

UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



**ANÁLISIS DE LAS PÉRDIDAS DE NITRÓGENO LÍQUIDO EN EL SISTEMA  
DE TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO DEL DEPARTAMENTO DE  
FLUIDOS INDUSTRIALES DE UNA PLANTA SIDERÚRGICA**

Realizado por:

**Zora Angelica Cermeño Navarro**

Trabajo de grado presentado ante la Universidad de Oriente como requisito  
parcial para optar el título de:

**INGENIERO QUÍMICO**

Puerto La Cruz, abril de 2003

UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



**ANÁLISIS DE LAS PÉRDIDAS DE NITRÓGENO LÍQUIDO EN EL SISTEMA  
DE TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO DEL DEPARTAMENTO DE  
FLUIDOS INDUSTRIALES DE UNA PLANTA SIDERÚRGICA**

**JURADOS**

---

**Ing. Quím. Osvaldo Ochoa**

Asesor Académico

---

**Ing. Quím. Héctor Silva**

Jurado Principal

---

**Ing. Quím. Fidelina Moncada**

Jurado Principal

Puerto La Cruz, abril de 2003

UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



**ANÁLISIS DE LAS PÉRDIDAS DE NITRÓGENO LÍQUIDO EN EL SISTEMA  
DE TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO DEL DEPARTAMENTO DE  
FLUIDOS INDUSTRIALES DE UNA PLANTA SIDERÚRGICA**

**ASESORES**

---

**Ing. Quím. Osvaldo Ochoa**

Asesor Académico

---

**Ing. Quím. Ramona Ruza**

Asesor Industrial

Puerto La Cruz, abril de 2003

## **RESOLUCIÓN**

De acuerdo al artículo 44 del reglamento de trabajos de grado: “Los trabajos de grado son de la exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y sólo podrán ser utilizados para otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo quien lo participará al Consejo Universitario”

## **DEDICATORIA**

A Dios Todopoderoso, por protegerme y otorgarme las herramientas necesarias para alcanzar mis metas. Gracias por guiarme y por darme la fortaleza para seguir adelante y triunfar en la vida.

A mi madre Zoraida, mujer ejemplar y madre abnegada, quien con su apoyo y comprensión me lleno de ánimos de superación para lograr todas las metas propuestas y alcanzar el éxito.

A mi padre Jesús, hombre honorable que supo guiar mis pasos por el camino del bien, ofreciéndome su apoyo incondicional para alcanzar esta meta.

A mi esposo Norberto, ser especial quien ha sido un gran ejemplo de superación y triunfo, que me ha regalado momentos maravillosos en la vida y quien luchó conmigo para alcanzar este sueño.

A mi hermano Elio, por ser ejemplo de lucha, visión y superación, para alcanzar las metas propuestas.

A mi hermana Zoreli, para que le sirva de ejemplo y motivación en su vida como estudiante universitaria.

De igual modo, merecen gran atención todos mis familiares y amigos para que sirva de ejemplo de amor, esfuerzo y dedicación por lo que deseamos, sigan siempre adelante que Dios los bendiga.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres, por creer ciegamente en mí, les agradezco de corazón todo lo que han hecho en el recorrido de estos años y por estar siempre presentes en mi lucha por alcanzar esta meta, los quiero.

A mi esposo, por estar a mi lado brindándome su apoyo de manera incondicional en los momentos más difíciles, confiando en mí y transmitiéndome sus mejores deseos. Tu esencia pura llena de momentos gratos mi vida.

A mis hermanos, por estar siempre atentos brindándome su apoyo y comprensión para alcanzar este logro, gracias por ser especiales.

A mi asesor académico, Ing. Osvaldo Ochoa, por ayudarme y brindarme sus conocimientos en el desarrollo de este trabajo.

A mis compañeras de estudio: Joarquis y Maricelly, quienes compartieron conmigo buenos y malos momentos durante la universidad, gracias por la comprensión y el gran apoyo brindado.

Al profesor Arturo Rodulfo, por su apoyo y colaboración durante el desarrollo de este trabajo.

A la Universidad de Oriente y a sus profesores, por ser patrón fundamental de mi formación profesional.

## RESUMEN

En el siguiente trabajo se analizaron las causas que producen las pérdidas de nitrógeno líquido en el sistema de transporte y almacenamiento de las plantas PSA-6 y PSA-4, del departamento de Fluidos Industriales de la Siderúrgica del Orinoco (SIDOR). En primer lugar se describió el funcionamiento de las plantas separadoras de aire PSA-6 y PSA-4 y los productos obtenidos en el proceso, seguidamente se procedió a determinar las pérdidas de nitrógeno líquido en el tanque de almacenamiento LV-2 mediante el seguimiento del nivel del tanque en la sala de control de la empresa, durante un período de tres meses de funcionamiento continuo de la planta, en los que se establecieron tres escenarios de producción: mínimo, promedio y máximo, en donde las plantas producen en conjunto de 23.422,19; 33.337,34 y 49.853,94 Nm<sup>3</sup>/día respectivamente, permitiendo comprobar pérdidas de nitrógeno equivalentes a -68.214,11 Nm<sup>3</sup>/día para el caso mínimo, -4.058,29 Nm<sup>3</sup>/día para el caso promedio y un incremento de 13.530,44 Nm<sup>3</sup>/día para el caso máximo, que se explica por fallas en el sistema de control de nivel del tanque en caso de mal funcionamiento de la planta. Luego se estudiaron las condiciones que pudiesen generar la vaporización del nitrógeno en el sistema de transporte y almacenamiento de las mencionadas plantas, para lo cual se considera un flujo de operación normal de 33.600,00 Nm<sup>3</sup>/día de nitrógeno proveniente de PSA-6 y se simuló la variación del grosor de aislante de la tubería, la temperatura del nitrógeno líquido a la entrada de la línea de transporte y la presión del tanque de almacenamiento LV-2, y se comprobó que pequeños incrementos de temperatura en el nitrógeno líquido a la entrada puede ocasionar vaporización en la línea, así como también al simular la disminución de la capa de aislante de la tubería hasta un 40% se observó un pequeño

incremento en el porcentaje evaporado a la salida de la línea. Finalmente se dejó de controlar la presión del tanque LV-2 y se simuló a la presión de descarga de la línea (20 psig) con lo que no se obtuvo flujo de venteo. En base al estudio realizado anteriormente se procedió a proponer las posibles soluciones que minimicen las pérdidas de nitrógeno en el sistema de transporte y almacenamiento de las plantas PSA-6 y PSA-4.



## ÍNDICE

RESOLUCIÓN .....	iv
DEDICATORIA .....	v
AGRADECIMIENTOS .....	vi
RESUMEN .....	vii
ÍNDICE .....	ix
ÍNDICE DE TABLAS .....	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xiv
CAPITULO I .....	16
INTRODUCCIÓN .....	16
1.1 Reseña histórica de la planta SIDOR .....	16
1.2 Planteamiento del problema .....	19
1.3 Objetivos.....	22
1.3.1 Objetivo General .....	22
1.3.2 Objetivos Específicos.....	22
CAPITULO II .....	23
MARCO TEORICO .....	23
2.1 Antecedentes.....	23
2.2 Procesos de sidor.....	25
2.2.1 Fabricación de productos