h - S_l]$$

Donde:

$S_c$  = Esfuerzo básico permisible del material de la tubería a la temperatura ambiente (lbs/in<sup>2</sup>).

$S_h$  = Esfuerzo básico permisible del material de la tubería a la temperatura de operación (lbs/in<sup>2</sup>).

$S_L$  = Esfuerzo Longitudinal provocado por cargas sostenidas (lbs/in<sup>2</sup>).

Recordamos que:

$S_h = 16700 \text{ psi}$

$S_c = 16700 \text{ psi}$

$S_l = 977,3 \text{ psi}$

Entonces:

$$SA = 0,5 \cdot (2,5 \cdot 16700 \text{ psi} - 977,3 \text{ psi}) = 20386,35 \text{ psi}$$

#### 8.1.9.2 Cañería Auxiliar (drenajes).

Se selecciona un diámetro nominal de 0,5 in – SCH 10 para cañerías auxiliares (drenajes). Las mismas serán construidas en material acero inoxidable SA-240 Gr 304L.

#### 8.1.9.3 Accesorios

Es necesario contar con ciertos accesorios de tuberías para poder realizar las conexiones necesarias entre los equipos. Dichos accesorios se seleccionaron del mismo material que las tuberías, acero inoxidable SA-240 Gr 304L. Dichos accesorios son tees, codos y cuplas. Todos los accesorios serán de clase serie 4000.

El resumen general de tipos y cantidades accesorios puede hallarse en la sección 8.1.9.1.

## 8.2 Variantes y Mejoras

### 8.2.1 Sistema de llenado de garrafas para venta individual

Esta posibilidad de mejora involucra un sistema de llenado de garras para su posterior venta. Actualmente el sistema acumula el producto (oxígeno) en un tanque y es posible comercializarlo a granel. Con esta mejora, se incorpora la posibilidad de aumentar la oferta de oxígeno por medio de una segunda forma de entrega del mismo. Para ello es necesario contar con un sistema de compresión y almacenamiento que esta integrado por un compresor a piston libre de aceite, un rack de garrafas y las tuberías y accesorios necesarios para conectar dichos componentes.

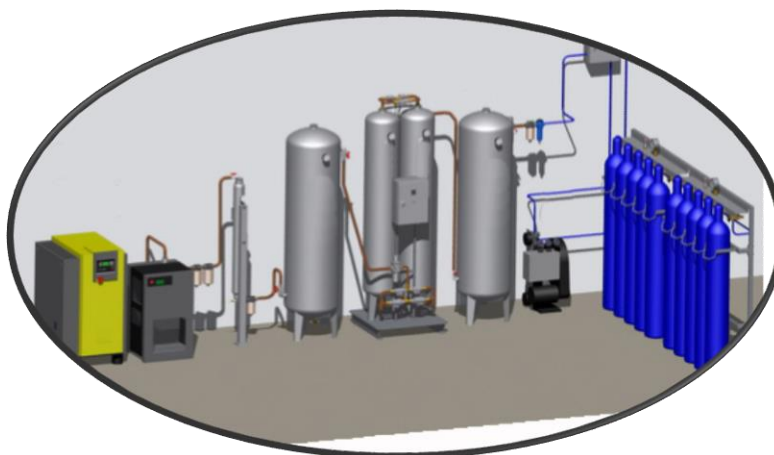


Figura 8-16 Esquema de un sistema PSA con llenado de garrafas

### 8.2.2 Almacenamiento de nitrógeno

De acuerdo a la actual configuración del sistema, el nitrógeno es considerado como desecho y es venteado a la atmósfera en las etapas de escape y purga. Esta mejora plantea la incorporación de un tanque adicional para la acumulación de nitrógeno como subproducto del sistema.

Los costos asociados a esta mejora se deberían comparar frente a las ganancias asociadas a la venta del nitrógeno acumulado, para definir si la mejora es rentable o no.

### **8.2.3 Licuefacción del oxígeno producido**

Otra posibilidad de mejora plantea comprimir suficientemente el oxígeno producido para almacenarlo en estado líquido. Con esto se lograría almacenar una mayor cantidad de producto en un menor volumen de almacenamiento.

Solo sería necesario un mayor trabajo de compresión, es decir, un segundo compresor (a pistón), y tanques aptos para el almacenamiento de oxígeno líquido a alta presión.



## 9 Estudio de viabilidad económica

El presente estudio tiene como objetivo analizar la viabilidad económica del proceso de adsorción por variación de presión.

Algunas consideraciones a tener en cuenta para el seguimiento del estudio son las planteadas a continuación.

- Los servicios necesarios para la operación de la planta se calculan de forma aproximada en base a los datos disponibles en la bibliografía o mediante consultas electrónicas y que aportan unas cifras orientativas que, no obstante, como meras estimaciones que son, cuentan con un amplio margen de error.

- Para realizar el presupuesto de los equipos seleccionados se ha consultado su cotización a los fabricantes. Se ha obtenido respuesta solamente de unos pocos, por lo que ha sido necesario realizar una estimación del coste del resto de los equipos tomando como referencia datos externos de otros equipos con características parecidas.

- Los valores de las distintas partidas que componen los costes se presentan en base a la producción anual (USD/año)<sup>6</sup> y en base a la unidad de producción (USD/m<sup>3</sup>), calculadas empleando el valor correspondiente a la producción anual de oxígeno puro en condiciones normales, 119.136 m<sup>3</sup>, calculado en la sección 9.4.1.3 Ingresos Ordinarios.

### 9.1 Presupuesto

A continuación, se detalla el presupuesto de los equipos necesarios para realizar el proceso de separación del oxígeno del aire atmosférico.

---

<sup>6</sup> Para los cálculos posteriores se utilizará la cotización del dólar del Banco Central de la Nación Argentina al día 27/9/19 que es de 59 pesos por cada dólar estadounidense.

<b>Ítem</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo unitario U\$D</b>	<b>Costo Total U\$D</b>
Compresor de aire	1	23.790	23.790
Filtro de líquidos	1	255	255
Filtro coalescente	1	255	255
Filtro de carbón activado	1	373	373
Secador	1	8.000	8.000
Filtro de partículas	1	415	373
Filtro bacteriológico	1	415	415
Pulmones	3	8.020	24.060
Purgador electrónico	1	220	220
Separador agua y aceite	1	1500	1500
Equipo PSA	1	86.000	86.000
<b>Total</b>			<b>145.241</b>

Tabla 9-1 Costos de equipos

## 9.2 Estimación de costos

### 9.2.1 Estimación de la inversión

#### 9.2.1.1 Capital fijo o inmovilizado

El capital fijo se estima mediante los porcentajes establecidos por el método de Peter & Timmerhaus, que se basa en el coste de entrega DEL del equipo. Sabiendo que el coste de compra FOB (Free On Board) de los equipos es el coste total detallado en el apartado anterior, 145.241 U\$D, se calcula el coste DEL, que representa entre 1,1 y 1,25 veces el coste FOB, tomando el valor medio del intervalo para el cálculo.

$$C_{DEL} = 1,175 \times C_{FOB} = 1,175 \times 145.241 \text{ U\$D} = 170.658 \text{ U\$D}$$

La planta opera con fluidos y en función a ello se aplican unos factores determinados para calcular los distintos costes en función del valor del equipo. A continuación, se muestran en la Tabla 9-2 los factores y costes correspondientes.

<b>Planta de fluidos</b>		
<b>Concepto</b>	<b>Porcentaje del valor del equipo</b>	<b>Costo [U\$D]</b>

<b>COSTOS DIRECTOS</b>		
Valor del Equipos DEL		170.658
Instalación del equipo	47	80.209
Instrumentación (instalada)	18	30.718
Tuberías (instaladas)	66	112.634
Electricidad (instalada)	11	18.772
Edificios (incluidos servicios)	18	30.718
Mejoras en el terreno	10	17.065
Servicios instalados	70	119.460
Terreno si se requiere su compra	6	10.239
<b>Total Costos Directos</b>	<b>346</b>	<b>590.473</b>
<b>COSTOS INDIRECTOS</b>		
Ingeniería y supervisión	33	56.317
Gastos de construcción	41	69.969
<b>Total Costos Indirectos</b>	<b>74</b>	<b>126.286</b>
<b>Total Costos Directos e Indirectos</b>	<b>420</b>	<b>716.759</b>

*Tabla 9-2 Estimación del capital mediante los factores de Peter & Timmerhaus*

### 9.2.1.2 Capital circulante

El capital circulante se define en este caso como el capital necesario para cubrir los costes de producción de un año completo según la expresión siguiente.

$$I_W = C_F + C_V$$

Los costes fijos y los costes variables que se aplican en los cálculos mostrados a continuación se obtienen más adelante, en la sección 9.4.1.3 Ingresos Ordinarios, una vez estimado el coste total del producto.

$$C_F = 216.805 \text{ U\$D/año} \cdot 1 \text{ año}/119.136 \text{ m}^3/\text{año} = 1,182 \text{ U\$D/m}^3$$

$$C_V = 173.514 \text{ U\$D/año} \cdot 1 \text{ año}/119.136 \text{ m}^3/\text{año} = 1,456 \text{ U\$D/m}^3$$

$$I_W = 216.805 \text{ U\$D/año} + 173.514 \text{ U\$D/año} = 390.319 \text{ U\$D/año}$$

La inversión total, I, es la suma del Capital Fijo más el Capital Circulante.

$$I = 390.319 \text{ U\$D/año} + 716.759 \text{ U\$D/año} = 1.107.078 \text{ U\$D/año}$$

### 9.2.2 Estimación del costo de producción

El coste de producción se estima, en este caso, mediante el método de Peter & Timmerhaus.

## Generador de Oxígeno para uso Hospitalario

Para ello, es necesario conocer los costes referentes a las materias primas, los servicios y la mano de obra, que se detallan a continuación.

### 9.2.2.1 Materia prima

El coste de la materia prima es nulo, puesto que se trata de aire aspirado proveniente de la atmósfera.

### 9.2.2.2 Servicios

Los servicios requeridos son la electricidad para que los compresores generen la potencia total de 44,7 kW para comprimir un caudal de aire de 13,6 m<sup>3</sup> cada hora.

El precio de la electricidad en Argentina para usuarios no residenciales que contratan un suministro para potencias menores a 300 kW es de aproximadamente 1.852 \$/MWh, lo que da un costo de 0,031 U\$/kWh<sup>7</sup>. En total, el consumo anual de electricidad es de 44,7 kWh · 0,031 U\$/kWh · 24 h · 365 días = 1.438 U\$/año.

Servicios	Costo unitario	U\$/año	U\$/m <sup>3</sup> O <sub>2</sub>
Electricidad (kWh/día)	0,031 U\$/kWh	1.438 U\$/año	0,012

Tabla 9-3 Costo de los servicios para el 100% de la producción

### 9.2.2.3 Mano de obra

Para estimar la mano de obra se considera que las plantas químicas operan, generalmente, las 24 horas del día y los 7 días de la semana, por lo que el trabajo se divide en 3 turnos de 8 horas. Cada turno lo componen 2 operarios más un supervisor. Además, se considera un supervisor general para los 3 turnos y un cuarto operario extra para cubrir las necesidades de vacaciones, bajas y asuntos propios.

Según la legislación vigente la jornada máxima legal es de cuarenta horas y con unas vacaciones anuales mínimas de treinta días. Esto comporta

<sup>7</sup> Fuente: Ente Nacional Regulador de Electricidad (ENRE) Resolución 105/2019

aproximadamente 11 meses de trabajo al año, en lo que a convenios generales se refiere.

A continuación, se definen los niveles de especialización y responsabilidad requeridos para los diferentes trabajadores y su salario mínimo<sup>8</sup>.

**Operario Categoría A:** El personal comprendido en esta categoría es aquel que efectúa tareas en planta y/o secciones productivas, en procesos de fabricación o parte de él, que requiere conocimientos del proceso y experiencias necesarias adquiridas a través del trabajo realizado. A tal fin, deberán interpretar instrumentos de control y/o realizar análisis de rutina, pudiendo introducir modificaciones para la correcta marcha de las unidades operativas donde se desempeña. Esta categoría de empleado tiene un salario mínimo de 5,17 U\$/hora, lo que da un total de 9.926 U\$/año.

**Ingeniero semi-senior:** Funciones de integrar, coordinar y supervisar la ejecución de varias tareas con la responsabilidad de ordenar el trabajo de un conjunto de operarios. Su salario se estima en 7 U\$/hora según datos de la industria, dando un total de 13.000 U\$/año.

**Ingeniero senior:** Funciones que consisten en integrar, coordinar y supervisar la ejecución de tareas con la responsabilidad de ordenar el trabajo de un conjunto de colaboradores. Se incluye además la realización de tareas complejas que, aun sin implicar mando, exigen un alto contenido intelectual, así como aquellas que consisten en establecer o desarrollar programas o aplicar técnicas siguiendo instrucciones generales. Su salario se estima en 8.5 U\$/hora según datos de la industria, dando un total de 16.320 U\$/año.

<b>Grupo profesional</b>	<b>N° de trabajadores</b>	<b>Salario [U\$/año]</b>	<b>Salario total [U\$/año]</b>
Grupo 3	4	9.926	39.704

<sup>8</sup> Fuente: Federación Argentina de Trabajadores Industrias Química y Petroquímica, Convenio Colectivo 77/79

## Generador de Oxígeno para uso Hospitalario

Grupo 5	3	13.000	29.000
Grupo 6	1	16.320	16.320
<b>TOTAL</b>	<b>12</b>		<b>85.024</b>
<b>USD/m<sup>3</sup> O<sub>2</sub></b>			<b>0,71</b>

*Tabla 9-4 Costos de mano de obra para el 100% de la producción*

### 9.2.2.4 Costos de producción

Tomando en cuenta los costos anteriores, se obtiene el costo total anual y unitario de producción.

	Factores Promedio	USD/año	USD/m <sup>3</sup>
<b>A. COSTOS DE PRODUCCIÓN</b>			
<b>1. COSTOS DIRECTOS DE PRODUCCIÓN</b>			
1.1 Materia prima		0	0
1.2 Mano de Obra		85.024	0,713
1.3 Mano de obra de supervisión y oficinas	17,5% de la mano de obra	14.879	0,125
1.4 Servicios		1.438	0.012
1.5 Mantenimiento y reparaciones	2% del capital inmovilizado	14.335	0,120
1.6 Operaciones y abastecimiento	15% del costo de mantenimiento	2.150	0,018
1.7 Gastos de laboratorio	15% de la mano de obra	12.753	0,107
		<b>130.579</b>	<b>1,096</b>
<b>2. CARGOS FIJOS</b>			
2.1 Amortizaciones	10 % del capital inmovilizado	71.675	0,601
2.2 Impuestos locales	2,5% del capital inmovilizado	17.918	0,1150
2.3 Seguros	0,7 % del capital inmovilizado	5.017	0,042
		<b>94.610</b>	<b>0,794</b>
<b>3. COSTOS GENERALES DE LA PLANTA</b>			
Incluye salarios en general, servicios médicos, Seguridad y protección, restaurantes y distracciones, laboratorios, etc.	60 % del costo de mano de obra + el costo de supervisión + el coste de mantenimiento	80.228	0,673
		<b>80.228</b>	<b>0,673</b>
<b>B. GASTOS GENERALES</b>			
1 Costos de administración	15 % del costo de mano de obra + el costo de supervisión + el coste de mantenimiento	41.967	0,352
2 Costos de distribución y venta	11% Del costo total del producto	42.935	0,360
		<b>84.902</b>	<b>0,712</b>
<b>COSTO TOTAL DEL PRODUCTO</b>		<b>390.319</b>	<b>3,276</b>

### 9.3 Pagos de inversión

Son los pagos que se realizan inicialmente para ejecutar las obras e instalaciones, así como comprar los equipos. En este caso, todos los pagos se

llevan a cabo en el momento inicial y, por lo tanto, se reflejan como flujo negativo en el año cero de la vida útil de la planta.

## 9.4 Flujos ordinarios

### 9.4.1 Gastos ordinarios

Los gastos ordinarios son una serie de pagos, realizados cada año, con el fin de permitir el correcto funcionamiento de la planta.

#### 9.4.1.1 Costos fijos

Son pagos constantes que no están afectados por el proceso productivo y se corresponden con la suma de los siguientes términos.

$$\begin{aligned} C_F &= \text{Cargos fijos} + \text{Costos generales de la planta} + \text{Costos administrativos} \\ &= 94.610 + 80.228 + 41.967 = 216.805 \text{ U\$D/año} \end{aligned}$$

$$C_F = 1,182 \text{ U\$D/m}^3$$

#### 9.4.1.2 Costos variables

Son los gastos generados por el proceso y que, en consecuencia, se ven afectados por una variación en el volumen de producción. Los costes variables son la suma de los siguientes términos:

$$\begin{aligned} C_V &= \text{Costos directos de producción} + \text{Costos de distribución y venta} \\ &= 130.579 + 42.935 = 173.514 \text{ U\$D/año} \end{aligned}$$

$$C_V = 1,456 \text{ U\$D/m}^3$$

La suma de los costos fijos y los costos variables aporta la cantidad total de gastos ordinarios que se producen en el año y que ascienden a:

$$\text{Gastos ordinarios} = 216.805 + 173.514 = 390.319 \text{ U\$D/año}$$

$$\text{Gastos ordinarios} = 3,276 \text{ U\$D/m}^3$$



### 9.4.1.3 Ingresos Ordinarios

Los ingresos ordinarios son los debidos a la venta del producto final.

Se considera que la planta opera al 100% de su capacidad de producción, 13,6 m<sup>3</sup>/h de oxígeno puro (véase apartado Análisis del problema y Definición de la Capacidad), 24 horas al día, los 7 días de la semana, durante los 365 días del año. Por lo tanto, se producen

$$13,6 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 24 \text{ h/día} \cdot 365 \text{ días/año} = 119.136 \text{ m}^3/\text{año de oxígeno}$$

El precio de venta del producto viene determinado por la rentabilidad que se fije para el proyecto, el capital invertido, la producción, el coste de producción y los impuestos, según se refleja en la ecuación presentada a continuación.

$$i = \frac{CF}{\text{Capital invertido}} = \frac{Q \cdot (s - c) \cdot (1 - t)}{I}$$

Donde  $i$  es la rentabilidad (que se fija en un valor del 20%),  $Q$  es la producción (al 100%),  $s$  es el precio de venta,  $c$  es el costo de producción,  $t$  es la tasa impositiva, que se estima de 0,35 y  $I$  la suma total de capital invertido.

$$0,2 = \frac{119.136 \text{ m}^3/\text{año} \cdot (s - 3,276 \text{ U\$D}/\text{m}^3) \cdot (1 - 0.35)}{1.107.078 \text{ U\$D}/\text{año}}$$

El precio de venta unitario es de 6,13 U\\$D/m<sup>3</sup>

Por lo tanto, los ingresos ordinarios anuales se corresponden con

$$119.136 \text{ m}^3/\text{año} \cdot 6,13 \text{ U\$D}/\text{m}^3 = 730.928 \text{ U\$D}/\text{año}$$

## 9.5 Flujos extraordinarios

### 9.5.1 Vida útil

La vida útil del proceso es el número de años durante los cuales la inversión funciona y genera rendimientos positivos. Para la evaluación económica se considera una vida útil de la planta de 10 años.

### 9.5.2 Valores residuales

El valor residual es el valor final de un activo fijo después de su depreciación y amortización, es decir, al final de su vida útil. En este caso se puede estimar el valor residual de los equipos y de la obra civil e instalaciones.

$$\text{Inversión total} = I = 1.107.078 \text{ U\$D}$$

$$\text{Inversión de equipos} = I_E = 170.658 \text{ U\$D}$$

$$\% \text{ de equipos} = \frac{170.658 \text{ U\$D}}{1.107.078 \text{ U\$D}} * 100 = 15.4\%$$

En base a la estimación de coste del producto realizada, se sabe que los equipos representan un 15,4 % de la inversión total.

El valor residual de los inmovilizados se considera en todos los casos igual al 10 % de su valor inicial.

$$V_r = 0,1 * V_i$$

Valor residual de los equipos

$$\text{Valor inicial} = 0,154 * 170.658 \text{ U\$D} = 26.281 \text{ U\$D}$$

$$\text{Valor residual} = 0,1 * 26.281 \text{ U\$D} = 2.628 \text{ U\$D}$$

Valor residual de la obra civil e instalaciones

$$\text{Valor inicial} = (1 - 0,154) * 1.107.078 \text{ U\$D} = 936.587 \text{ U\$D}$$

$$\text{Valor residual} = 0,1 * 936.587 \text{ U\$D} = 93.658 \text{ U\$D}$$

### 9.5.3 Gastos extraordinarios

Los gastos extraordinarios son el resultado de la obsolescencia y la reposición de los equipos. En este caso no se contemplan gastos extraordinarios porque se establece la misma vida útil para la planta que para los equipos.

### 9.5.4 Ingresos extraordinarios

Se considera que en el último año de vida útil de la planta (año 10) se recupera tanto el valor residual de los equipos e instalaciones como el capital circulante.

$$\begin{aligned} \text{Ingresos extraordinarios} &= V_{r(eq)} + V_{r(inst)} + I_w = 2.628 + 93.658 + 390.319 \\ &= 486.605 \text{ U\$D} \end{aligned}$$

### 9.5.5 Beneficios brutos

En la siguiente tabla se muestran los ingresos y gastos, tanto ordinarios como extraordinarios, y los beneficios brutos que se espera conseguir de la producción de la planta.

Año	Inversión [U\$D]	Ingresos [U\$D]		Gastos [U\$D]	Beneficios brutos [U\$D]
		Ordinarios	Extraordinarios		
0	-1.107.708	730.928		-390.319	340.609
1		730.928		-390.319	340.609
2		730.928		-390.319	340.609
3		730.928		-390.319	340.609
4		730.928		-390.319	340.609
5		730.928		-390.319	340.609
6		730.928		-390.319	340.609
7		730.928		-390.319	340.609
8		730.928		-390.319	340.609
9		730.928		-390.319	340.609
10		730.928	486.605	-390.319	340.609

Tabla 9-5 Beneficios brutos

## 9.6 Evaluación financiera del proyecto

### 9.6.1 Amortización fiscal

Se emplea el método de amortización lineal (LU), que consiste en dividir la cuota amortizable en fracciones iguales durante la vida útil de la planta.

Las cantidades que se pueden amortizar son la inversión inicial de capital fijo, 716.759 U\$D y el valor residual de los equipos e instalaciones al venderlos al final de la vida útil, 2.628 U\$D + 93.658 U\$D = 96.286 U\$D.

$$\text{Cantidad a amortizar} = 716.759 \text{ U\$D} - 96.286 \text{ U\$D} = 620.473 \text{ U\$D}$$

$$\text{Cuota amortizable} = \frac{620.473 \text{ U\$D}}{10 \text{ años}} = 62.047 \text{ U\$D}$$

### 9.6.2 Impuestos

Los impuestos a tener en cuenta según el sistema tributario en argentina son los impuestos nacionales, provinciales y municipales.

A nivel nacional, los principales ingresos por recaudación de impuestos incluyen: Impuesto a las Ganancias, Impuesto al Valor Agregado, Impuesto a la Ganancia Mínima Presunta, Impuestos Especiales, Impuesto a los Bienes Personales e Impuesto sobre los Débitos y Créditos Bancarios y Otras Operatorias.

A nivel provincial, los impuestos son recaudados y administrados por los organismos fiscales de las provincias, trabajando bajo la directiva de los ministros de economía de cada provincia. Los principales impuestos provinciales son: Impuesto sobre los Ingresos Brutos, Impuesto al Sello e Impuesto a la Transferencia de Inmuebles.

Las municipalidades recaudan ingresos mediante tasas y contribuciones especiales.

- Impuestos Nacionales
  - Impuesto a las ganancias

La tasa impositiva aplicable a empresas y sucursales instaladas en este país es el 35% de los ingresos totales.

- Impuesto al valor agregado

El IVA es un impuesto aplicado al valor de los bienes y servicios en cada etapa del proceso de comercialización; sin embargo, a diferencia del impuesto sobre la venta, transferencias al gobierno y créditos por impuestos ya pagados ocurren cada vez que en un negocio, en la cadena de suministro, se compra un producto o servicio. El IVA general es del 21%

- Impuesto sobre los Débitos y Créditos Bancarios y Otras Operatorias

Las transacciones de crédito y débito en cuentas bancarias mantenidas por instituciones gobernadas por la Ley de Instituciones Financieras están sujetas a una tasa impositiva general del 0,6%. Además, a todas las transacciones de dinero se les cobra un impuesto del 1,2 % si son llevadas a cabo usando los sistemas de pago

que sustituyen el empleo de cuentas corrientes. Ciertas transacciones son cobradas a diferentes tasas y califican para exenciones específicas.

- Impuestos provinciales

Todas las provincias y la Ciudad de Buenos Aires aplican este Impuesto sobre los Ingresos Brutos. Ingreso obtenido por todas las empresas involucradas en actividades comerciales, industriales, agrícolas, financieras o profesionales. Este impuesto es percibido por cada transacción comercial y ningún crédito fiscal es obtenido por impuestos pagados durante los períodos precedentes. Las tasas dependen de la industria y el área, y van desde el 1.5% al 5%, aproximadamente. Los impuestos son pagados a lo largo del año con pagos mensuales o bimestrales, dependiendo de cada provincia. Algunas actividades primarias e industriales, sin embargo, disfrutan de ciertas exenciones.

- Impuestos Municipales

Los municipios cobran honorarios por varios servicios relacionados con la seguridad industrial, la higiene pública y la iluminación, por nombrar algunos; cálculo basado en variables como el ingreso público o parámetros fijos como el número de empleados, la capacidad de fuerza motriz y la potencia, entre otros. Se puede estimar en 1%.

Por tanto, la tasa total de impuestos que se aplica durante el funcionamiento de la planta es de  $t = 21\% + 0,6\% + 1,2\% + 5\% + 1\% = 28,8\%$

### 9.6.3 Flujos de caja

En la tabla que se muestra a continuación aparecen los flujos de caja que se generan durante la vida útil de la planta.

Año	Amortización [U\$D]	Beneficios [U\$D]	Impuestos [U\$D]	Flujo de Caja [U\$D]	Flujo de Caja Acumulado [U\$D]
0				-1.107.708	-1.107.708
1	627.473	286.864	82.616	204.248	-903.460
2	627.473	286.864	82.616	204.248	-699.212
3	627.473	286.864	82.616	204.248	-494.964
4	627.473	286.864	82.616	204.248	-290.716
5	627.473	286.864	82.616	204.248	-86.468
6	627.473	286.864	82.616	204.248	117.780
7	627.473	286.864	82.616	204.248	322.028
8	627.473	286.864	82.616	204.248	526.276
9	627.473	286.864	82.616	204.248	730.524
10	627.473	286.864	82.616	204.248	934.772
<b>TOTAL</b>	<b>6.274.730</b>	<b>2.868.640</b>		<b>934.772</b>	

Tabla 9-6 Flujo de caja

Donde:

$$\text{Beneficio} = \text{Amortización} - \text{Beneficio Bruto}$$

$$\text{Impuestos} = \text{Beneficio} * \text{Tasa impositiva}$$

$$\text{Flujo de caja} = \text{Beneficios} - \text{Impuestos}$$

#### 9.6.4 Índice de rentabilidad

Para realizar una evaluación de la rentabilidad se utilizan los parámetros definidos a continuación.

- Período de recuperación o Payback: número de años que transcurren entre el inicio de la operación del proceso hasta que la suma de los cobros actualizados se hace exactamente igual a la suma de los pagos actualizados. La inversión es más interesante cuanto más reducido sea su plazo de recuperación.

- Tasa de rentabilidad o R.O.I.: mide el rendimiento de una inversión para evaluar la eficiencia de los gastos que se realizan.

- V.A.N. (Valor Actual Neto): indica la ganancia o la rentabilidad neta generada por la operación del proceso. Es la diferencia final entre la inversión inicial y lo que la inversión devuelve con el tiempo. Cuando un proyecto tiene un V.A.N. mayor que cero, resulta viable para el interés elegido desde el punto de vista financiero.

- T.I.R. (Tasa Interna de Rendimiento): tipo de interés que haría que el V.A.N. fuera nulo. Para que la inversión sea rentable, este valor debe ser mayor al tipo de interés del mercado.

#### 9.6.4.1 Periodo de recuperación o Payback

Se obtiene a partir de la representación del CF acumulado vs. Años

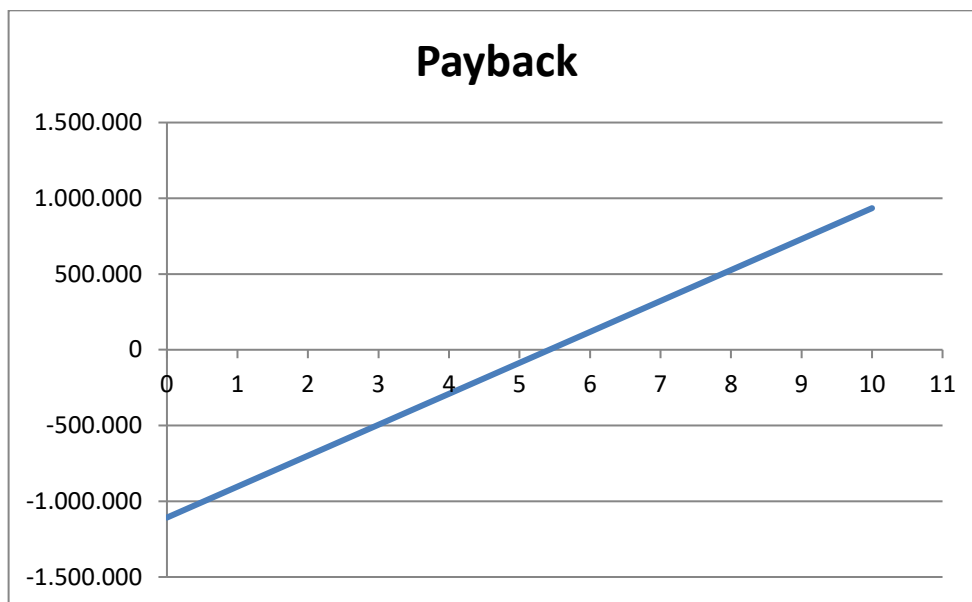


Figura 9-1 Periodo de recuperación

En este caso, el período de recuperación es de 5 a 6 años, lo cual indica un tiempo de recuperación muy extenso.

#### 9.6.4.2 Tasa de retorno de la inversión (ROI)

Es el cociente entre los beneficios medios, que se obtienen tras la aplicación de los impuestos y las amortizaciones, y el capital total medio invertido.



$$\text{Beneficios medios} = \frac{934.772 \text{ U\$D}}{10} = 93.477 \text{ U\$D}$$

$$\text{Capital total} = 1.107.708 \text{ U\$D}$$

$$\text{ROI} = \frac{93.477}{1.107.708} \cdot 100 = 8,44\%$$

El resultado se compara con la rentabilidad mínima establecida para el proceso de 20%. Al obtener un valor menor al establecido se considera que la inversión no es rentable.

#### 9.6.4.3 Valor actual neto (VAN) o Valor presente

Se calcula el valor actualizado de los ingresos y gastos futuros de una inversión descontando o actualizando los pagos y cobros a una tasa de descuento que permita traerlos a un valor presente.

Se utiliza la siguiente expresión

$$\text{VAN} = -I_0 + \frac{CF_1}{(1-i)^1} + \frac{CF_2}{(1-i)^2} + \dots + \frac{CF_n}{(1-i)^n}$$

Según el valor obtenido se puede concluir lo siguiente

VAN > 0: El valor actualizado de los cobros y pagos futuros de la inversión, a la tasa de descuento elegida generará beneficios.

VAN = 0: El proyecto de inversión no generará ni beneficios ni pérdidas, siendo su realización, en principio, indiferente.

VAN < 0: El proyecto de inversión generará pérdidas, por lo que deberá ser rechazado.

A continuación, se muestran los resultados del VAN para varios valores de interés de capital.

Interés de capital	VAN [U\\$D]
5%	587383
7%	444786

10%	265250
15%	35307
20%	-133462

Tabla 9-7 Valor actual neto

Se observa que las ganancias se reducen rápidamente, por lo que el beneficio real de la inversión en valores actuales es muy inferior a lo deseado. Sin embargo, el proyecto es viable hasta una tasa de interés de aproximadamente el 16%.

#### 9.6.4.4 Tasa interna de retorno (TIR)

La representación del V.A.N. frente a los diferentes tipos de interés refleja el punto de corte de la gráfica con el eje de las abscisas, tasa de interés (%), que se corresponde con la tasa interna de retorno para la que los ingresos actualizados se igualan a los gastos actualizados.

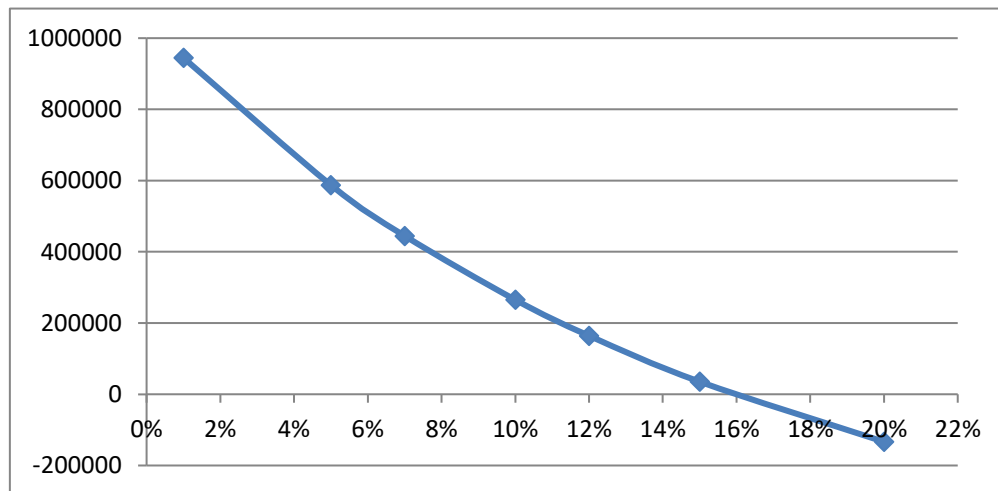


Figura 9-2 Tasa interna de retorno

En este caso, se obtiene una tasa T.I.R. del 16 %. Esto indica que para valores de interés inferiores a este valor es posible el retorno de la inversión.

Se concluye que la implantación de esta tecnología es viable, pero, en lo que a rentabilidad se refiere, sus resultados son inferiores a los esperados.

## 9.7 Comparación con la adquisición del oxígeno

El oxígeno se puede adquirir a granel o en tubos de diferentes volúmenes. El precio del metro cubico en tubo es de U\$D 80 y a granel de U\$D 45.

De acuerdo al análisis económico el costo de producción del oxígeno mediante el sistema diseñado es del 3,26 U\$D/m<sup>3</sup> según la sección 9.4.1.2 Costos variables. Este valor es considerablemente menor al de adquisición del oxígeno a granel.

Para comparar este valor con el de los tubos de oxígeno ya envasado, habría que considerar el costo de los tubos en sí, más el sistema de llenado de tubos, el cual constaría con por lo menos un compresor y su sistema de cañerías asociado.

De todas formas, se puede concluir que producir el oxígeno mediante el método PSA es mucho más económico que adquirirlo a granel o envasado.

## 10 Conclusiones

- Los componentes del aire pueden ser separados mediante distintos procesos.
- Mediante el proceso PSA es posible obtener oxígeno con una pureza determinada a partir de aire atmosférico.
- La pureza del producto obtenido depende de la presión, el material adsorbente y el tiempo de adsorción.
- Se pueden cubrir los picos de consumo de un establecimiento hospitalario (HIGA en este caso) mediante la generación de oxígeno a través del proceso PSA.
- Es posible realizar mejoras al proceso para el mejor aprovechamiento de los productos secundarios y para agregarle valor al producto primario.
- El tiempo de amortización de un sistema de las características planteadas esta entre los 5 y 6 años.
- La inversión no es rentable según la rentabilidad mínima considerada de 20%.
- El proyecto generará beneficios a una tasa de interés menor al 16%, para valores inferiores es posible el retorno de la inversión.
- El costo de adquisición de oxígeno es mayor que el de producción del mismo mediante el sistema PSA desarrollado.

## 11 Bibliografía

[1] McLean, Christopher Ross (1996). *Energy Efficiency of Gas Separation by Pressure Swing Adsorption*. University of British Columbia

[2] W. John Thomas and Barry Crittenden (1998). *Adsorption Technology and Design*. Butterworth-Heinemann

[3] Ruthven, Douglas M., Farooq Shamsuzzaman, Kent S. Knaebel (1994): *Pressure Swing Adsorption*

[4] Sanz De Juan, Abel (2012). *Diseño de Ciclos PSA para la captura de CO<sub>2</sub> de gases de combustión con adsorbentes comerciales*. Universidad Complutense de Madrid

[5] Moura Gonzalez, Luis Manuel (2009). *Creación de una empresa para suministro de oxígeno grado medicinal a hospitales del distrito federal*. Instituto Politécnico Nacional de Mexico DF.

[6] Smith, A.R. and J. Klosek (2000). *A review of air separation technologies and their integration with energy conversion processes*. Allentown USA

[7] Knaebel , Kent S. *A "How to" Guide for Adsorber Design*. Dublin Ohio

[8] Magalhaes Mendes, Adélio Miguel (1993). *Adsorcao com Modulacao da Pressao*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

[9] Anshul Agarwal (2010). *Advanced Strategies for Optimal Design and Operation of Pressure Swing Adsorption Processes*. Carnegie Mellon University Pittsburgh, PA

[10] Carlos A. Grande (2012). *Advances in Pressure Swing Adsorption for Gas Separation*. Blindern Oslo

[11] ShivajiSircar, Alan L. Myers. *Gas Separation by Zeolites*. Philadelphia, Pennsylvania, U.S.A

- [12] S. Jain, A.S. Moharir, P. Li, G. Wozny. *Heuristic design of pressure swing adsorption*. Indian Institute of Technology, Bombay India and Technische Universität Berlin, KWT9 Berlin, Germany
- [13] Blake Ashcraft and Jennifer Swenton (2007). *Oxygen Production with Silver Zeolites and Pressure Swing Adsorption*. University of Oklahoma
- [14] Mulholland, M., Latifi, M.A (2009). *Predictive Control of Pressure Swing Adsorption*. Slovak University of Technology in Bratislava
- [15] Código ASME Sección VIII Div. 1 Diseño, Construcción e Inspección de Tanques y Recipientes de Presión
- [16] Pellini, C., 2014. La atmósfera terrestre. Importancia composición del aire. Características. Disponible en la URL:  
[http://historiaybiografias.com/aire\\_agua03/](http://historiaybiografias.com/aire_agua03/)
- [17] ISO 8573-1:2010 Compressed Air Contaminantes And Purity Classes
- [18] <http://www.igs-italia.com/faq.html>
- [19] <http://www.premen.ru/es/content/air/>
- [20] Código ASME Sección VIII Div. 2 Reglas Alternativas para el Diseño, Construcción de Recipientes de Presión







ÍNDICE

H.I.G.A. .... 14

## **12 Dedicatoria**

Este trabajo final está dedicado a la familia y amigos que nos han acompañado todos estos años desde el inicio, siempre apoyando para que pueda dar fin a nuestras carreras como ingenieros.

**APENDICE A**

**Memoria de Cálculo**

**Cama de Adsorción N°1**

**PV Elite**

# Tabla de Contenidos

Cover Sheet .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Warnings and Errors : .....	3
Input Echo : .....	4
XY Coordinate Calculations : .....	11
Internal Pressure Calculations : .....	12
External Pressure Calculations : .....	18
Element and Detail Weights : .....	23
Nozzle Flange MAWP : .....	27
Center of Gravity Calculation : .....	28
Nozzle Calcs. : B.....	29
Nozzle Calcs. : C.....	34
Nozzle Calcs. : A.....	39
Nozzle Schedule : .....	48
Nozzle Summary : .....	50
MDMT Summary : .....	52
Vessel Design Summary : .....	54

Cama de Adsorción N°1

DESIGN CALCULATION

In Accordance with ASME Section VIII Division 1

ASME Code Version : 2013

Class From To : Basic Element Checks.

=====

Class From To: Check of Additional Element Data

=====

There were no geometry errors or warnings.

**PV Elite Vessel Analysis Program: Input Data**

Cama de Adsorción N°1

Design Internal Pressure (for Hydrotest)	215.00	psig
Design Internal Temperature	100	°F
Type of Hydrotest	not Specified	
Hydrotest Position	Vertical	
Projection of Nozzle from Vessel Top	0.0000	in.
Projection of Nozzle from Vessel Bottom	0.0000	in.
Minimum Design Metal Temperature	-20	°F
Type of Construction	Welded	
Special Service	Air/Water/Steam	
Degree of Radiography	RT 1	
Miscellaneous Weight Percent	0.0	
Use Higher Longitudinal Stresses (Flag)	Y	
Select t for Internal Pressure (Flag)	N	
Select t for External Pressure (Flag)	N	
Select t for Axial Stress (Flag)	N	
Select Location for Stiff. Rings (Flag)	N	
Consider Vortex Shedding	N	
Perform a Corroded Hydrotest	N	
Is this a Heat Exchanger	No	
User Defined Hydro. Press. (Used if > 0)	0.0000	psig
User defined MAWP	150.00	psig
User defined MAPnc	0.0000	psig
Load Case 1	NP+EW+WI+FW+BW	
Load Case 2	NP+EW+EE+FS+BS	
Load Case 3	NP+OW+WI+FW+BW	

Load Case 4		NP+OW+EQ+FS+BS	
Load Case 5		NP+HW+HI	
Load Case 6		NP+HW+HE	
Load Case 7		IP+OW+WI+FW+BW	
Load Case 8		IP+OW+EQ+FS+BS	
Load Case 9		EP+OW+WI+FW+BW	
Load Case 10		EP+OW+EQ+FS+BS	
Load Case 11		HP+HW+HI	
Load Case 12		HP+HW+HE	
Load Case 13		IP+WE+EW	
Load Case 14		IP+WF+CW	
Load Case 15		IP+VO+OW	
Load Case 16		IP+VE+EW	
Load Case 17		NP+VO+OW	
Load Case 18		FS+BS+IP+OW	
Load Case 19		FS+BS+EP+OW	
Wind Design Code		ASCE-7 93	
Basic Wind Speed	[V]	70.000	mile/hr
Surface Roughness Category		C: Open Terrain	
Importance Factor		1.0	
Type of Surface		Moderately Smooth	
Base Elevation		0.0000	ft.
Percent Wind for Hydrotest		33.0	
Using User defined Wind Press. Vs Elev.		N	
Damping Factor (Beta) for Wind (Ope)		0.0100	
Damping Factor (Beta) for Wind (Empty)		0.0000	
Damping Factor (Beta) for Wind (Filled)		0.0000	
Seismic Design Code		UBC 94	
UBC Seismic Zone (1=1,2=2a,3=2b,4=3,5=4)		0.000	
UBC Importance Factor		1.000	

UBC Soil Type	S1
UBC Horizontal Force Factor	3.000
UBC Percent Seismic for Hydrotest	0.000
Design Nozzle for Des. Press. + St. Head	Y
Consider MAP New and Cold in Noz. Design	N
Consider External Loads for Nozzle Des.	Y
Use ASME VIII-1 Appendix 1-9	N
Material Database Year	Current w/Addenda or Code Year

**Configuration Directives:**

Do not use Nozzle MDMT Interpretation VIII-1 01-37	No
Use Table G instead of exact equation for "A"	Yes
Shell Head Joints are Tapered	Yes
Compute "K" in corroded condition	Yes
Use Code Case 2286	No
Use the MAWP to compute the MDMT	Yes
Using Metric Material Databases, ASME II D	No

**Complete Listing of Vessel Elements and Details:**

Element From Node	10
Element To Node	20
Element Type	Elliptical
Description	Casquete Inferior
Distance "FROM" to "TO"	0.1667 ft.
Element Outside Diameter	20.000 in.
Element Thickness	0.3750 in.
Internal Corrosion Allowance	0.1250 in.



Nominal Thickness	0.3750 in.
External Corrosion Allowance	0.0000 in.
Design Internal Pressure	215.00 psig
Design Temperature Internal Pressure	100 °F
Design External Pressure	15.000 psig
Design Temperature External Pressure	100 °F
Effective Diameter Multiplier	1.2
Material Name	SA-240 304L
Allowable Stress, Ambient	16700. psi
Allowable Stress, Operating	16700. psi
Allowable Stress, Hydrotest	21710. psi
Material Density	0.2900 lb./in <sup>3</sup>
P Number Thickness	0.0000 in.
Yield Stress, Operating	25000. psi
External Pressure Chart Name	HA-3
UNS Number	S30403
Product Form	Plate
Efficiency, Longitudinal Seam	1.0
Efficiency, Circumferential Seam	1.0
Elliptical Head Factor	2.0
Element From Node	10
Detail Type	Nozzle
Detail ID	B
Dist. from "FROM" Node / Offset dist	0.0000 in.
Nozzle Diameter	2.0 in.
Nozzle Schedule	160
Nozzle Class	150
Layout Angle	0.0
Blind Flange (Y/N)	N
Weight of Nozzle ( Used if > 0 )	0.0000 lb.
Grade of Attached Flange	GR 2.1

Nozzle Matl

SA-240 304L

-----

Element From Node	20
Element To Node	30
Element Type	Cylinder
Description	Envolvente
Distance "FROM" to "TO"	5.0000 ft.
Element Outside Diameter	20.000 in.
Element Thickness	0.3750 in.
Internal Corrosion Allowance	0.1250 in.
Nominal Thickness	0.3750 in.
External Corrosion Allowance	0.0000 in.
Design Internal Pressure	215.00 psig
Design Temperature Internal Pressure	100 °F
Design External Pressure	15.000 psig
Design Temperature External Pressure	100 °F
Effective Diameter Multiplier	1.2
Material Name	SA-240 304L
Efficiency, Longitudinal Seam	1.0
Efficiency, Circumferential Seam	1.0

Element From Node	20
Detail Type	Nozzle
Detail ID	C
Dist. from "FROM" Node / Offset dist	3.5000 ft.
Nozzle Diameter	2.0 in.
Nozzle Schedule	160
Nozzle Class	150
Layout Angle	270.0
Blind Flange (Y/N)	N

Weight of Nozzle ( Used if > 0 )	0.0000 lb.
Grade of Attached Flange	GR 2.1
Nozzle Matl	SA-240 304L

-----

Element From Node	30
Element To Node	40
Element Type	Elliptical
Description	Casquete Superior
Distance "FROM" to "TO"	0.1667 ft.
Element Outside Diameter	20.000 in.
Element Thickness	0.3750 in.
Internal Corrosion Allowance	0.1250 in.
Nominal Thickness	0.3750 in.
External Corrosion Allowance	0.0000 in.
Design Internal Pressure	215.00 psig
Design Temperature Internal Pressure	100 °F
Design External Pressure	15.000 psig
Design Temperature External Pressure	100 °F
Effective Diameter Multiplier	1.2
Material Name	SA-240 304L
Efficiency, Longitudinal Seam	1.0
Efficiency, Circumferential Seam	1.0
Elliptical Head Factor	2.0

Element From Node	30
Detail Type	Nozzle
Detail ID	A
Dist. from "FROM" Node / Offset dist	0.0000 in.
Nozzle Diameter	10.0 in.
Nozzle Schedule	40

Nozzle Class	150
Layout Angle	0.0
Blind Flange (Y/N)	N
Weight of Nozzle ( Used if > 0 )	0.0000 lb.
Grade of Attached Flange	GR 2.1
Nozzle Matl	SA-240 304L

**XY Coordinate Calculations**

From	To	X (Horiz.) ft.	Y (Vert.) ft.	DX (Horiz.) ft.	DY (Vert.) ft.
-----					
Casquete I		...	0.16667	...	0.16667
Envolvente		...	5.16667	...	5.00000
Casquete S		...	5.33333	...	0.16667

**Element Thickness, Pressure, Diameter and Allowable Stress :**

	Int. Press	Nominal	Total Corr	Element	Allowable
From	To	+ Liq. Hd	Thickness	Diameter	Stress(SE)
	psig	in.	in.	in.	psi
Casquete I	215.000	0.37500	0.12500	20.0000	16700.0
Envolvente	215.000	0.37500	0.12500	20.0000	16700.0
Casquete S	215.000	0.37500	0.12500	20.0000	16700.0

**Element Required Thickness and MAWP :**

	Design	M.A.W.P.	M.A.P.	Minimum	Required
From	To	Corroded	New & Cold	Thickness	Thickness
	psig	psig	psig	in.	in.
Casquete I	215.000	421.717	648.124	0.37500	0.25016
Envolvente	215.000	421.717	635.787	0.37500	0.25308
Casquete S	215.000	421.717	648.124	0.37500	0.25016
Minimum		150.000	275.000		

*Note : The M.A.P. (NC) is Governed by a Flange !*

MAWP: 150.000 psig, limited by: DESIGN (user specified)

**Internal Pressure Calculation Results :**

**ASME Code, Section VIII, Division 1, 2013**

**Elliptical Head From 10 To 20 SA-240 304L at 100 °F**

## Casquete Inferior

Material UNS Number: S30403

Required Thickness due to Internal Pressure [tr]:

$$\begin{aligned}
 &= (P \cdot D_o \cdot K_{cor}) / (2 \cdot S \cdot E + 2 \cdot P \cdot (K_{cor} - 0.1)) \text{ per Appendix 1-4 (c)} \\
 &= (215.000 \cdot 20.0000 \cdot 0.983) / (2 \cdot 16700.00 \cdot 1.00 + 2 \cdot 215.000 \cdot (0.983 - 0.1)) \\
 &= 0.1252 + 0.1250 = 0.2502 \text{ in.}
 \end{aligned}$$

Max. Allowable Working Pressure at given Thickness, corroded [MAWP]:

$$\begin{aligned}
 &= (2 \cdot S \cdot E \cdot t) / (K_{cor} \cdot D_o - 2 \cdot t \cdot (K_{cor} - 0.1)) \text{ per Appendix 1-4 (c)} \\
 &= (2 \cdot 16700.00 \cdot 1.00 \cdot 0.2500) / (0.983 \cdot 20.0000 - 2 \cdot 0.2500 \cdot (0.983 - 0.1)) \\
 &= 434.376 \text{ psig}
 \end{aligned}$$

Maximum Allowable Pressure, New and Cold [MAPNC]:

$$\begin{aligned}
 &= (2 \cdot S \cdot E \cdot t) / (K \cdot D_o - 2 \cdot t \cdot (K - 0.1)) \text{ per Appendix 1-4 (c)} \\
 &= (2 \cdot 16700.00 \cdot 1.00 \cdot 0.3750) / (1.000 \cdot 20.0000 - 2 \cdot 0.3750 \cdot (1.000 - 0.1)) \\
 &= 648.124 \text{ psig}
 \end{aligned}$$

Actual stress at given pressure and thickness, corroded [Sact]:

$$\begin{aligned}
 &= (P \cdot (K_{cor} \cdot D_o - 2 \cdot t \cdot (K_{cor} - 0.1))) / (2 \cdot E \cdot t) \\
 &= (215.000 \cdot (0.983 \cdot 20.0000 - 2 \cdot 0.2500 \cdot (0.983 - 0.1))) / (2 \cdot 1.00 \cdot 0.2500) \\
 &= 8265.877 \text{ psi}
 \end{aligned}$$

Straight Flange Required Thickness:

$$\begin{aligned}
 &= (P \cdot R_o) / (S \cdot E + 0.4 \cdot P) + c_a \text{ per Appendix 1-1 (a) (1)} \\
 &= (215.000 \cdot 10.0000) / (16700.00 \cdot 1.00 + 0.4 \cdot 215.000) + 0.125 \\
 &= 0.253 \text{ in.}
 \end{aligned}$$

Straight Flange Maximum Allowable Working Pressure:

$$\begin{aligned}
 &= (S \cdot E \cdot t) / (R_o - 0.4 \cdot t) \text{ per Appendix 1-1 (a) (1)} \\
 &= (16700.00 \cdot 1.00 \cdot 0.2500) / (10.0000 - 0.4 \cdot 0.2500) \\
 &= 421.717 \text{ psig}
 \end{aligned}$$

Factor K, corroded condition [Kcor]:

$$\begin{aligned}
 &= ( 2 + ( \text{Inside Diameter} / ( 2 * \text{Inside Head Depth} ) )^2 ) / 6 \\
 &= ( 2 + ( 19.500 / ( 2 * 4.938 ) )^2 ) / 6 \\
 &= 0.983229
 \end{aligned}$$

Percent Elongation per UHA-44  $(75 \cdot t_{nom} / R_f) \cdot (1 - R_f / R_o)$  8.129 %

Note: Please Check Requirements of Table UHA-44 for Elongation limits.

SA-240 304L, Min Metal Temp without impact per UHA-51: -320 °F

### **Cylindrical Shell From 20 To 30 SA-240 304L at 100 °F**

Envolvente

Material UNS Number: S30403

Required Thickness due to Internal Pressure [tr]:

$$\begin{aligned}
 &= (P \cdot R_o) / (S \cdot E + 0.4 \cdot P) \text{ per Appendix 1-1 (a) (1)} \\
 &= (215.000 \cdot 10.0000) / (16700.00 \cdot 1.00 + 0.4 \cdot 215.000) \\
 &= 0.1281 + 0.1250 = 0.2531 \text{ in.}
 \end{aligned}$$

Max. Allowable Working Pressure at given Thickness, corroded [MAWP]:

$$\begin{aligned}
 &= (S \cdot E \cdot t) / (R_o - 0.4 \cdot t) \text{ per Appendix 1-1 (a) (1)} \\
 &= (16700.00 \cdot 1.00 \cdot 0.2500) / (10.0000 - 0.4 \cdot 0.2500) \\
 &= 421.717 \text{ psig}
 \end{aligned}$$

Maximum Allowable Pressure, New and Cold [MAPNC]:



$$\begin{aligned}
 &= (S \cdot E \cdot t) / (R_o - 0.4 \cdot t) \text{ per Appendix 1-1 (a) (1)} \\
 &= (16700.00 \cdot 1.00 \cdot 0.3750) / (10.0000 - 0.4 \cdot 0.3750) \\
 &= 635.787 \text{ psig}
 \end{aligned}$$

Actual stress at given pressure and thickness, corroded [Sact]:

$$\begin{aligned}
 &= (P \cdot (R_o - 0.4 \cdot t)) / (E \cdot t) \\
 &= (215.000 \cdot (10.0000 - 0.4 \cdot 0.2500)) / (1.00 \cdot 0.2500) \\
 &= 8514.000 \text{ psi}
 \end{aligned}$$

Percent Elongation per UHA-44  $(50 \cdot t_{nom} / R_f) \cdot (1 - R_f / R_o)$  1.911 %

Note: Please Check Requirements of Table UHA-44 for Elongation limits.

SA-240 304L, Min Metal Temp without impact per UHA-51: -320 °F

### **Elliptical Head From 30 To 40 SA-240 304L at 100 °F**

Casquete Superior

Material UNS Number: S30403

Required Thickness due to Internal Pressure [tr]:

$$\begin{aligned}
 &= (P \cdot D_o \cdot K_{cor}) / (2 \cdot S \cdot E + 2 \cdot P \cdot (K_{cor} - 0.1)) \text{ per Appendix 1-4 (c)} \\
 &= (215.000 \cdot 20.0000 \cdot 0.983) / (2 \cdot 16700.00 \cdot 1.00 + 2 \cdot 215.000 \cdot (0.983 - 0.1)) \\
 &= 0.1252 + 0.1250 = 0.2502 \text{ in.}
 \end{aligned}$$

Max. Allowable Working Pressure at given Thickness, corroded [MAWP]:

$$\begin{aligned}
 &= (2 \cdot S \cdot E \cdot t) / (K_{cor} \cdot D_o - 2 \cdot t \cdot (K_{cor} - 0.1)) \text{ per Appendix 1-4 (c)} \\
 &= (2 \cdot 16700.00 \cdot 1.00 \cdot 0.2500) / (0.983 \cdot 20.0000 - 2 \cdot 0.2500 \cdot (0.983 - 0.1)) \\
 &= 434.376 \text{ psig}
 \end{aligned}$$

Maximum Allowable Pressure, New and Cold [MAPNC]:

$$\begin{aligned}
&= (2 * S * E * t) / (K * D_o - 2 * t * (K - 0.1)) \text{ per Appendix 1-4 (c)} \\
&= (2 * 16700.00 * 1.00 * 0.3750) / (1.000 * 20.0000 - 2 * 0.3750 * (1.000 - 0.1)) \\
&= 648.124 \text{ psig}
\end{aligned}$$

Actual stress at given pressure and thickness, corroded [Sact]:

$$\begin{aligned}
&= (P * (K_{cor} * D_o - 2 * t * (K_{cor} - 0.1))) / (2 * E * t) \\
&= (215.000 * (0.983 * 20.0000 - 2 * 0.2500 * (0.983 - 0.1))) / (2 * 1.00 * 0.2500) \\
&= 8265.877 \text{ psi}
\end{aligned}$$

Straight Flange Required Thickness:

$$\begin{aligned}
&= (P * R_o) / (S * E + 0.4 * P) + c_a \text{ per Appendix 1-1 (a) (1)} \\
&= (215.000 * 10.0000) / (16700.00 * 1.00 + 0.4 * 215.000) + 0.125 \\
&= 0.253 \text{ in.}
\end{aligned}$$

Straight Flange Maximum Allowable Working Pressure:

$$\begin{aligned}
&= (S * E * t) / (R_o - 0.4 * t) \text{ per Appendix 1-1 (a) (1)} \\
&= (16700.00 * 1.00 * 0.2500) / (10.0000 - 0.4 * 0.2500) \\
&= 421.717 \text{ psig}
\end{aligned}$$

Factor K, corroded condition [Kcor]:

$$\begin{aligned}
&= ( 2 + ( \text{Inside Diameter} / ( 2 * \text{Inside Head Depth} ) )^2 ) / 6 \\
&= ( 2 + ( 19.500 / ( 2 * 4.938 ) )^2 ) / 6 \\
&= 0.983229
\end{aligned}$$

Percent Elongation per UHA-44  $(75 * t_{nom} / R_f) * (1 - R_f / R_o)$  8.129 %

Note: Please Check Requirements of Table UHA-44 for Elongation limits.

SA-240 304L, Min Metal Temp without impact per UHA-51: -320 °F

Elements Suitable for Internal Pressure.



**External Pressure Calculation Results :****ASME Code, Section VIII, Division 1, 2013****Elliptical Head From 10 to 20 Ext. Chart: HA-3 at 100 °F**

## Casquete Inferior

Elastic Modulus from Chart: HA-3 at 100 °F : 0.280E+08 psi

Results for Maximum Allowable External Pressure (MAEP):

Tca	OD	D/t	Factor A	B
0.250	20.00	80.00	0.0017361	10001.60

$$EMAP = B / (K_0 * D / t) = 10001.5967 / (0.9000 * 80.0000) = 138.9111 \text{ psig}$$

Results for Required Thickness (Tca):

Tca	OD	D/t	Factor A	B
0.053	20.00	379.50	0.0003660	5123.67

$$EMAP = B / (K_0 * D / t) = 5123.6704 / (0.9000 * 379.5023) = 15.0011 \text{ psig}$$

*Check the requirements of UG-33(a)(1) using  $P = 1.67 * \text{External Design pressure for this head.}$*

Material UNS Number: S30403

Required Thickness due to Internal Pressure [tr]:

$$\begin{aligned}
 &= (P * D * K_{cor}) / (2 * S * E - 0.2 * P) \text{ Appendix 1-4(c)} \\
 &= (25.050 * 19.5000 * 0.983) / (2 * 16700.00 * 1.00 - 0.2 * 25.050) \\
 &= 0.0144 + 0.1250 = 0.1394 \text{ in.}
 \end{aligned}$$

Max. Allowable Working Pressure at given Thickness, corroded [MAWP]:

$$= ((2*S*E*t)/(K_{cor}*D+0.2*t))/1.67 \text{ per Appendix 1-4 (c)}$$

$$= ((2*16700.00*1.00*0.2500)/(0.983*19.5000+0.2*0.2500))/1.67$$

$$= 260.105 \text{ psig}$$

Maximum Allowable External Pressure [MAEP]:

$$= \min( MAEP, MAWP )$$

$$= \min( 138.91 , 260.1055 )$$

$$= 138.911 \text{ psig}$$

*Thickness requirements per UG-33(a)(1) govern the required thickness of this head.*

### **Cylindrical Shell From 20 to 30 Ext. Chart: HA-3 at 100 °F**

Envolvente

Elastic Modulus from Chart: HA-3 at 100 °F : 0.280E+08 psi

Results for Maximum Allowable External Pressure (MAEP):

Tca	OD	SLEN	D/t	L/D	Factor A	B
0.250	20.00	67.21	80.00	3.3604	0.0005116	7162.25
EMAP = (4*B)/(3*(D/t)) = (4*7162.2500)/(3*80.0000) = 119.3708 psig						

Results for Required Thickness (Tca):

Tca	OD	SLEN	D/t	L/D	Factor A	B
0.108	20.00	67.21	185.89	3.3604	0.0001494	2091.27
EMAP = (4*B)/(3*(D/t)) = (4*2091.2749)/(3*185.8860) = 15.0004 psig						

Results for Maximum Stiffened Length (Slen):

Tca	OD	SLEN	D/t	L/D	Factor A	B
-----	----	------	-----	-----	----------	---

0.250      20.00      1443.45      80.00      50.0000      0.0001720      2408.00

$$EMAP = (4*B) / (3*(D/t)) = (4*2408.0002) / (3*80.0000) = 40.1333 \text{ psig}$$

### **Elliptical Head From 30 to 40 Ext. Chart: HA-3 at 100 °F**

#### Casquete Superior

Elastic Modulus from Chart: HA-3 at 100 °F : 0.280E+08 psi

Results for Maximum Allowable External Pressure (MAEP):

Tca	OD	D/t	Factor A	B
0.250	20.00	80.00	0.0017361	10001.60

$$EMAP = B / (K_0 * D/t) = 10001.5967 / (0.9000 * 80.0000) = 138.9111 \text{ psig}$$

Results for Required Thickness (Tca):

Tca	OD	D/t	Factor A	B
0.053	20.00	379.50	0.0003660	5123.67

$$EMAP = B / (K_0 * D/t) = 5123.6704 / (0.9000 * 379.5023) = 15.0011 \text{ psig}$$

*Check the requirements of UG-33(a)(1) using  $P = 1.67 * \text{External Design pressure for this head.}$*

Material UNS Number: S30403

Required Thickness due to Internal Pressure [tr]:

$$= (P*D*K_{cor}) / (2*S*E - 0.2*P) \text{ Appendix 1-4 (c)}$$

$$= (25.050*19.5000*0.983) / (2*16700.00*1.00 - 0.2*25.050)$$

$$= 0.0144 + 0.1250 = 0.1394 \text{ in.}$$

Max. Allowable Working Pressure at given Thickness, corroded [MAWP]:

$$= ((2*S*E*t) / (K_{cor}*D + 0.2*t)) / 1.67 \text{ per Appendix 1-4 (c)}$$

$$= ((2*16700.00*1.00*0.2500)/(0.983*19.5000+0.2*0.2500))/1.67$$

$$= 260.105 \text{ psig}$$

**Maximum Allowable External Pressure [MAEP]:**

$$= \min( \text{MAEP}, \text{MAWP} )$$

$$= \min( 138.91 , 260.1055 )$$

$$= 138.911 \text{ psig}$$

*Thickness requirements per UG-33(a)(1) govern the required thickness of this head.*

**External Pressure Calculations**

From	To	Section Length ft.	Outside Diameter in.	Corroded Thickness in.	Factor A	Factor B psi
10	20	No Calc	20.0000	0.25000	0.0017361	10001.6
20	30	5.60069	20.0000	0.25000	0.00051159	7162.25
30	40	No Calc	20.0000	0.25000	0.0017361	10001.6

**External Pressure Calculations**

From	To	External Actual T. in.	External Required T. in.	External Des. Press. psig	External M.A.W.P. psig
10	20	0.37500	0.21875	15.0000	138.911
20	30	0.37500	0.23259	15.0000	119.371
30	40	0.37500	0.21875	15.0000	138.911
Minimum					119.371

**External Pressure Calculations**

		Actual Len.	Allow. Len.	Ring Inertia	Ring Inertia
From	To	Bet. Stiff.	Bet. Stiff.	Required	Available
		ft.	ft.	in**4	in**4
-----					
10	20	No Calc	No Calc	No Calc	No Calc
20	30	5.60069	120.287	No Calc	No Calc
30	40	No Calc	No Calc	No Calc	No Calc

Elements Suitable for External Pressure.



**Element and Detail Weights**

From	To	Element Metal Wgt. lb.	Element ID Volume in <sup>3</sup>	Corroded Metal Wgt. lb.	Corroded ID Volume in <sup>3</sup>	Extra due Misc %
10	20	63.5387	1515.83	42.3591	1567.90	...
20	30	402.291	17462.3	269.902	17918.9	...
30	40	63.5387	1515.83	42.3591	1567.90	...
Total		529	20494	354	21054	0

**Weight of Details**

From	Type	Weight of Detail lb.	X Offset, Dtl. Cent. ft.	Y Offset, Dtl. Cent. ft.	Description
10	Noz1	7.66660	...	-0.40104	B
20	Noz1	7.66660	0.87238	3.50000	C
30	Noz1	61.0542	...	1.40104	A

**Total Weight of Each Detail Type**

Total Weight of Nozzles	76.4
-----	
Sum of the Detail Weights	76.4 lb.

**Weight Summation**

Fabricated	Shop Test	Shipping	Erected	Empty	Operating
529.4	605.8	529.4	605.8	529.4	605.8
...	740.1	...	...	...	...
76.4	...	76.4	...	...	...
...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	76.4	...
605.8	1345.8	605.8	605.8	605.8	605.8 lb.

*Note: The shipping total has been modified because some items have been specified as being installed in the shop.*

**Weight Summary**

Fabricated Wt.	- Bare Weight W/O Removable Internals	605.8 lb.
Shop Test Wt.	- Fabricated Weight + Water ( Full )	1345.8 lb.
Shipping Wt.	- Fab. Wt + Rem. Intls.+ Shipping App.	605.8 lb.
Erected Wt.	- Fab. Wt + Rem. Intls.+ Insul. (etc)	605.8 lb.
Ope. Wt. no Liq	- Fab. Wt + Intls. + Details + Wghts.	605.8 lb.
Operating Wt.	- Empty Wt + Operating Liq. Uncorroded	605.8 lb.
Field Test Wt.	- Empty Weight + Water (Full)	1345.8 lb.
Mass of the Upper 1/3 of the Vertical Vessel		198.0 lb.

**Outside Surface Areas of Elements**

From	To	Surface Area

		in <sup>2</sup>	
10	20	559.258	
20	30	3769.91	
30	40	559.258	
-----			
Total		4888.427 in <sup>2</sup>	[33.9 Square Feet ]

**Element and Detail Weights**

From	To	Total Ele. Empty Wgt. lbm	Total. Ele. Oper. Wgt. lbm	Total. Ele. Hydro. Wgt. lbm	Total Dtl. Offset Mom. ft.lb.	Oper. Wgt. No Liquid lbm
10	20	71.2053	71.2053	71.2053	...	71.2053
20	30	409.957	409.957	409.957	6.68815	409.957
30	40	124.593	124.593	124.593	...	124.593

**Cumulative Vessel Weight**

From	To	Cumulative Ope Wgt. No Liquid lbm	Cumulative Oper. Wgt. lbm	Cumulative Hydro. Wgt. lbm
10	20	605.755	605.755	605.755
20	30	534.550	534.550	534.550
30	40	124.593	124.593	124.593

Note: The cumulative operating weights no liquid in the column above are the cumulative operating weights minus the operating liquid weight minus any weights absent in the empty condition.

**Cumulative Vessel Moment**

		Cumulative	Cumulative	Cumulative
From	To	Empty Mom.	Oper. Mom.	Hydro. Mom.
		ft.lb.	ft.lb.	ft.lb.
-----				
10	20	6.68815	6.68815	6.68815
20	30	6.68815	6.68815	6.68815
30	40	...	...	...

**Nozzle Flange MAWP Results :**

Nozzle	----- Flange Rating				
Description	Operating	Ambient	Temperature	Class	Grade Group
	psig	psig	°F		
-----					
B	275.0	275.0	100	150	GR 2.1
C	275.0	275.0	100	150	GR 2.1
A	275.0	275.0	100	150	GR 2.1
-----					
Minimum Rating	275.000	275.000	psig	(for Core Elements)	

Note: ANSI Ratings are per ANSI/ASME B16.5 2009 Edition

**Shop/Field Installation Options :**

Note : The CG is computed from the first Element From Node

Center of Gravity of Nozzles	5.577 ft.
Center of Gravity of Bare Shell New and Cold	2.667 ft.
Center of Gravity of Bare Shell Corroded	2.667 ft.
Vessel CG in the Operating Condition	3.182 ft.
Vessel CG in the Fabricated (Shop/Empty) Condition	3.034 ft.

**INPUT VALUES, Nozzle Description: B****From : 10**

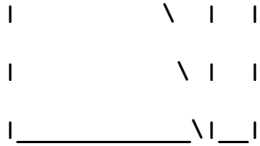
Pressure for Reinforcement Calculations	P	215.000	psig
Temperature for Internal Pressure	Temp	100	°F
Design External Pressure	Pext	15.00	psig
Temperature for External Pressure	Tempex	100	°F
Shell Material		SA-240	304L
Shell Allowable Stress at Temperature	S	16700.00	psi
Shell Allowable Stress At Ambient	Sa	16700.00	psi
Inside Diameter of Elliptical Head	D	19.2500	in.
Aspect Ratio of Elliptical Head	Ar	2.00	
Head Finished (Minimum) Thickness	t	0.3750	in.
Head Internal Corrosion Allowance	c	0.1250	in.
Head External Corrosion Allowance	co	0.0000	in.
Distance from Head Centerline	L1	0.0000	in.
User Entered Minimum Design Metal Temperature		-20.00	°F

**Type of Element Connected to the Shell : Nozzle**

Material		SA-240	304L
Material UNS Number		S30403	
Material Specification/Type		Plate	
Allowable Stress at Temperature	Sn	16700.00	psi
Allowable Stress At Ambient	Sna	16700.00	psi
Diameter Basis (for tr calc only)		ID	







**Insert/Set-in Nozzle No Pad, no Inside projection**

**Reinforcement CALCULATION, Description: B**

ASME Code, Section VIII, Div. 1, 2013, UG-37 to UG-45

Actual Inside Diameter Used in Calculation 1.687 in.  
 Actual Thickness Used in Calculation 0.344 in.

Nozzle input data check completed without errors.

Reqd thk per UG-37(a)of Elliptical Head, Tr [Int. Press]

$$= (P \cdot K_1 \cdot D) / (2 \cdot S \cdot E - 0.2 \cdot P) \text{ per UG-37 (a) (3)}$$

$$= (215.00 \cdot 0.889 \cdot 19.5000) / (2 \cdot 16700.00 \cdot 1.00 - 0.2 \cdot 215.00)$$

$$= 0.1118 \text{ in.}$$

Reqd thk per UG-37(a)of Nozzle Wall, Trn [Int. Press]

$$= (P \cdot R) / (S \cdot E - 0.6 \cdot P) \text{ per UG-27 (c) (1)}$$

$$= (215.00 \cdot 0.97) / (16700 \cdot 1.00 - 0.6 \cdot 215.00)$$

$$= 0.0126 \text{ in.}$$

Required Nozzle thickness under External Pressure per UG-28 : 0.0028 in.

**UG-40, Limits of Reinforcement : [Internal Pressure]**

Parallel to Vessel Wall (Diameter Limit)	D1	3.8740 in.
Parallel to Vessel Wall, opening length	d	1.9370 in.
Normal to Vessel Wall (Thickness Limit), no pad	Tlnp	0.5475 in.

Note:

Taking a UG-36(c)(3)(a) exemption for nozzle: B.

This calculation is valid for nozzles that meet all the requirements of paragraph UG-36. Please check the Code carefully, especially for nozzles that are not isolated or do not meet Code spacing requirements. To force the computation of areas for small nozzles go to Tools->Configuration and check the box to force the UG-37 small nozzle area calculation or force the Appendix 1-10 computation in Nozzle Design Options.

#### UG-45 Minimum Nozzle Neck Thickness Requirement: [Int. Press.]

Wall Thickness for Internal/External pressures	$t_a = 0.1376$ in.
Wall Thickness per UG16(b),	$t_{r16b} = 0.2188$ in.
Wall Thickness, shell/head, internal pressure	$t_{rb1} = 0.2486$ in.
Wall Thickness	$t_{b1} = \max(t_{rb1}, t_{r16b}) = 0.2486$ in.
Wall Thickness	$t_{b2} = \max(t_{rb2}, t_{r16b}) = 0.2188$ in.
Wall Thickness per table UG-45	$t_{b3} = 0.2596$ in.

Determine Nozzle Thickness candidate [tb]:

$$= \min[ t_{b3}, \max( t_{b1}, t_{b2} ) ]$$
$$= \min[ 0.260 , \max( 0.2486 , 0.2188 ) ]$$
$$= 0.2486 \text{ in.}$$

Minimum Wall Thickness of Nozzle Necks [tUG-45]:

$$= \max( t_a, t_b )$$
$$= \max( 0.1376 , 0.2486 )$$
$$= 0.2486 \text{ in.}$$

Available Nozzle Neck Thickness =  $0.875 * 0.344 = 0.301$  in. --> OK

SA-240 304L, Min Metal Temp without impact per UHA-51: -320 °F

Weld Size Calculations, Description: B

Intermediate Calc. for nozzle/shell Welds     $t_{min}$             0.2190 in.

**Results Per UW-16.1:**

	Required Thickness	Actual Thickness
Nozzle Weld	$0.1533 = 0.7 * t_{min}$	$0.2651 = 0.7 * W_o$ in.

NOTE : Skipping the nozzle attachment weld strength calculations.

Per UW-15(b)(2) the nozzles exempted by UG-36(c)(3)(a)  
(small nozzles) do not require a weld strength check.

**Maximum Allowable Pressure for this Nozzle at this Location:**

Converged Max. Allow. Pressure in Operating case            150.000 psig

Note: The MAWP of this junction was limited by the parent Shell/Head.

The Drop for this Nozzle is : 0.0401 in.

The Cut Length for this Nozzle is, Drop + Ho + H + T : 0.5151 in.

**Percent Elongation Calculations:**

Percent Elongation per UHA-44     $(50 * t_{nom} / R_f) * (1 - R_f / R_o)$     16.937 %

Note: Please Check Requirements of Table UHA-44 for Elongation limits.

**INPUT VALUES, Nozzle Description: C****From : 20**

Pressure for Reinforcement Calculations	P	215.000	psig
Temperature for Internal Pressure	Temp	100	°F
Design External Pressure	Pext	15.00	psig
Temperature for External Pressure	Tempex	100	°F

Shell Material		SA-240 304L	
Shell Allowable Stress at Temperature	S	16700.00	psi
Shell Allowable Stress At Ambient	Sa	16700.00	psi

Inside Diameter of Cylindrical Shell	D	19.2500	in.
Design Length of Section	L	67.2083	in.
Shell Finished (Minimum) Thickness	t	0.3750	in.
Shell Internal Corrosion Allowance	c	0.1250	in.
Shell External Corrosion Allowance	co	0.0000	in.

Distance from Bottom/Left Tangent		3.6667	ft.
-----------------------------------	--	--------	-----

User Entered Minimum Design Metal Temperature		-20.00	°F
---	--	--------	----

**Type of Element Connected to the Shell : Nozzle**

Material		SA-240 304L	
Material UNS Number		S30403	
Material Specification/Type		Plate	
Allowable Stress at Temperature	Sn	16700.00	psi
Allowable Stress At Ambient	Sna	16700.00	psi

Diameter Basis (for tr calc only)		ID	
-----------------------------------	--	----	--



\	
\	
\_\_\_\_\_ \|\_\_	

### Insert/Set-in Nozzle No Pad, no Inside projection

### Reinforcement CALCULATION, Description: C

ASME Code, Section VIII, Div. 1, 2013, UG-37 to UG-45

Actual Inside Diameter Used in Calculation	1.687 in.
Actual Thickness Used in Calculation	0.344 in.

Nozzle input data check completed without errors.

Reqd thk per UG-37(a) of Cylindrical Shell, Tr [Int. Press]

$$\begin{aligned}
 &= (P \cdot R) / (S \cdot E - 0.6 \cdot P) \text{ per UG-27 (c) (1)} \\
 &= (215.00 \cdot 9.7500) / (16700 \cdot 1.00 - 0.6 \cdot 215.00) \\
 &= 0.1265 \text{ in.}
 \end{aligned}$$

Reqd thk per UG-37(a) of Nozzle Wall, Trn [Int. Press]

$$\begin{aligned}
 &= (P \cdot R) / (S \cdot E - 0.6 \cdot P) \text{ per UG-27 (c) (1)} \\
 &= (215.00 \cdot 0.97) / (16700 \cdot 1.00 - 0.6 \cdot 215.00) \\
 &= 0.0126 \text{ in.}
 \end{aligned}$$

Required Nozzle thickness under External Pressure per UG-28 : 0.0028 in.

### UG-40, Limits of Reinforcement : [External Pressure]

Parallel to Vessel Wall (Diameter Limit)	D1	3.8740 in.
Parallel to Vessel Wall, opening length	d	1.9370 in.
Normal to Vessel Wall (Thickness Limit), no pad	Tlnp	0.5475 in.

Note:

Taking a UG-36(c)(3)(a) exemption for nozzle: C.

This calculation is valid for nozzles that meet all the requirements of paragraph UG-36. Please check the Code carefully, especially for nozzles that are not isolated or do not meet Code spacing requirements. To force the computation of areas for small nozzles go to Tools->Configuration and check the box to force the UG-37 small nozzle area calculation or force the Appendix 1-10 computation in Nozzle Design Options.

#### UG-45 Minimum Nozzle Neck Thickness Requirement: [Int. Press.]

Wall Thickness for Internal/External pressures	$t_a = 0.1376$ in.
Wall Thickness per UG16(b),	$t_{r16b} = 0.2188$ in.
Wall Thickness, shell/head, internal pressure	$t_{rb1} = 0.2515$ in.
Wall Thickness	$t_{b1} = \max(t_{rb1}, t_{r16b}) = 0.2515$ in.
Wall Thickness	$t_{b2} = \max(t_{rb2}, t_{r16b}) = 0.2188$ in.
Wall Thickness per table UG-45	$t_{b3} = 0.2596$ in.

Determine Nozzle Thickness candidate [tb]:

$$= \min[ t_{b3}, \max( t_{b1}, t_{b2} ) ]$$

$$= \min[ 0.260 , \max( 0.2515 , 0.2188 ) ]$$

$$= 0.2515 \text{ in.}$$

Minimum Wall Thickness of Nozzle Necks [tUG-45]:

$$= \max( t_a, t_b )$$

$$= \max( 0.1376 , 0.2515 )$$

$$= 0.2515 \text{ in.}$$

Available Nozzle Neck Thickness =  $0.875 * 0.344 = 0.301$  in. --> OK

SA-240 304L, Min Metal Temp without impact per UHA-51: -320 °F

Weld Size Calculations, Description: C

Intermediate Calc. for nozzle/shell Welds     $t_{min}$             0.2190 in.

**Results Per UW-16.1:**

	Required Thickness	Actual Thickness
Nozzle Weld	$0.1533 = 0.7 * t_{min}$	$0.2651 = 0.7 * W_o$ in.

NOTE : Skipping the nozzle attachment weld strength calculations.

Per UW-15(b)(2) the nozzles exempted by UG-36(c)(3)(a)

(small nozzles) do not require a weld strength check.

**Maximum Allowable Pressure for this Nozzle at this Location:**

Converged Max. Allow. Pressure in Operating case            150.000 psig

Note: The MAWP of this junction was limited by the parent Shell/Head.

The Drop for this Nozzle is : 0.0735 in.

The Cut Length for this Nozzle is, Drop + Ho + H + T : 0.5485 in.

**Percent Elongation Calculations:**

Percent Elongation per UHA-44     $(50 * t_{nom} / R_f) * (1 - R_f / R_o)$     16.937 %

Note: Please Check Requirements of Table UHA-44 for Elongation limits.



**INPUT VALUES, Nozzle Description: A****From : 30**

Pressure for Reinforcement Calculations	P	215.000	psig
Temperature for Internal Pressure	Temp	100	°F
Design External Pressure	Pext	15.00	psig
Temperature for External Pressure	Tempex	100	°F
Shell Material		SA-240	304L
Shell Allowable Stress at Temperature	S	16700.00	psi
Shell Allowable Stress At Ambient	Sa	16700.00	psi
Inside Diameter of Elliptical Head	D	19.2500	in.
Aspect Ratio of Elliptical Head	Ar	2.00	
Head Finished (Minimum) Thickness	t	1.0000	in.
Head Internal Corrosion Allowance	c	0.1250	in.
Head External Corrosion Allowance	co	0.0000	in.
Distance from Head Centerline	L1	0.0000	in.
User Entered Minimum Design Metal Temperature		-20.00	°F

**Type of Element Connected to the Shell : Nozzle**

Material		SA-240	304L
Material UNS Number		S30403	
Material Specification/Type		Plate	
Allowable Stress at Temperature	Sn	16700.00	psi
Allowable Stress At Ambient	Sna	16700.00	psi
Diameter Basis (for tr calc only)		ID	

Layout Angle		0.00	deg
Diameter		10.0000	in.
Size and Thickness Basis		Nominal	
Nominal Thickness	tn	40	
Flange Material		SA-182 F304	
Flange Type		Socket Weld	
Corrosion Allowance	can	0.1250	in.
Joint Efficiency of Shell Seam at Nozzle	E1	1.00	
Joint Efficiency of Nozzle Neck	En	1.00	
Outside Projection	ho	0.0100	in.
Weld leg size between Nozzle and Pad/Shell	Wo	0.3750	in.
Groove weld depth between Nozzle and Vessel	Wgnv	0.3750	in.
Inside Projection	h	0.0000	in.
Weld leg size, Inside Element to Shell	Wi	0.0000	in.
ASME Code Weld Type per UW-16		None	
Tapped hole area loss		1.0000	in <sup>2</sup>
Class of attached Flange		150	
Grade of attached Flange		GR 2.1	

The Pressure Design option was Design Pressure + static head.

**Nozzle Sketch (may not represent actual weld type/configuration)**

```

| |
| |
| |
| |

```



**Insert/Set-in Nozzle No Pad, no Inside projection**

### **Reinforcement CALCULATION, Description: A**

ASME Code, Section VIII, Div. 1, 2013, UG-37 to UG-45

Actual Inside Diameter Used in Calculation	10.020 in.
Actual Thickness Used in Calculation	0.365 in.

Nozzle input data check completed without errors.

Reqd thk per UG-37(a) of Elliptical Head, Tr [Int. Press]

$$\begin{aligned}
 &= (P \cdot D \cdot K) / (2 \cdot S \cdot E - 0.2 \cdot P) \text{ Appendix 1-4 (c)} \\
 &= (215.00 \cdot 19.5000 \cdot 0.983) / (2 \cdot 16700.00 \cdot 1.00 - 0.2 \cdot 215.00) \\
 &= 0.1236 \text{ in.}
 \end{aligned}$$

Reqd thk per UG-37(a) of Nozzle Wall, Trn [Int. Press]

$$\begin{aligned}
 &= (P \cdot R) / (S \cdot E - 0.6 \cdot P) \text{ per UG-27 (c) (1)} \\
 &= (215.00 \cdot 5.14) / (16700 \cdot 1.00 - 0.6 \cdot 215.00) \\
 &= 0.0666 \text{ in.}
 \end{aligned}$$

Required Nozzle thickness under External Pressure per UG-28 : 0.0125 in.

Note: The diameter limit is greater than the head diameter.

**UG-40, Limits of Reinforcement : [Internal Pressure]**

Parallel to Vessel Wall (Diameter Limit)	D1	20.5400	in.
Parallel to Vessel Wall, opening length	d	10.2700	in.
Normal to Vessel Wall (Thickness Limit), no pad	Tlnp	0.6000	in.

**Weld Strength Reduction Factor [fr1]:**

$$= \min( 1, S_n/S )$$

$$= \min( 1, 16700.0/16700.0 )$$

$$= 1.000$$

**Weld Strength Reduction Factor [fr2]:**

$$= \min( 1, S_n/S )$$

$$= \min( 1, 16700.0/16700.0 )$$

$$= 1.000$$

**Weld Strength Reduction Factor [fr3]:**

$$= \min( fr2, fr4 )$$

$$= \min( 1.0 , 1.0 )$$

$$= 1.000$$

**Results of Nozzle Reinforcement Area Calculations:**

AREA AVAILABLE, A1 to A5		Design	External	Mapnc
Area Required	Ar	2.269	1.481	NA in <sup>2</sup>
Area in Shell	A1	7.717	8.023	NA in <sup>2</sup>
Area in Nozzle Wall	A2	0.003	0.005	NA in <sup>2</sup>
Area in Inward Nozzle	A3	0.000	0.000	NA in <sup>2</sup>
Area in Welds	A41+A42+A43	0.007	0.007	NA in <sup>2</sup>
Area in Element	A5	0.000	0.000	NA in <sup>2</sup>
TOTAL AREA AVAILABLE	Atot	7.728	8.035	NA in <sup>2</sup>

The Internal Pressure Case Governs the Analysis.

Nozzle Angle Used in Area Calculations

90.00 Degr.

The area available without a pad is Sufficient.

Area Required [A]:

$$\begin{aligned}
 &= ( d * tr * F + 2 * tn * tr * F * (1 - fr1) ) \text{ UG-37(c)} \\
 &= ( 10.2700 * 0.1236 * 1.0 + 2 * 0.2400 * 0.1236 * 1.0 * (1 - 1.00) ) \\
 &= 2.269 \text{ in}^2
 \end{aligned}$$

Note: The required area has been increased by the tapped hole area loss.

**Reinforcement Areas per Figure UG-37.1**

Area Available in Shell [A1]:

$$\begin{aligned}
 &= d ( E1 * t - F * tr ) - 2 * tn ( E1 * t - F * tr ) * ( 1 - fr1 ) \\
 &= 10.270 ( 1.00 * 0.8750 - 1.0 * 0.124 ) - 2 * 0.240 \\
 &\quad ( 1.00 * 0.8750 - 1.0 * 0.1236 ) * ( 1 - 1.000 ) \\
 &= 7.717 \text{ in}^2
 \end{aligned}$$

Area Available in Nozzle Projecting Outward [A2]:

$$\begin{aligned}
 &= ( 2 * ho ) * ( tn - trn ) * fr2 \\
 &= ( 2 * 0.010 ) * ( 0.2400 - 0.0666 ) * 1.0000 \\
 &= 0.003 \text{ in}^2
 \end{aligned}$$

Area Available in Inward Weld + Outward Weld [A41 + A43]:

$$\begin{aligned}
 &= ( Wo^2 - \text{Area Lost} ) * fr2 + ( (Wi - can / 0.707)^2 - \text{Area Lost} ) * fr2 \\
 &= ( 0.3750^2 - 0.1332 ) * 1.0000 + ( 0.0000^2 - 0.0000 ) * 1.0000 \\
 &= 0.007 \text{ in}^2
 \end{aligned}$$

**UG-45 Minimum Nozzle Neck Thickness Requirement: [Int. Press.]**

Wall Thickness for Internal/External pressures

ta = 0.1916 in.

Wall Thickness per UG16(b),  $tr_{16b} = 0.2188$  in.  
 Wall Thickness, shell/head, internal pressure  $tr_{b1} = 0.2486$  in.  
 Wall Thickness  $tb_1 = \max(tr_{b1}, tr_{16b}) = 0.2486$  in.  
 Wall Thickness  $tb_2 = \max(tr_{b2}, tr_{16b}) = 0.2188$  in.  
 Wall Thickness per table UG-45  $tb_3 = 0.4440$  in.

**Determine Nozzle Thickness candidate [tb]:**

$= \min[ tb_3, \max( tb_1, tb_2 ) ]$   
 $= \min[ 0.444 , \max( 0.2486 , 0.2188 ) ]$   
 $= 0.2486$  in.

**Minimum Wall Thickness of Nozzle Necks [tUG-45]:**

$= \max( ta, tb )$   
 $= \max( 0.1916 , 0.2486 )$   
 $= 0.2486$  in.

Available Nozzle Neck Thickness =  $0.875 * 0.365 = 0.319$  in. --> OK

SA-240 304L, Min Metal Temp without impact per UHA-51:  $-320$  °F

**Weld Size Calculations, Description: A**

Intermediate Calc. for nozzle/shell Welds  $T_{min} = 0.2400$  in.

**Results Per UW-16.1:**

	Required Thickness	Actual Thickness
Nozzle Weld	$0.1680 = 0.7 * t_{min}$	$0.2651 = 0.7 * W_o$ in.

**Weld Strength and Weld Loads per UG-41.1, Sketch (a) or (b)**

**Weld Load [W]:**

$= (A - A_1 + 2 * t_n * f_{r1} * (E_1 * t - t_r)) * S_v$

$$\begin{aligned}
 &= (2.2691 - 7.7171 + 2 * 0.2400 * 1.0000 * \\
 &\quad (1.00 * 0.8750 - 0.1236) ) * 16700 \\
 &= 0.00 \text{ lb.}
 \end{aligned}$$

Note: F is always set to 1.0 throughout the calculation.

Weld Load [W1]:

$$\begin{aligned}
 &= (A2+A5+A4 - (W_i - \text{Can} / .707)^2 * fr2) * Sv \\
 &= ( 0.0035 + 0.0000 + 0.0074 - 0.0000 * 1.00 ) * 16700 \\
 &= 181.49 \text{ lb.}
 \end{aligned}$$

Weld Load [W2]:

$$\begin{aligned}
 &= (A2 + A3 + A4 + (2 * t_n * t * fr1)) * Sv \\
 &= ( 0.0035 + 0.0000 + 0.0074 + ( 0.4200 ) ) * 16700 \\
 &= 7195.49 \text{ lb.}
 \end{aligned}$$

Weld Load [W3]:

$$\begin{aligned}
 &= (A2+A3+A4+A5 + (2*t_n*t*fr1)) * S \\
 &= ( 0.0035 + 0.0000 + 0.0074 + 0.0000 + ( 0.4200 ) ) * 16700 \\
 &= 7195.49 \text{ lb.}
 \end{aligned}$$

### Strength of Connection Elements for Failure Path Analysis

Shear, Outward Nozzle Weld [Sonw]:

$$\begin{aligned}
 &= (\pi/2) * D_{lo} * W_o * 0.49 * S_{nw} \\
 &= ( 3.1416/2.0 ) * 10.7500 * 0.3750 * 0.49 * 16700 \\
 &= 51817. \text{ lb.}
 \end{aligned}$$

Shear, Nozzle Wall [Snw]:

$$\begin{aligned}
 &= (\pi * ( D_{lr} + D_{lo} ) / 4 ) * ( Thk - \text{Can} ) * 0.7 * S_n \\
 &= (3.1416 * 5.2550) * ( 0.3650 - 0.1250 ) * 0.7 * 16700
 \end{aligned}$$

$$= 46318. \text{ lb.}$$

#### Tension, Shell Groove Weld [Tngw]:

$$= (\pi/2) * D_{lo} * (W_{gnvi-Cas}) * 0.74 * S_{ng}$$

$$= ( 3.1416/2.0 ) * 10.7500 * ( 0.3750 - 0.1250 ) * 0.74 * 16700$$

$$= 52169. \text{ lb.}$$

#### Strength of Failure Paths:

$$PATH11 = ( SONW + SNW ) = ( 51816 + 46317 ) = 98134 \text{ lb.}$$

$$PATH22 = ( Sonw + Tpgw + Tngw + Sinw )$$

$$= ( 51816 + 0 + 52169 + 0 ) = 103986 \text{ lb.}$$

$$PATH33 = ( Sonw + Tngw + Sinw )$$

$$= ( 51816 + 52169 + 0 ) = 103986 \text{ lb.}$$

#### Summary of Failure Path Calculations:

Path 1-1 = 98134 lb., must exceed W = 0 lb. or W1 = 181 lb.

Path 2-2 = 103986 lb., must exceed W = 0 lb. or W2 = 7195 lb.

Path 3-3 = 103986 lb., must exceed W = 0 lb. or W3 = 7195 lb.

#### Maximum Allowable Pressure for this Nozzle at this Location:

Converged Max. Allow. Pressure in Operating case                      150.000    psig

Note: The MAWP of this junction was limited by the parent Shell/Head.

Nozzle is O.K. for the External Pressure                                      15.000    psig

The Drop for this Nozzle is : 0.8153 in.

The Cut Length for this Nozzle is, Drop + Ho + H + T : 1.8253 in.

#### Percent Elongation Calculations:



Percent Elongation per UHA-44  $(50 * t_{nom} / R_f) * (1 - R_f / R_o)$  3.515 %

Note: Please Check Requirements of Table UHA-44 for Elongation limits.

**Nozzle Schedule:**

Description	Nominal Flange			Noz.	Wall	Re-Pad		Cut
	Size	Sch/Type	O/Dia	Thk	ODia	Thick	Length	
	in.	Cls	in.	in.	in.	in.	in.	
B	2.000	160 Thrded	2.375	0.344	-	-	0.52	
C	2.000	160 Thrded	2.375	0.344	-	-	0.55	
A	10.000	40 Socket	10.750	0.365	-	-	1.83	

*General Notes for the above table:*

The Cut Length is the Outside Projection + Inside Projection + Drop + In Plane Shell Thickness. This value does not include weld gaps, nor does it account for shrinkage.

In the case of Oblique Nozzles, the Outside Diameter must be increased. The Re-Pad WIDTH around the nozzle is calculated as follows:

$$\text{Width of Pad} = (\text{Pad Outside Dia. (per above)} - \text{Nozzle Outside Dia.})/2$$

For hub nozzles, the thickness and diameter shown are those of the smaller and thinner section.

**Nozzle Material and Weld Fillet Leg Size Details:**

Nozzle	Material	Shl Grve Weld	Noz Shl/Pad Weld	Pad OD Weld	Pad Grve Weld	Inside Weld
		in.	in.	in.	in.	in.
B	SA-240 304L	0.375	0.375	-	-	-
C	SA-240 304L	0.375	0.375	-	-	-

A	SA-240 304L	0.375	0.375	-	-	-
---	-------------	-------	-------	---	---	---

Note: The Outside projections below do not include the flange thickness.

**Nozzle Miscellaneous Data:**

Nozzle	Elevation/Distance	Layout	Projection		Installed In
	From Datum	Angle	Outside	Inside	Component
	ft.	deg.	in.	in.	
-----					
B		0.00	0.10	0.00	Casquete Inf
C	3.500	270.00	0.10	0.00	Envolvente
A		0.00	0.01	0.00	Casquete Sup

**Weld Sizes for Slip On Nozzle Flanges per UW-21:**

Nozzle to Flange Fillet Weld Leg dimension [xmin]:

= min( 0.7 \* Hub Thickness, Nozzle Thickness-Corrosion )/0.7 for Socket Welds

= min( 1.4 \* tmin, Hub Thickness ) / 0.7 for Slip on Flanges.

The Nozzle Wall thicknesses shown below are in the corroded condition. Hubs are considered to be straight.

Description	Nominal Flange		Noz.	Wall	Hub	Throat	xmin	
	Size	Sch/Type	O/Dia	Thk	----- Thickness			
	in.	Cls	in.	in.	in.	in.	in.	
-----								
A	10.000	40	Socket	10.750	0.240	0.560	0.240	0.343

**Nozzle Calculation Summary:**

Description	MAWP psig	Ext	MAPNC psig	UG45 [tr]	Weld Path	Areas or Stresses
B	150.00	...	...	OK 0.249	OK	NoCalc[*]
C	150.00	...	...	OK 0.252	OK	NoCalc[*]
A	150.00	OK	...	OK 0.249	OK	Passed
-----						
Min. - Nozzles	150.00	A				
Min. Shell&Flgs	150.00	30	40	275.00		
Computed Vessel M.A.W.P.	150.00	psig				

[\*] - This was a small opening and the areas were not computed or the MAWP of this connection could not be computed because the longitudinal bending stress was greater than the hoop stress.

Note: MAWPs (Internal Case) shown above are at the High Point.

**Check the Spatial Relationship between the Nozzles**

From Node	Nozzle Description	Y Coordinate,	Layout Angle,	Dia. Limit
10	B	0.000	0.000	3.874
20	C	44.000	270.000	3.874
30	A	0.000	0.000	20.540

**The nozzle spacing is computed by the following:**

= Sqrt(  $l^2 + l_c^2$  ) where

ll - Arc length along the inside vessel surface in the long. direction.

lc - Arc length along the inside vessel surface in the circ. direction

If any interferences/violations are found, they will be noted below.

No interference violations have been detected !

**Minimum Design Metal Temperature Results Summary :**

Description	Curve	Basic	Reduced	UG-20 (f)	Thickness	Gov	E*
Notes		MDMT	MDMT	MDMT	ratio	Thk	
		°F	°F	°F		in.	
-----							
Casquete Infe[16]		-320					
Envolvente [16]		-320					
Casquete Supe[16]		-320					
B [15]		-320					
C [15]		-320					
A [15]		-320					
-----							
Required Minimum Design Metal Temperature					-20	°F	
Warmest Computed Minimum Design Metal Temperature					-320	°F	

**Notes:**

- [ ! ] - This was an impact tested material.
- [ 1 ] - Governing Nozzle Weld.
- [ 4 ] - ANSI Flange MDMT Calcs; Thickness ratio per UCS-66(b)(1)(c).
- [ 5 ] - ANSI Flange MDMT Calcs; Thickness ratio per UCS-66(b)(1)(b).
- [ 6 ] - MDMT Calculations at the Shell/Head Joint.
- [ 7 ] - MDMT Calculations for the Straight Flange.
- [ 8 ] - Cylinder/Cone/Flange Junction MDMT.
- [ 9 ] - Calculations in the Spherical Portion of the Head.
- [10] - Calculations in the Knuckle Portion of the Head.
- [11] - Calculated (Body Flange) Flange MDMT.
- [12] - Calculated Flat Head MDMT per UCS-66.3
- [13] - Tubesheet MDMT, shell side, if applicable
- [14] - Tubesheet MDMT, tube side, if applicable

[15] - Nozzle Material

[16] - Shell or Head Material

UG-84(b)(2) was not considered.

UCS-66(g) was not considered.

UCS-66(i) was not considered.

**Notes:**

Impact test temps were not entered in and not considered in the analysis.

UCS-66(i) applies to impact tested materials not by specification and

UCS-66(g) applies to materials impact tested per UG-84.1 General Note (c).

The Basic MDMT includes the (30F) PWHT credit if applicable.

**ASME Code, Section VIII, Division 1, 2013**

Diameter Spec	:	20.000 in.	OD	
Vessel Design Length, Tangent to Tangent		5.33	ft.	
Distance of Bottom Tangent above Grade		0.00	ft.	
Distance of Base above Grade		0.00	ft.	
Specified Datum Line Distance		0.17	ft.	
Shell Material		SA-240	304L	
Internal Design Temperature		100	°F	
Internal Design Pressure		215.000	psig	
External Design Temperature		100	°F	
External Design Pressure		15.000	psig	
Maximum Allowable Working Pressure		150.000	psig	
External Max. Allowable Working Pressure		119.371	psig	
Hydrostatic Test Pressure		0.000	psig	
Required Minimum Design Metal Temperature		-20	°F	
Warmest Computed Minimum Design Metal Temperature		-320	°F	
Wind Design Code				ASCE-93
Earthquake Design Code				UBC-94

**Element Pressures and MAWP: psig**

Element Desc		Design Pres.		External		M.A.W.P		Corrosion
		+ Stat. head		Pressure				Allowance



Casquete Inferior	215.000	15.000	421.717	0.1250
Envolvente	215.000	15.000	421.717	0.1250
Casquete Superior	215.000	15.000	421.717	0.1250

Element Type	"To" Elev ft.	Length ft.	Element Thk in.	R e q d Int.	T h k Ext.	Joint Long	Eff Circ
Ellipse	0.00	0.167	0.375	0.250	0.219	1.00	1.00
Cylinder	5.00	5.000	0.375	0.253	0.233	1.00	1.00
Ellipse	5.17	0.167	0.375	0.250	0.219	1.00	1.00

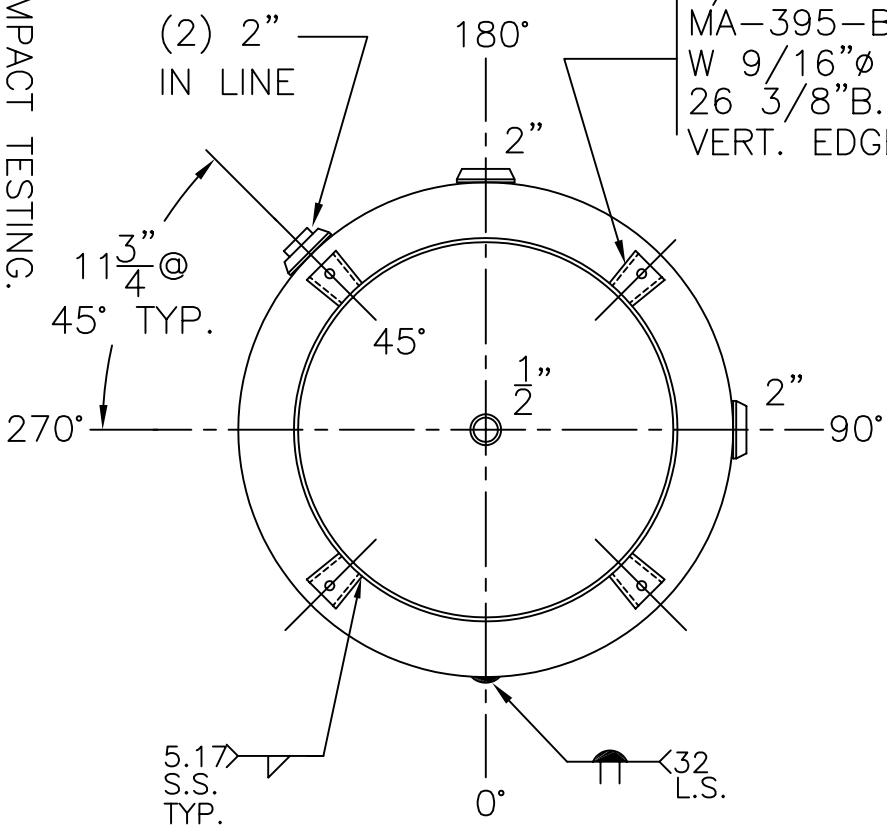
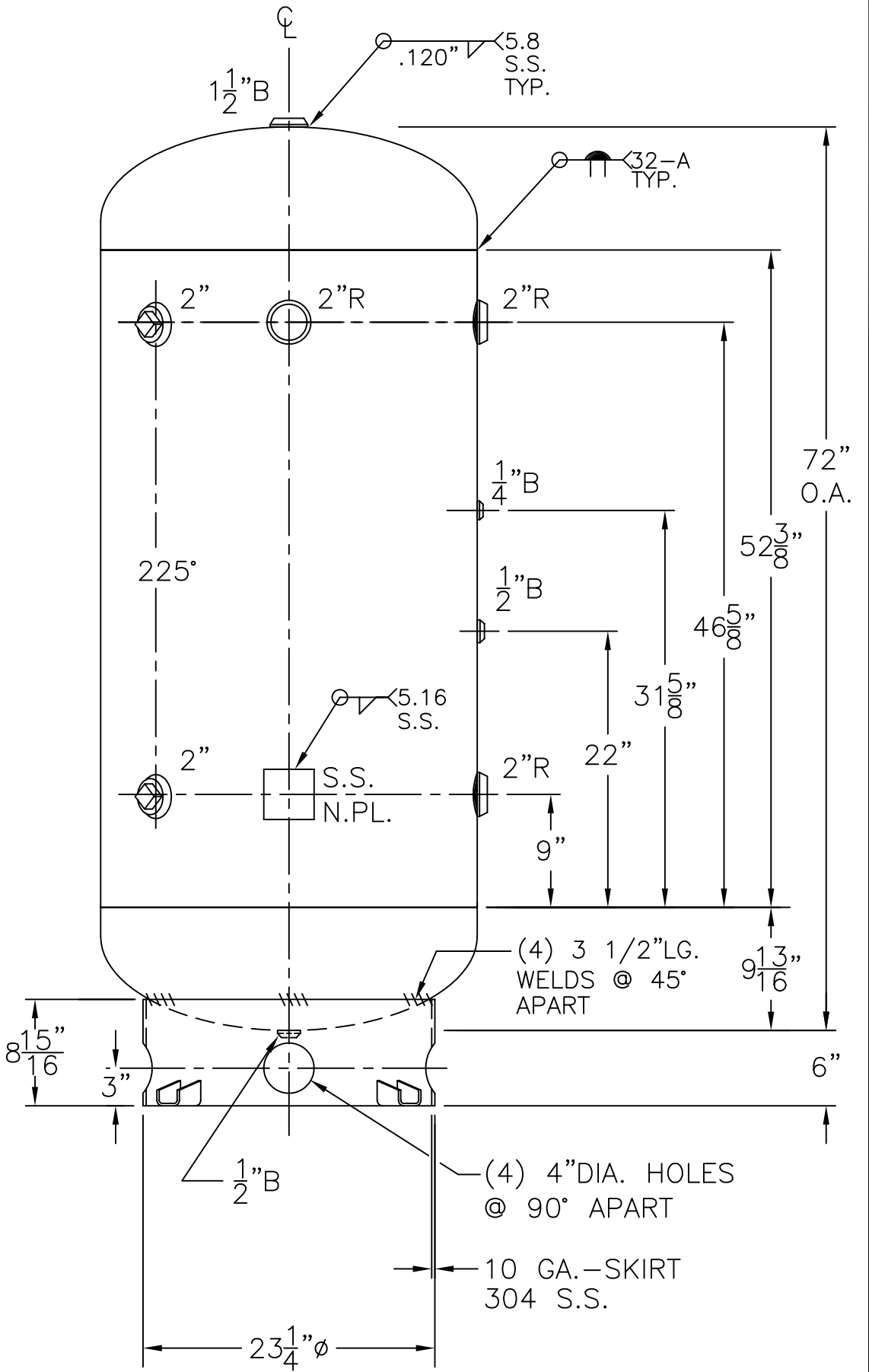
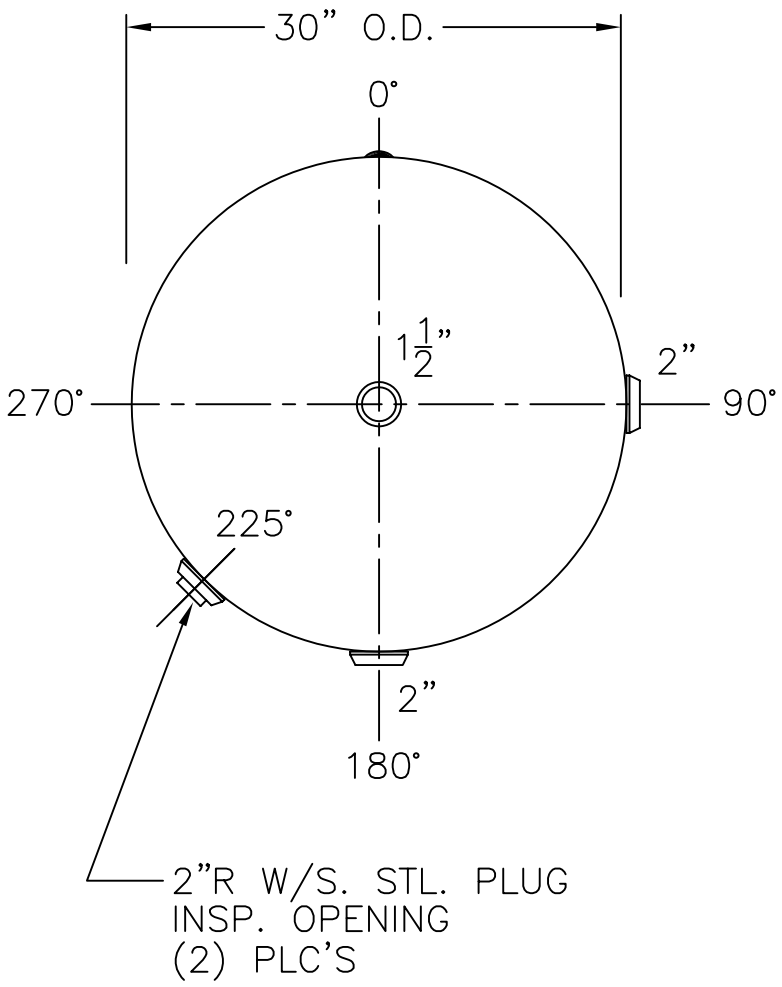
Element thicknesses are shown as Nominal if specified, otherwise are Minimum

Note: Wind and Earthquake moments include the effects of user defined

forces and moments if any exist in the job and were specified to act (compute loads and stresses) during these cases. Also included are moment effects due to eccentric weights if any are present in the input.

**Weights:**

Fabricated - Bare W/O Removable Internals	605.8	lbm
Shop Test - Fabricated + Water ( Full )	1345.8	lbm
Shipping - Fab. + Rem. Intls.+ Shipping App.	605.8	lbm
Erected - Fab. + Rem. Intls.+ Insul. (etc)	605.8	lbm
Empty - Fab. + Intls. + Details + Wghts.	605.8	lbm
Operating - Empty + Operating Liquid (No CA)	605.8	lbm
Field Test - Empty Weight + Water (Full)	1345.8	lbm



304 S.S. -  
 1/4" THK. CLIPS PER  
 MA-395-B (4) PLC'S  
 W 9/16" Ø HOLE ON  
 26 3/8" B.C.; WELD OUTSIDE  
 VERT. EDGE OF CLIP ONLY

- NOTE: 1) HYDRO @ 260 PSIG. MIN.  
 2) NPT ARE SA-182-304 S.S.  
 3) UHA-51 (e)(2) NO IMPACT TESTING.  
 4) 2"-R HAS 10"R

SHELL / HEADS		30-VA-200-R	
.1875" SA-240-304 S.S.		304 S.S.	
JOGGLED		REV. 12-30-11	
M.A.W.P. 200 PSIG. @ 200 °F		DATE: 7-10-06	
M.D.M.T. -155 °F @ 200 PSIG.		FOR: HANSON STANDARD	
ASME SECTION VIII DIV. 1, 2010 ADD 2011		VERT. AIR TANK	
X-RAY: RT-4 SPOT L.S. ONLY		INSIDE: UNPAINTED - PASSIVATE	
GALLONS: 200 WT. 473 LBS.		OUTSIDE: BEAD BLAST & PASSIVATE	
SERIAL NO.		BY: J.G. SCALE: 1"=12"	
N.B.		<b>ROY E. HANSON JR. MFG.</b>	
		1600 E. WASHINGTON BLVD.	
		LOS ANGELES, CA 90021	

# **APENDICE B**

**Memoria de Cálculo**

**Tanque de**

**Almacenamiento de Aire**

**y Oxígeno**

**PV Elite**

# Tabla de Contenidos

Cover Sheet .....	3
Title Page.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Warnings and Errors : .....	3
Input Echo : .....	4
XY Coordinate Calculations : .....	11
Internal Pressure Calculations : .....	12
External Pressure Calculations : .....	18
Element and Detail Weights : .....	23
Nozzle Flange MAWP : .....	27
Center of Gravity Calculation : .....	28
Nozzle Calcs. : C.....	29
Nozzle Calcs. : B.....	34
Nozzle Calcs. : A.....	39
Nozzle Schedule : .....	44
Nozzle Summary : .....	46
MDMT Summary : .....	48
Vessel Design Summary : .....	50

Tanque de Almacenamiento de Aire o de Oxígeno

DESIGN CALCULATION

In Accordance with ASME Section VIII Division 1

ASME Code Version : 2013

Class From To : Basic Element Checks.

=====

Class From To: Check of Additional Element Data

=====

There were no geometry errors or warnings.

**PV Elite Vessel Analysis Program: Input Data**

Cama de Adsorción N°1

Design Internal Pressure (for Hydrotest)	215.00	psig
Design Internal Temperature	100	°F
Type of Hydrotest	not Specified	
Hydrotest Position	Vertical	
Projection of Nozzle from Vessel Top	0.0000	in.
Projection of Nozzle from Vessel Bottom	0.0000	in.
Minimum Design Metal Temperature	-20	°F
Type of Construction	Welded	
Special Service	Air/Water/Steam	
Degree of Radiography	RT 1	
Miscellaneous Weight Percent	0.0	
Use Higher Longitudinal Stresses (Flag)	Y	
Select t for Internal Pressure (Flag)	N	
Select t for External Pressure (Flag)	N	
Select t for Axial Stress (Flag)	N	
Select Location for Stiff. Rings (Flag)	N	
Consider Vortex Shedding	N	
Perform a Corroded Hydrotest	N	
Is this a Heat Exchanger	No	
User Defined Hydro. Press. (Used if > 0)	0.0000	psig
User defined MAWP	150.00	psig
User defined MAPnc	0.0000	psig
Load Case 1	NP+EW+WI+FW+BW	
Load Case 2	NP+EW+EE+FS+BS	
Load Case 3	NP+OW+WI+FW+BW	

Load Case 4		NP+OW+EQ+FS+BS	
Load Case 5		NP+HW+HI	
Load Case 6		NP+HW+HE	
Load Case 7		IP+OW+WI+FW+BW	
Load Case 8		IP+OW+EQ+FS+BS	
Load Case 9		EP+OW+WI+FW+BW	
Load Case 10		EP+OW+EQ+FS+BS	
Load Case 11		HP+HW+HI	
Load Case 12		HP+HW+HE	
Load Case 13		IP+WE+EW	
Load Case 14		IP+WF+CW	
Load Case 15		IP+VO+OW	
Load Case 16		IP+VE+EW	
Load Case 17		NP+VO+OW	
Load Case 18		FS+BS+IP+OW	
Load Case 19		FS+BS+EP+OW	
Wind Design Code		ASCE-7 93	
Basic Wind Speed	[V]	70.000	mile/hr
Surface Roughness Category		C: Open Terrain	
Importance Factor		1.0	
Type of Surface		Moderately Smooth	
Base Elevation		0.0000	ft.
Percent Wind for Hydrotest		33.0	
Using User defined Wind Press. Vs Elev.		N	
Damping Factor (Beta) for Wind (Ope)		0.0100	
Damping Factor (Beta) for Wind (Empty)		0.0000	
Damping Factor (Beta) for Wind (Filled)		0.0000	
Seismic Design Code		UBC 94	
UBC Seismic Zone (1=1,2=2a,3=2b,4=3,5=4)		0.000	
UBC Importance Factor		1.000	

UBC Soil Type	S1
UBC Horizontal Force Factor	3.000
UBC Percent Seismic for Hydrotest	0.000
Design Nozzle for Des. Press. + St. Head	Y
Consider MAP New and Cold in Noz. Design	N
Consider External Loads for Nozzle Des.	Y
Use ASME VIII-1 Appendix 1-9	N
Material Database Year	Current w/Addenda or Code Year

**Configuration Directives:**

Do not use Nozzle MDMT Interpretation VIII-1 01-37	No
Use Table G instead of exact equation for "A"	Yes
Shell Head Joints are Tapered	Yes
Compute "K" in corroded condition	Yes
Use Code Case 2286	No
Use the MAWP to compute the MDMT	Yes
Using Metric Material Databases, ASME II D	No

**Complete Listing of Vessel Elements and Details:**

Element From Node	10
Element To Node	20
Element Type	Elliptical
Description	Casquete Inferior
Distance "FROM" to "TO"	0.1667 ft.
Element Outside Diameter	30.000 in.
Element Thickness	0.3750 in.
Internal Corrosion Allowance	0.1250 in.



Nominal Thickness	0.3750 in.
External Corrosion Allowance	0.0000 in.
Design Internal Pressure	215.00 psig
Design Temperature Internal Pressure	100 °F
Design External Pressure	15.000 psig
Design Temperature External Pressure	100 °F
Effective Diameter Multiplier	1.2
Material Name	SA-240 304L
Allowable Stress, Ambient	16700. psi
Allowable Stress, Operating	16700. psi
Allowable Stress, Hydrotest	21710. psi
Material Density	0.2900 lb./in <sup>3</sup>
P Number Thickness	0.0000 in.
Yield Stress, Operating	25000. psi
External Pressure Chart Name	HA-3
UNS Number	S30403
Product Form	Plate
Efficiency, Longitudinal Seam	1.0
Efficiency, Circumferential Seam	1.0
Elliptical Head Factor	2.0

-----

Element From Node	20
Element To Node	30
Element Type	Cylinder
Description	Envolvente
Distance "FROM" to "TO"	6.0000 ft.
Element Outside Diameter	30.000 in.
Element Thickness	0.3750 in.
Internal Corrosion Allowance	0.1250 in.
Nominal Thickness	0.3750 in.

External Corrosion Allowance	0.0000	in.
Design Internal Pressure	215.00	psig
Design Temperature Internal Pressure	100	°F
Design External Pressure	15.000	psig
Design Temperature External Pressure	100	°F
Effective Diameter Multiplier	1.2	
Material Name	SA-240 304L	
Efficiency, Longitudinal Seam	1.0	
Efficiency, Circumferential Seam	1.0	

Element From Node	20	
Detail Type	Nozzle	
Detail ID	C	
Dist. from "FROM" Node / Offset dist	0.5000	ft.
Nozzle Diameter	2.0	in.
Nozzle Schedule	160	
Nozzle Class	150	
Layout Angle	270.0	
Blind Flange (Y/N)	N	
Weight of Nozzle ( Used if > 0 )	0.0000	lb.
Grade of Attached Flange	GR 2.1	
Nozzle Matl	SA-240 304L	

Element From Node	20	
Detail Type	Nozzle	
Detail ID	B	
Dist. from "FROM" Node / Offset dist	5.0000	ft.
Nozzle Diameter	2.0	in.
Nozzle Schedule	160	
Nozzle Class	150	
Layout Angle	0.0	
Blind Flange (Y/N)	N	

Weight of Nozzle ( Used if > 0 )	0.0000 lb.
Grade of Attached Flange	GR 2.1
Nozzle Matl	SA-240 304L

-----

Element From Node	30
Element To Node	40
Element Type	Elliptical
Description	Casquete Superior
Distance "FROM" to "TO"	0.1667 ft.
Element Outside Diameter	30.000 in.
Element Thickness	0.3750 in.
Internal Corrosion Allowance	0.1250 in.
Nominal Thickness	0.3750 in.
External Corrosion Allowance	0.0000 in.
Design Internal Pressure	215.00 psig
Design Temperature Internal Pressure	100 °F
Design External Pressure	15.000 psig
Design Temperature External Pressure	100 °F
Effective Diameter Multiplier	1.2
Material Name	SA-240 304L
Efficiency, Longitudinal Seam	1.0
Efficiency, Circumferential Seam	1.0
Elliptical Head Factor	2.0

Element From Node	30
Detail Type	Nozzle
Detail ID	A
Dist. from "FROM" Node / Offset dist	0.0000 in.
Nozzle Diameter	1.0 in.
Nozzle Schedule	160

Nozzle Class	None
Layout Angle	0.0
Blind Flange (Y/N)	N
Weight of Nozzle ( Used if > 0 )	0.0000 lb.
Grade of Attached Flange	None
Nozzle Matl	SA-240 304L

**XY Coordinate Calculations**

From	To	X (Horiz.) ft.	Y (Vert.) ft.	DX (Horiz.) ft.	DY (Vert.) ft.
-----					
Casquete I		...	0.16667	...	0.16667
Envolvente		...	6.16667	...	6.00000
Casquete S		...	6.33333	...	0.16667

**Element Thickness, Pressure, Diameter and Allowable Stress :**

	Int. Press	Nominal	Total Corr	Element	Allowable
From	To + Liq. Hd	Thickness	Allowance	Diameter	Stress(SE)
	psig	in.	in.	in.	psi
-----					
Casquete I	215.000	0.37500	0.12500	30.0000	16700.0
Envolvente	215.000	0.37500	0.12500	30.0000	16700.0
Casquete S	215.000	0.37500	0.12500	30.0000	16700.0

**Element Required Thickness and MAWP :**

	Design	M.A.W.P.	M.A.P.	Minimum	Required
From	To Pressure	Corroded	New & Cold	Thickness	Thickness
	psig	psig	psig	in.	in.
-----					
Casquete I	215.000	280.201	427.110	0.37500	0.31380
Envolvente	215.000	280.201	421.717	0.37500	0.31712
Casquete S	215.000	280.201	427.110	0.37500	0.31380
Minimum		150.000	275.000		

*Note : The M.A.P. (NC) is Governed by a Flange !*

MAWP: 150.000 psig, limited by: DESIGN (user specified)

**Internal Pressure Calculation Results :**

**ASME Code, Section VIII, Division 1, 2013**

**Elliptical Head From 10 To 20 SA-240 304L at 100 °F**

## Casquete Inferior

Material UNS Number: S30403

Required Thickness due to Internal Pressure [tr]:

$$\begin{aligned}
 &= (P \cdot D_o \cdot K_{cor}) / (2 \cdot S \cdot E + 2 \cdot P \cdot (K_{cor} - 0.1)) \text{ per Appendix 1-4 (c)} \\
 &= (215.000 \cdot 30.0000 \cdot 0.989) / (2 \cdot 16700.00 \cdot 1.00 + 2 \cdot 215.000 \cdot (0.989 - 0.1)) \\
 &= 0.1888 + 0.1250 = 0.3138 \text{ in.}
 \end{aligned}$$

Max. Allowable Working Pressure at given Thickness, corroded [MAWP]:

$$\begin{aligned}
 &= (2 \cdot S \cdot E \cdot t) / (K_{cor} \cdot D_o - 2 \cdot t \cdot (K_{cor} - 0.1)) \text{ per Appendix 1-4 (c)} \\
 &= (2 \cdot 16700.00 \cdot 1.00 \cdot 0.2500) / (0.989 \cdot 30.0000 - 2 \cdot 0.2500 \cdot (0.989 - 0.1)) \\
 &= 285.755 \text{ psig}
 \end{aligned}$$

Maximum Allowable Pressure, New and Cold [MAPNC]:

$$\begin{aligned}
 &= (2 \cdot S \cdot E \cdot t) / (K \cdot D_o - 2 \cdot t \cdot (K - 0.1)) \text{ per Appendix 1-4 (c)} \\
 &= (2 \cdot 16700.00 \cdot 1.00 \cdot 0.3750) / (1.000 \cdot 30.0000 - 2 \cdot 0.3750 \cdot (1.000 - 0.1)) \\
 &= 427.110 \text{ psig}
 \end{aligned}$$

Actual stress at given pressure and thickness, corroded [Sact]:

$$\begin{aligned}
 &= (P \cdot (K_{cor} \cdot D_o - 2 \cdot t \cdot (K_{cor} - 0.1))) / (2 \cdot E \cdot t) \\
 &= (215.000 \cdot (0.989 \cdot 30.0000 - 2 \cdot 0.2500 \cdot (0.989 - 0.1))) / (2 \cdot 1.00 \cdot 0.2500) \\
 &= 12564.969 \text{ psi}
 \end{aligned}$$

Straight Flange Required Thickness:

$$\begin{aligned}
 &= (P \cdot R_o) / (S \cdot E + 0.4 \cdot P) + c_a \text{ per Appendix 1-1 (a) (1)} \\
 &= (215.000 \cdot 15.0000) / (16700.00 \cdot 1.00 + 0.4 \cdot 215.000) + 0.125 \\
 &= 0.317 \text{ in.}
 \end{aligned}$$

Straight Flange Maximum Allowable Working Pressure:

$$\begin{aligned}
 &= (S \cdot E \cdot t) / (R_o - 0.4 \cdot t) \text{ per Appendix 1-1 (a) (1)} \\
 &= (16700.00 \cdot 1.00 \cdot 0.2500) / (15.0000 - 0.4 \cdot 0.2500) \\
 &= 280.201 \text{ psig}
 \end{aligned}$$

Factor K, corroded condition [Kcor]:

$$\begin{aligned}
 &= ( 2 + ( \text{Inside Diameter} / ( 2 * \text{Inside Head Depth} ) )^2 ) / 6 \\
 &= ( 2 + ( 29.500 / ( 2 * 7.438 ) )^2 ) / 6 \\
 &= 0.988843
 \end{aligned}$$

Percent Elongation per UHA-44  $(75 \cdot t_{nom} / R_f) \cdot (1 - R_f / R_o)$  5.451 %

Note: Please Check Requirements of Table UHA-44 for Elongation limits.

SA-240 304L, Min Metal Temp without impact per UHA-51: -320 °F

### **Cylindrical Shell From 20 To 30 SA-240 304L at 100 °F**

Envolvente

Material UNS Number: S30403

Required Thickness due to Internal Pressure [tr]:

$$\begin{aligned}
 &= (P \cdot R_o) / (S \cdot E + 0.4 \cdot P) \text{ per Appendix 1-1 (a) (1)} \\
 &= (215.000 \cdot 15.0000) / (16700.00 \cdot 1.00 + 0.4 \cdot 215.000) \\
 &= 0.1921 + 0.1250 = 0.3171 \text{ in.}
 \end{aligned}$$

Max. Allowable Working Pressure at given Thickness, corroded [MAWP]:

$$\begin{aligned}
 &= (S \cdot E \cdot t) / (R_o - 0.4 \cdot t) \text{ per Appendix 1-1 (a) (1)} \\
 &= (16700.00 \cdot 1.00 \cdot 0.2500) / (15.0000 - 0.4 \cdot 0.2500) \\
 &= 280.201 \text{ psig}
 \end{aligned}$$

Maximum Allowable Pressure, New and Cold [MAPNC]:



$$\begin{aligned}
 &= (S \cdot E \cdot t) / (R_o - 0.4 \cdot t) \text{ per Appendix 1-1 (a) (1)} \\
 &= (16700.00 \cdot 1.00 \cdot 0.3750) / (15.0000 - 0.4 \cdot 0.3750) \\
 &= 421.717 \text{ psig}
 \end{aligned}$$

Actual stress at given pressure and thickness, corroded [Sact]:

$$\begin{aligned}
 &= (P \cdot (R_o - 0.4 \cdot t)) / (E \cdot t) \\
 &= (215.000 \cdot (15.0000 - 0.4 \cdot 0.2500)) / (1.00 \cdot 0.2500) \\
 &= 12814.000 \text{ psi}
 \end{aligned}$$

Percent Elongation per UHA-44  $(50 \cdot t_{nom} / R_f) \cdot (1 - R_f / R_o)$  1.266 %

Note: Please Check Requirements of Table UHA-44 for Elongation limits.

SA-240 304L, Min Metal Temp without impact per UHA-51: -320 °F

### **Elliptical Head From 30 To 40 SA-240 304L at 100 °F**

Casquete Superior

Material UNS Number: S30403

Required Thickness due to Internal Pressure [tr]:

$$\begin{aligned}
 &= (P \cdot D_o \cdot K_{cor}) / (2 \cdot S \cdot E + 2 \cdot P \cdot (K_{cor} - 0.1)) \text{ per Appendix 1-4 (c)} \\
 &= (215.000 \cdot 30.0000 \cdot 0.989) / (2 \cdot 16700.00 \cdot 1.00 + 2 \cdot 215.000 \cdot (0.989 - 0.1)) \\
 &= 0.1888 + 0.1250 = 0.3138 \text{ in.}
 \end{aligned}$$

Max. Allowable Working Pressure at given Thickness, corroded [MAWP]:

$$\begin{aligned}
 &= (2 \cdot S \cdot E \cdot t) / (K_{cor} \cdot D_o - 2 \cdot t \cdot (K_{cor} - 0.1)) \text{ per Appendix 1-4 (c)} \\
 &= (2 \cdot 16700.00 \cdot 1.00 \cdot 0.2500) / (0.989 \cdot 30.0000 - 2 \cdot 0.2500 \cdot (0.99 - 0.1)) \\
 &= 285.755 \text{ psig}
 \end{aligned}$$

Maximum Allowable Pressure, New and Cold [MAPNC]:

$$\begin{aligned}
 &= (2 * S * E * t) / (K * D_o - 2 * t * (K - 0.1)) \text{ per Appendix 1-4 (c)} \\
 &= (2 * 16700.00 * 1.00 * 0.3750) / (1.000 * 30.0000 - 2 * 0.3750 * (1.000 - 0.1)) \\
 &= 427.110 \text{ psig}
 \end{aligned}$$

Actual stress at given pressure and thickness, corroded [Sact]:

$$\begin{aligned}
 &= (P * (K_{cor} * D_o - 2 * t * (K_{cor} - 0.1))) / (2 * E * t) \\
 &= (215.000 * (0.989 * 30.0000 - 2 * 0.2500 * (0.989 - 0.1))) / (2 * 1.00 * 0.2500) \\
 &= 12564.969 \text{ psi}
 \end{aligned}$$

Straight Flange Required Thickness:

$$\begin{aligned}
 &= (P * R_o) / (S * E + 0.4 * P) + c_a \text{ per Appendix 1-1 (a) (1)} \\
 &= (215.000 * 15.0000) / (16700.00 * 1.00 + 0.4 * 215.000) + 0.125 \\
 &= 0.317 \text{ in.}
 \end{aligned}$$

Straight Flange Maximum Allowable Working Pressure:

$$\begin{aligned}
 &= (S * E * t) / (R_o - 0.4 * t) \text{ per Appendix 1-1 (a) (1)} \\
 &= (16700.00 * 1.00 * 0.2500) / (15.0000 - 0.4 * 0.2500) \\
 &= 280.201 \text{ psig}
 \end{aligned}$$

Factor K, corroded condition [Kcor]:

$$\begin{aligned}
 &= ( 2 + ( \text{Inside Diameter} / ( 2 * \text{Inside Head Depth} ) )^2 ) / 6 \\
 &= ( 2 + ( 29.500 / ( 2 * 7.438 ) )^2 ) / 6 \\
 &= 0.988843
 \end{aligned}$$

Percent Elongation per UHA-44  $(75 * t_{nom} / R_f) * (1 - R_f / R_o)$  5.451 %

Note: Please Check Requirements of Table UHA-44 for Elongation limits.

SA-240 304L, Min Metal Temp without impact per UHA-51: -320 °F

Elements Suitable for Internal Pressure.



**External Pressure Calculation Results :****ASME Code, Section VIII, Division 1, 2013****Elliptical Head From 10 to 20 Ext. Chart: HA-3 at 100 °F**

## Casquete Inferior

Elastic Modulus from Chart: HA-3 at 100 °F : 0.280E+08 psi

Results for Maximum Allowable External Pressure (MAEP):

Tca	OD	D/t	Factor A	B
0.250	30.00	120.00	0.0011574	9155.31

$$EMAP = B / (K_0 * D / t) = 9155.3135 / (0.9000 * 120.0000) = 84.7714 \text{ psig}$$

Results for Required Thickness (Tca):

Tca	OD	D/t	Factor A	B
0.079	30.00	379.50	0.0003660	5123.71

$$EMAP = B / (K_0 * D / t) = 5123.7070 / (0.9000 * 379.4995) = 15.0014 \text{ psig}$$

*Check the requirements of UG-33(a)(1) using  $P = 1.67 * \text{External Design pressure for this head.}$*

Material UNS Number: S30403

Required Thickness due to Internal Pressure [tr]:

$$\begin{aligned}
 &= (P * D * K_{cor}) / (2 * S * E - 0.2 * P) \text{ Appendix 1-4(c)} \\
 &= (25.050 * 29.5000 * 0.989) / (2 * 16700.00 * 1.00 - 0.2 * 25.050) \\
 &= 0.0219 + 0.1250 = 0.1469 \text{ in.}
 \end{aligned}$$

Max. Allowable Working Pressure at given Thickness, corroded [MAWP]:

$$= ((2*S*E*t)/(Kcor*D+0.2*t))/1.67 \text{ per Appendix 1-4 (c)}$$

$$= ((2*16700.00*1.00*0.2500)/(0.989*29.5000+0.2*0.2500))/1.67$$

$$= 171.111 \text{ psig}$$

Maximum Allowable External Pressure [MAEP]:

$$= \min( \text{MAEP}, \text{MAWP} )$$

$$= \min( 84.77 , 171.1107 )$$

$$= 84.771 \text{ psig}$$

*Thickness requirements per UG-33(a)(1) govern the required thickness of this head.*

### **Cylindrical Shell From 20 to 30 Ext. Chart: HA-3 at 100 °F**

Envolvente

Elastic Modulus from Chart: HA-3 at 100 °F : 0.280E+08 psi

Results for Maximum Allowable External Pressure (MAEP):

Tca	OD	SLEN	D/t	L/D	Factor A	B
0.250	30.00	80.88	120.00	2.6958	0.0003579	5010.94

$$\text{EMAP} = (4*B)/(3*(D/t)) = (4*5010.9443)/(3*120.0000) = 55.6772 \text{ psig}$$

Results for Required Thickness (Tca):

Tca	OD	SLEN	D/t	L/D	Factor A	B
0.148	30.00	80.88	202.89	2.6958	0.0001630	2282.60

$$\text{EMAP} = (4*B)/(3*(D/t)) = (4*2282.6033)/(3*202.8899) = 15.0006 \text{ psig}$$

Results for Maximum Stiffened Length (Slen):

Tca	OD	SLEN	D/t	L/D	Factor A	B
-----	----	------	-----	-----	----------	---

0.250      30.00      275.17      120.00      9.1722      0.0000965      1351.55

$$EMAP = (4*B) / (3*(D/t)) = (4*1351.5450) / (3*120.0000) = 15.0172 \text{ psig}$$

### **Elliptical Head From 30 to 40 Ext. Chart: HA-3 at 100 °F**

#### Casquete Superior

Elastic Modulus from Chart: HA-3 at 100 °F : 0.280E+08 psi

Results for Maximum Allowable External Pressure (MAEP):

Tca	OD	D/t	Factor A	B
0.250	30.00	120.00	0.0011574	9155.31

$$EMAP = B / (K_0 * D/t) = 9155.3135 / (0.9000 * 120.0000) = 84.7714 \text{ psig}$$

Results for Required Thickness (Tca):

Tca	OD	D/t	Factor A	B
0.079	30.00	379.50	0.0003660	5123.71

$$EMAP = B / (K_0 * D/t) = 5123.7070 / (0.9000 * 379.4995) = 15.0014 \text{ psig}$$

*Check the requirements of UG-33(a)(1) using  $P = 1.67 * \text{External Design pressure for this head.}$*

Material UNS Number: S30403

Required Thickness due to Internal Pressure [tr]:

$$= (P * D * K_{cor}) / (2 * S * E - 0.2 * P) \text{ Appendix 1-4 (c)}$$

$$= (25.050 * 29.5000 * 0.989) / (2 * 16700.00 * 1.00 - 0.2 * 25.050)$$

$$= 0.0219 + 0.1250 = 0.1469 \text{ in.}$$

Max. Allowable Working Pressure at given Thickness, corroded [MAWP]:

$$= ((2 * S * E * t) / (K_{cor} * D + 0.2 * t)) / 1.67 \text{ per Appendix 1-4 (c)}$$

$$= ((2*16700.00*1.00*0.2500)/(0.989*29.5000+0.2*0.2500))/1.67$$

$$= 171.111 \text{ psig}$$

Maximum Allowable External Pressure [MAEP]:

$$= \min( \text{MAEP}, \text{MAWP} )$$

$$= \min( 84.77 , 171.1107 )$$

$$= 84.771 \text{ psig}$$

*Thickness requirements per UG-33(a)(1) govern the required thickness of this head.*

**External Pressure Calculations**

From	To	Section Length	Outside Diameter	Corroded Thickness	Factor A	Factor B
		ft.	in.	in.		psi
10	20	No Calc	30.0000	0.25000	0.0011574	9155.31
20	30	6.73958	30.0000	0.25000	0.00035792	5010.94
30	40	No Calc	30.0000	0.25000	0.0011574	9155.31

**External Pressure Calculations**

From	To	External Actual T.	External Required T.	External Des. Press.	External M.A.W.P.
		in.	in.	psig	psig
10	20	0.37500	0.21875	15.0000	84.7714
20	30	0.37500	0.27286	15.0000	55.6772
30	40	0.37500	0.21875	15.0000	84.7714
Minimum					55.677

**External Pressure Calculations**

		Actual Len.	Allow. Len.	Ring Inertia	Ring Inertia
From	To	Bet. Stiff.	Bet. Stiff.	Required	Available
		ft.	ft.	in**4	in**4
-----					
10	20	No Calc	No Calc	No Calc	No Calc
20	30	6.73958	22.9305	No Calc	No Calc
30	40	No Calc	No Calc	No Calc	No Calc

Elements Suitable for External Pressure.



**Element and Detail Weights**

From	To	Element Metal Wgt. lb.	Element ID Volume in <sup>3</sup>	Corroded Metal Wgt. lb.	Corroded ID Volume in <sup>3</sup>	Extra due Misc %
10	20	134.474	4619.71	89.6496	4727.49	...
20	30	728.735	48380.9	487.873	49211.5	...
30	40	134.474	4619.71	89.6496	4727.49	...
Total		997	57620	667	58666	0

**Weight of Details**

From	Type	Weight of Detail lb.	X Offset, Dtl. Cent. ft.	Y Offset, Dtl. Cent. ft.	Description
20	Noz1	7.66660	1.28904	0.50000	C
20	Noz1	7.66660	1.28904	5.00000	B
30	Noz1	0.97028	...	1.60938	A

**Total Weight of Each Detail Type**

Total Weight of Nozzles	16.3
-----	
Sum of the Detail Weights	16.3 lb.

**Weight Summation**

Fabricated	Shop Test	Shipping	Erected	Empty	Operating
997.7	1014.0	997.7	1014.0	997.7	1014.0
...	2080.7	...	...	...	...
16.3	...	16.3	...	...	...
...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	16.3	...
1014.0	3094.7	1014.0	1014.0	1014.0	1014.0 lb.

*Note: The shipping total has been modified because some items have been specified as being installed in the shop.*

**Weight Summary**

Fabricated Wt.	- Bare Weight W/O Removable Internals	1014.0 lb.
Shop Test Wt.	- Fabricated Weight + Water ( Full )	3094.7 lb.
Shipping Wt.	- Fab. Wt + Rem. Intls.+ Shipping App.	1014.0 lb.
Erected Wt.	- Fab. Wt + Rem. Intls.+ Insul. (etc)	1014.0 lb.
Ope. Wt. no Liq	- Fab. Wt + Intls. + Details + Wghts.	1014.0 lb.
Operating Wt.	- Empty Wt + Operating Liq. Uncorroded	1014.0 lb.
Field Test Wt.	- Empty Weight + Water (Full)	3094.7 lb.
Mass of the Upper 1/3 of the Vertical Vessel		256.4 lb.

**Outside Surface Areas of Elements**

From	To	Surface Area
		Surface

		in <sup>2</sup>	
10	20	1164.08	
20	30	6785.84	
30	40	1164.08	
-----			
Total		9114.005 in <sup>2</sup>	[63.3 Square Feet ]

**Element and Detail Weights**

From	To	Total Ele. Empty Wgt. lbm	Total. Ele. Oper. Wgt. lbm	Total. Ele. Hydro. Wgt. lbm	Total Dtl. Offset Mom. ft.lb.	Oper. Wgt. No Liquid lbm
10	20	134.474	134.474	134.474	...	134.474
20	30	744.068	744.068	744.068	19.7651	744.068
30	40	135.445	135.445	135.445	...	135.445

**Cumulative Vessel Weight**

From	To	Cumulative Ope Wgt. No Liquid lbm	Cumulative Oper. Wgt. lbm	Cumulative Hydro. Wgt. lbm
10	20	1013.99	1013.99	1013.99
20	30	879.513	879.513	879.513
30	40	135.445	135.445	135.445

Note: The cumulative operating weights no liquid in the column above are the cumulative operating weights minus the operating liquid weight minus any weights absent in the empty condition.

**Cumulative Vessel Moment**

		Cumulative	Cumulative	Cumulative
From	To	Empty Mom.	Oper. Mom.	Hydro. Mom.
		ft.lb.	ft.lb.	ft.lb.
-----				
10	20	19.7651	19.7651	19.7651
20	30	19.7651	19.7651	19.7651
30	40	...	...	...

**Nozzle Flange MAWP Results :**

Nozzle	----- Flange Rating				
Description	Operating	Ambient	Temperature	Class	Grade Group
	psig	psig	°F		
-----					
C	275.0	275.0	100	150	GR 2.1
B	275.0	275.0	100	150	GR 2.1
-----					
Minimum Rating	275.000	275.000	psig	(for Core Elements)	

Note: ANSI Ratings are per ANSI/ASME B16.5 2009 Edition

**Shop/Field Installation Options :**

Note : The CG is computed from the first Element From Node

Center of Gravity of Nozzles	3.206 ft.
Center of Gravity of Bare Shell New and Cold	3.167 ft.
Center of Gravity of Bare Shell Corroded	3.167 ft.
Vessel CG in the Operating Condition	3.168 ft.
Vessel CG in the Fabricated (Shop/Empty) Condition	3.167 ft.

**INPUT VALUES, Nozzle Description: C****From : 20**

Pressure for Reinforcement Calculations	P	215.000	psig
Temperature for Internal Pressure	Temp	100	°F
Design External Pressure	Pext	15.00	psig
Temperature for External Pressure	Tempex	100	°F
Shell Material		SA-240	304L
Shell Allowable Stress at Temperature	S	16700.00	psi
Shell Allowable Stress At Ambient	Sa	16700.00	psi
Inside Diameter of Cylindrical Shell	D	29.2500	in.
Design Length of Section	L	80.8750	in.
Shell Finished (Minimum) Thickness	t	0.3750	in.
Shell Internal Corrosion Allowance	c	0.1250	in.
Shell External Corrosion Allowance	co	0.0000	in.
Distance from Bottom/Left Tangent		0.6667	ft.
User Entered Minimum Design Metal Temperature		-20.00	°F

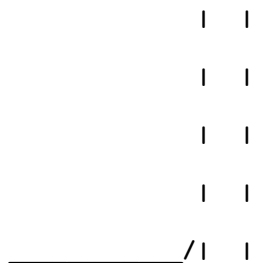
**Type of Element Connected to the Shell : Nozzle**

Material		SA-240	304L
Material UNS Number		S30403	
Material Specification/Type		Plate	
Allowable Stress at Temperature	Sn	16700.00	psi
Allowable Stress At Ambient	Sna	16700.00	psi
Diameter Basis (for tr calc only)		ID	

Layout Angle		270.00	deg
Diameter		2.0000	in.
Size and Thickness Basis		Nominal	
Nominal Thickness	tn	160	
Flange Material		SA-182 F304	
Flange Type		Threaded	
Corrosion Allowance	can	0.1250	in.
Joint Efficiency of Shell Seam at Nozzle	E1	1.00	
Joint Efficiency of Nozzle Neck	En	1.00	
Outside Projection	ho	0.1000	in.
Weld leg size between Nozzle and Pad/Shell	Wo	0.3750	in.
Groove weld depth between Nozzle and Vessel	Wgnv	0.3750	in.
Inside Projection	h	0.0000	in.
Weld leg size, Inside Element to Shell	Wi	0.0000	in.
ASME Code Weld Type per UW-16		None	
Class of attached Flange		150	
Grade of attached Flange		GR 2.1	

The Pressure Design option was Design Pressure + static head.

**Nozzle Sketch (may not represent actual weld type/configuration)**





\	
\	
\_\_\_\_\_ \|\_\_	

### Insert/Set-in Nozzle No Pad, no Inside projection

### Reinforcement CALCULATION, Description: C

ASME Code, Section VIII, Div. 1, 2013, UG-37 to UG-45

Actual Inside Diameter Used in Calculation	1.687 in.
Actual Thickness Used in Calculation	0.344 in.

Nozzle input data check completed without errors.

Reqd thk per UG-37(a) of Cylindrical Shell, Tr [Int. Press]

$$\begin{aligned}
 &= (P \cdot R) / (S \cdot E - 0.6 \cdot P) \text{ per UG-27 (c) (1)} \\
 &= (215.00 \cdot 14.7500) / (16700 \cdot 1.00 - 0.6 \cdot 215.00) \\
 &= 0.1914 \text{ in.}
 \end{aligned}$$

Reqd thk per UG-37(a) of Nozzle Wall, Trn [Int. Press]

$$\begin{aligned}
 &= (P \cdot R) / (S \cdot E - 0.6 \cdot P) \text{ per UG-27 (c) (1)} \\
 &= (215.00 \cdot 0.97) / (16700 \cdot 1.00 - 0.6 \cdot 215.00) \\
 &= 0.0126 \text{ in.}
 \end{aligned}$$

Required Nozzle thickness under External Pressure per UG-28 : 0.0028 in.

### UG-40, Limits of Reinforcement : [External Pressure]

Parallel to Vessel Wall (Diameter Limit)	D1	3.8740 in.
Parallel to Vessel Wall, opening length	d	1.9370 in.
Normal to Vessel Wall (Thickness Limit), no pad	Tlnp	0.5475 in.

Note:

Taking a UG-36(c)(3)(a) exemption for nozzle: C.

This calculation is valid for nozzles that meet all the requirements of paragraph UG-36. Please check the Code carefully, especially for nozzles that are not isolated or do not meet Code spacing requirements. To force the computation of areas for small nozzles go to Tools->Configuration and check the box to force the UG-37 small nozzle area calculation or force the Appendix 1-10 computation in Nozzle Design Options.

#### UG-45 Minimum Nozzle Neck Thickness Requirement: [Int. Press.]

Wall Thickness for Internal/External pressures  $t_a = 0.1376$  in.

Wall Thickness per UG16(b),  $t_{r16b} = 0.2188$  in.

Wall Thickness, shell/head, internal pressure  $t_{rb1} = 0.3164$  in.

Wall Thickness  $t_{b1} = \max(t_{rb1}, t_{r16b}) = 0.3164$  in.

Wall Thickness, shell/head, external pressure  $t_{rb2} = 0.1383$  in.

Wall Thickness  $t_{b2} = \max(t_{rb2}, t_{r16b}) = 0.2188$  in.

Wall Thickness per table UG-45  $t_{b3} = 0.2596$  in.

Determine Nozzle Thickness candidate [tb]:

$$= \min[ t_{b3}, \max( t_{b1}, t_{b2} ) ]$$

$$= \min[ 0.260, \max( 0.3164, 0.2188 ) ]$$

$$= 0.2596 \text{ in.}$$

Minimum Wall Thickness of Nozzle Necks [tUG-45]:

$$= \max( t_a, t_b )$$

$$= \max( 0.1376, 0.2596 )$$

$$= 0.2596 \text{ in.}$$

Available Nozzle Neck Thickness =  $0.875 * 0.344 = 0.301$  in. --> OK

SA-240 304L, Min Metal Temp without impact per UHA-51: -320 °F

Weld Size Calculations, Description: C

Intermediate Calc. for nozzle/shell Welds    Tmin        0.2190    in.

**Results Per UW-16.1:**

	Required Thickness	Actual Thickness
Nozzle Weld	$0.1533 = 0.7 * t_{min.}$	$0.2651 = 0.7 * W_o \text{ in.}$

NOTE : Skipping the nozzle attachment weld strength calculations.

Per UW-15(b)(2) the nozzles exempted by UG-36(c)(3)(a)

(small nozzles) do not require a weld strength check.

**Maximum Allowable Pressure for this Nozzle at this Location:**

Converged Max. Allow. Pressure in Operating case        150.000    psig

Note: The MAWP of this junction was limited by the parent Shell/Head.

The Drop for this Nozzle is : 0.0483 in.

The Cut Length for this Nozzle is, Drop + Ho + H + T : 0.5233 in.

**Percent Elongation Calculations:**

Percent Elongation per UHA-44     $(50 * t_{nom} / R_f) * (1 - R_f / R_o)$     16.937 %

Note: Please Check Requirements of Table UHA-44 for Elongation limits.

**INPUT VALUES, Nozzle Description: B****From : 20**

Pressure for Reinforcement Calculations	P	215.000	psig
Temperature for Internal Pressure	Temp	100	°F
Design External Pressure	Pext	15.00	psig
Temperature for External Pressure	Tempex	100	°F
Shell Material		SA-240 304L	
Shell Allowable Stress at Temperature	S	16700.00	psi
Shell Allowable Stress At Ambient	Sa	16700.00	psi
Inside Diameter of Cylindrical Shell	D	29.2500	in.
Design Length of Section	L	80.8750	in.
Shell Finished (Minimum) Thickness	t	0.3750	in.
Shell Internal Corrosion Allowance	c	0.1250	in.
Shell External Corrosion Allowance	co	0.0000	in.
Distance from Bottom/Left Tangent		5.1667	ft.
User Entered Minimum Design Metal Temperature		-20.00	°F

**Type of Element Connected to the Shell : Nozzle**

Material		SA-240 304L	
Material UNS Number		S30403	
Material Specification/Type		Plate	
Allowable Stress at Temperature	Sn	16700.00	psi
Allowable Stress At Ambient	Sna	16700.00	psi
Diameter Basis (for tr calc only)		ID	



\	
\	
\_\_\_\_\_ \|\_\_	

### Insert/Set-in Nozzle No Pad, no Inside projection

### Reinforcement CALCULATION, Description: B

ASME Code, Section VIII, Div. 1, 2013, UG-37 to UG-45

Actual Inside Diameter Used in Calculation	1.687 in.
Actual Thickness Used in Calculation	0.344 in.

Nozzle input data check completed without errors.

Reqd thk per UG-37(a) of Cylindrical Shell, Tr [Int. Press]

$$\begin{aligned}
 &= (P \cdot R) / (S \cdot E - 0.6 \cdot P) \text{ per UG-27 (c) (1)} \\
 &= (215.00 \cdot 14.7500) / (16700 \cdot 1.00 - 0.6 \cdot 215.00) \\
 &= 0.1914 \text{ in.}
 \end{aligned}$$

Reqd thk per UG-37(a) of Nozzle Wall, Trn [Int. Press]

$$\begin{aligned}
 &= (P \cdot R) / (S \cdot E - 0.6 \cdot P) \text{ per UG-27 (c) (1)} \\
 &= (215.00 \cdot 0.97) / (16700 \cdot 1.00 - 0.6 \cdot 215.00) \\
 &= 0.0126 \text{ in.}
 \end{aligned}$$

Required Nozzle thickness under External Pressure per UG-28 : 0.0028 in.

### UG-40, Limits of Reinforcement : [External Pressure]

Parallel to Vessel Wall (Diameter Limit)	D1	3.8740 in.
Parallel to Vessel Wall, opening length	d	1.9370 in.
Normal to Vessel Wall (Thickness Limit), no pad	Tlnp	0.5475 in.

Note:

Taking a UG-36(c)(3)(a) exemption for nozzle: B.

This calculation is valid for nozzles that meet all the requirements of paragraph UG-36. Please check the Code carefully, especially for nozzles that are not isolated or do not meet Code spacing requirements. To force the computation of areas for small nozzles go to Tools->Configuration and check the box to force the UG-37 small nozzle area calculation or force the Appendix 1-10 computation in Nozzle Design Options.

#### UG-45 Minimum Nozzle Neck Thickness Requirement: [Int. Press.]

Wall Thickness for Internal/External pressures  $t_a = 0.1376$  in.

Wall Thickness per UG16(b),  $t_{r16b} = 0.2188$  in.

Wall Thickness, shell/head, internal pressure  $t_{rb1} = 0.3164$  in.

Wall Thickness  $t_{b1} = \max(t_{rb1}, t_{r16b}) = 0.3164$  in.

Wall Thickness, shell/head, external pressure  $t_{rb2} = 0.1383$  in.

Wall Thickness  $t_{b2} = \max(t_{rb2}, t_{r16b}) = 0.2188$  in.

Wall Thickness per table UG-45  $t_{b3} = 0.2596$  in.

Determine Nozzle Thickness candidate [tb]:

$$= \min[ t_{b3}, \max( t_{b1}, t_{b2} ) ]$$

$$= \min[ 0.260 , \max( 0.3164 , 0.2188 ) ]$$

$$= 0.2596 \text{ in.}$$

Minimum Wall Thickness of Nozzle Necks [tUG-45]:

$$= \max( t_a, t_b )$$

$$= \max( 0.1376 , 0.2596 )$$

$$= 0.2596 \text{ in.}$$

Available Nozzle Neck Thickness =  $0.875 * 0.344 = 0.301$  in. --> OK

SA-240 304L, Min Metal Temp without impact per UHA-51: -320 °F

Weld Size Calculations, Description: B

Intermediate Calc. for nozzle/shell Welds    Tmin        0.2190    in.

**Results Per UW-16.1:**

	Required Thickness	Actual Thickness
Nozzle Weld	$0.1533 = 0.7 * t_{min.}$	$0.2651 = 0.7 * W_o \text{ in.}$

NOTE : Skipping the nozzle attachment weld strength calculations.

Per UW-15(b)(2) the nozzles exempted by UG-36(c)(3)(a)

(small nozzles) do not require a weld strength check.

**Maximum Allowable Pressure for this Nozzle at this Location:**

Converged Max. Allow. Pressure in Operating case        150.000    psig

Note: The MAWP of this junction was limited by the parent Shell/Head.

The Drop for this Nozzle is : 0.0483 in.

The Cut Length for this Nozzle is, Drop + Ho + H + T : 0.5233 in.

**Percent Elongation Calculations:**

Percent Elongation per UHA-44     $(50 * t_{nom} / R_f) * (1 - R_f / R_o)$     16.937 %

Note: Please Check Requirements of Table UHA-44 for Elongation limits.



**INPUT VALUES, Nozzle Description: A****From : 30**

Pressure for Reinforcement Calculations	P	215.000	psig
Temperature for Internal Pressure	Temp	100	°F
Design External Pressure	Pext	15.00	psig
Temperature for External Pressure	Tempex	100	°F

Shell Material		SA-240 304L	
Shell Allowable Stress at Temperature	S	16700.00	psi
Shell Allowable Stress At Ambient	Sa	16700.00	psi
Inside Diameter of Elliptical Head	D	29.2500	in.
Aspect Ratio of Elliptical Head	Ar	2.00	
Head Finished (Minimum) Thickness	t	1.0000	in.
Head Internal Corrosion Allowance	c	0.1250	in.
Head External Corrosion Allowance	co	0.0000	in.
Distance from Head Centerline	L1	0.0000	in.
User Entered Minimum Design Metal Temperature		-20.00	°F

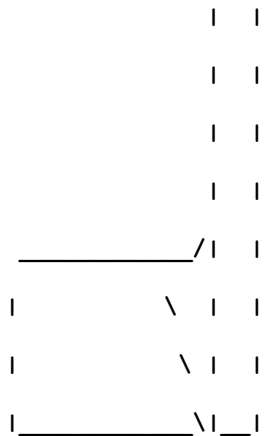
**Type of Element Connected to the Shell : Nozzle**

Material		SA-240 304L	
Material UNS Number		S30403	
Material Specification/Type		Plate	
Allowable Stress at Temperature	Sn	16700.00	psi
Allowable Stress At Ambient	Sna	16700.00	psi
Diameter Basis (for tr calc only)		ID	

Layout Angle		0.00 deg
Diameter		1.0000 in.
Size and Thickness Basis		Nominal
Nominal Thickness	tn	160
Corrosion Allowance	can	0.0000 in.
Joint Efficiency of Shell Seam at Nozzle	E1	1.00
Joint Efficiency of Nozzle Neck	En	1.00
Outside Projection	ho	4.0000 in.
Weld leg size between Nozzle and Pad/Shell	Wo	0.3750 in.
Groove weld depth between Nozzle and Vessel	Wgnv	0.3750 in.
Inside Projection	h	0.0000 in.
Weld leg size, Inside Element to Shell	Wi	0.0000 in.
ASME Code Weld Type per UW-16		None
Tapped hole area loss		1.0000 in <sup>2</sup>

The Pressure Design option was Design Pressure + static head.

**Nozzle Sketch (may not represent actual weld type/configuration)**



**Insert/Set-in Nozzle No Pad, no Inside projection****Reinforcement CALCULATION, Description: A**

ASME Code, Section VIII, Div. 1, 2013, UG-37 to UG-45

Actual Inside Diameter Used in Calculation	0.815 in.
Actual Thickness Used in Calculation	0.250 in.

Nozzle input data check completed without errors.

Reqd thk per UG-37(a) of Elliptical Head, Tr [Int. Press]

$$= (P \cdot K_1 \cdot D) / (2 \cdot S \cdot E - 0.2 \cdot P) \text{ per UG-37 (a) (3)}$$

$$= (215.00 \cdot 0.893 \cdot 29.5000) / (2 \cdot 16700.00 \cdot 1.00 - 0.2 \cdot 215.00)$$

$$= 0.1698 \text{ in.}$$

Reqd thk per App. 1 of Nozzle Wall, Trn [Int. Press]

$$= R \left( \exp\left(\frac{P}{SE}\right) - 1 \right) \text{ per Appendix 1-2 (a) (1)}$$

$$= 0.408 \left( \exp\left(\frac{215.00}{16700.00 \cdot 1.00}\right) - 1 \right)$$

$$= 0.0053 \text{ in.}$$

Required Nozzle thickness under External Pressure per UG-28 : 0.0068 in.

**UG-40, Limits of Reinforcement : [Internal Pressure]**

Parallel to Vessel Wall (Diameter Limit)	Dl	3.0650 in.
Parallel to Vessel Wall	Rn+tn+t	1.5325 in.
Normal to Vessel Wall (Thickness Limit), no pad	Tlnp	0.6250 in.

*Note:*

*Taking a UG-36(c)(3)(a) exemption for nozzle: A.*

*This calculation is valid for nozzles that meet all the requirements of paragraph UG-36. Please check the Code carefully, especially for nozzles that are not isolated or do not meet Code spacing requirements. To force the computation of areas for small nozzles go to Tools->Configuration and check the box to force the UG-37 small nozzle area calculation or force the Appendix 1-10 computation in Nozzle Design Options.*

**UG-45 Minimum Nozzle Neck Thickness Requirement: [Int. Press.]**

Wall Thickness for Internal/External pressures       $t_a = 0.0068$  in.  
 Wall Thickness per UG16(b),       $tr_{16b} = 0.2188$  in.  
 Wall Thickness, shell/head, internal pressure       $tr_{b1} = 0.3130$  in.  
 Wall Thickness       $tb_1 = \max(tr_{b1}, tr_{16b}) = 0.3130$  in.  
 Wall Thickness, shell/head, external pressure       $tr_{b2} = 0.1381$  in.  
 Wall Thickness       $tb_2 = \max(tr_{b2}, tr_{16b}) = 0.2188$  in.  
 Wall Thickness per table UG-45       $tb_3 = 0.1160$  in.

Determine Nozzle Thickness candidate [tb]:

$= \min[ tb_3, \max( tb_1, tb_2 ) ]$   
 $= \min[ 0.116 , \max( 0.3130 , 0.2188 ) ]$   
 $= 0.1160$  in.

Minimum Wall Thickness of Nozzle Necks [tUG-45]:

$= \max( t_a, t_b )$   
 $= \max( 0.0068 , 0.1160 )$   
 $= 0.1160$  in.

Available Nozzle Neck Thickness =  $0.875 * 0.250 = 0.219$  in. --> OK

SA-240 304L, Min Metal Temp without impact per UHA-51:  $-320$  °F

Weld Size Calculations, Description: A

Intermediate Calc. for nozzle/shell Welds     $T_{min}$     0.2500 in.

**Results Per UW-16.1:**

	Required Thickness	Actual Thickness
Nozzle Weld	$0.1750 = 0.7 * t_{min}$ .	$0.2651 = 0.7 * W_o$ in.

NOTE : Skipping the nozzle attachment weld strength calculations.

Per UW-15(b)(2) the nozzles exempted by UG-36(c)(3)(a)

(small nozzles) do not require a weld strength check.

**Maximum Allowable Pressure for this Nozzle at this Location:**

Converged Max. Allow. Pressure in Operating case    150.000 psig

Note: The MAWP of this junction was limited by the parent Shell/Head.

The Drop for this Nozzle is : 0.0080 in.

The Cut Length for this Nozzle is, Drop + Ho + H + T : 5.0080 in.

**Percent Elongation Calculations:**

Percent Elongation per UHA-44     $(50 * t_{nom} / R_f) * (1 - R_f / R_o)$     23.474 %

Note: Please Check Requirements of Table UHA-44 for Elongation limits.

**Nozzle Schedule:**

Description	Nominal Flange			Noz.	Wall	Re-Pad		Cut
	Size	Sch/Type	O/Dia	Thk	ODia	Thick	Length	
	in.	Cls	in.	in.	in.	in.	in.	
A	1.000	160	None	1.315	0.250	-	-	5.01
C	2.000	160	Thrded	2.375	0.344	-	-	0.52
B	2.000	160	Thrded	2.375	0.344	-	-	0.52

*General Notes for the above table:*

The Cut Length is the Outside Projection + Inside Projection + Drop + In Plane Shell Thickness. This value does not include weld gaps, nor does it account for shrinkage.

In the case of Oblique Nozzles, the Outside Diameter must be increased. The Re-Pad WIDTH around the nozzle is calculated as follows:

$$\text{Width of Pad} = (\text{Pad Outside Dia. (per above)} - \text{Nozzle Outside Dia.})/2$$

For hub nozzles, the thickness and diameter shown are those of the smaller and thinner section.

**Nozzle Material and Weld Fillet Leg Size Details:**

Nozzle	Material	Shl Grve	Noz	Shl/Pad	Pad OD	Pad Grve	Inside
		Weld	Weld	Weld	Weld	Weld	
		in.	in.	in.	in.	in.	
A	SA-240 304L	0.375	0.375	-	-	-	
C	SA-240 304L	0.375	0.375	-	-	-	

B	SA-240 304L	0.375	0.375	-	-	-
---	-------------	-------	-------	---	---	---

Note: The Outside projections below do not include the flange thickness.

**Nozzle Miscellaneous Data:**

Nozzle	Elevation/Distance	Layout	Projection		Installed In
	From Datum	Angle	Outside	Inside	Component
	ft.	deg.	in.	in.	
-----					
A		0.00	4.00	0.00	Casquete Sup
C	0.500	270.00	0.10	0.00	Envolvente
B	5.000	0.00	0.10	0.00	Envolvente

**Nozzle Calculation Summary:**

Description	MAWP psig	Ext	MAPNC psig	UG45 [tr]	Weld Path	Areas or Stresses
C	150.00	...	...	OK 0.260	OK	NoCalc[*]
B	150.00	...	...	OK 0.260	OK	NoCalc[*]
A	150.00	...	...	OK 0.116	OK	NoCalc[*]
-----						
Min. - Nozzles	150.00	A				
Min. Shell&Flgs	150.00	30	40	275.00		
Computed Vessel M.A.W.P.	150.00		psig			

[\*] - This was a small opening and the areas were not computed or the MAWP of this connection could not be computed because the longitudinal bending stress was greater than the hoop stress.

Note: MAWPs (Internal Case) shown above are at the High Point.

Check the Spatial Relationship between the Nozzles

From Node	Nozzle Description	Y Coordinate,	Layout Angle,	Dia. Limit
20	C	8.000	270.000	3.874
20	B	62.000	0.000	3.874
30	A	0.000	0.000	3.065

The nozzle spacing is computed by the following:

= Sqrt(  $l^2 + l_c^2$  ) where



ll - Arc length along the inside vessel surface in the long. direction.

lc - Arc length along the inside vessel surface in the circ. direction

If any interferences/violations are found, they will be noted below.

No interference violations have been detected !

**Minimum Design Metal Temperature Results Summary :**

Description	Notes	Curve	Basic MDMT °F	Reduced MDMT °F	UG-20 (f) MDMT °F	Thickness ratio	Gov Thk in.	E*
Casquete Infe	[16]		-320					
Envolvente	[16]		-320					
Casquete Supe	[16]		-320					
C	[15]		-320					
B	[15]		-320					
A	[15]		-320					
Required Minimum Design Metal Temperature							-20 °F	
Warmest Computed Minimum Design Metal Temperature							-320 °F	

**Notes:**

- [ ! ] - This was an impact tested material.
- [ 1 ] - Governing Nozzle Weld.
- [ 4 ] - ANSI Flange MDMT Calcs; Thickness ratio per UCS-66(b)(1)(c).
- [ 5 ] - ANSI Flange MDMT Calcs; Thickness ratio per UCS-66(b)(1)(b).
- [ 6 ] - MDMT Calculations at the Shell/Head Joint.
- [ 7 ] - MDMT Calculations for the Straight Flange.
- [ 8 ] - Cylinder/Cone/Flange Junction MDMT.
- [ 9 ] - Calculations in the Spherical Portion of the Head.
- [10] - Calculations in the Knuckle Portion of the Head.
- [11] - Calculated (Body Flange) Flange MDMT.
- [12] - Calculated Flat Head MDMT per UCS-66.3
- [13] - Tubesheet MDMT, shell side, if applicable
- [14] - Tubesheet MDMT, tube side, if applicable

[15] - Nozzle Material

[16] - Shell or Head Material

UG-84(b)(2) was not considered.

UCS-66(g) was not considered.

UCS-66(i) was not considered.

**Notes:**

Impact test temps were not entered in and not considered in the analysis.

UCS-66(i) applies to impact tested materials not by specification and

UCS-66(g) applies to materials impact tested per UG-84.1 General Note (c).

The Basic MDMT includes the (30F) PWHT credit if applicable.

**ASME Code, Section VIII, Division 1, 2013**

Diameter Spec	:	30.000 in. OD		
Vessel Design Length, Tangent to Tangent		6.33	ft.	
Distance of Bottom Tangent above Grade		0.00	ft.	
Distance of Base above Grade		0.00	ft.	
Specified Datum Line Distance		0.17	ft.	
Shell Material		SA-240	304L	
Internal Design Temperature		100	°F	
Internal Design Pressure		215.000	psig	
External Design Temperature		100	°F	
External Design Pressure		15.000	psig	
Maximum Allowable Working Pressure		150.000	psig	
External Max. Allowable Working Pressure		55.677	psig	
Hydrostatic Test Pressure		0.000	psig	
Required Minimum Design Metal Temperature		-20	°F	
Warmest Computed Minimum Design Metal Temperature		-320	°F	
Wind Design Code				ASCE-93
Earthquake Design Code				UBC-94

**Element Pressures and MAWP: psig**

Element Desc		Design Pres.		External		M.A.W.P		Corrosion
		+ Stat. head		Pressure				Allowance

Casquete Inferior	215.000	15.000	280.201	0.1250
Envolvente	215.000	15.000	280.201	0.1250
Casquete Superior	215.000	15.000	280.201	0.1250

Element Type	"To" Elev ft.	Length ft.	Element Thk in.	R e q d Int.	T h k Ext.	Joint Long	Eff Circ
Ellipse	0.00	0.167	0.375	0.314	0.219	1.00	1.00
Cylinder	6.00	6.000	0.375	0.317	0.273	1.00	1.00
Ellipse	6.17	0.167	0.375	0.314	0.219	1.00	1.00

Element thicknesses are shown as Nominal if specified, otherwise are Minimum

Note: Wind and Earthquake moments include the effects of user defined

forces and moments if any exist in the job and were specified to act (compute loads and stresses) during these cases. Also included are moment effects due to eccentric weights if any are present in the input.

#### Weights:

Fabricated - Bare W/O Removable Internals	1014.0	lbm
Shop Test - Fabricated + Water ( Full )	3094.7	lbm
Shipping - Fab. + Rem. Intls.+ Shipping App.	1014.0	lbm
Erected - Fab. + Rem. Intls.+ Insul. (etc)	1014.0	lbm
Empty - Fab. + Intls. + Details + Wghts.	1014.0	lbm
Operating - Empty + Operating Liquid (No CA)	1014.0	lbm
Field Test - Empty Weight + Water (Full)	3094.7	lbm

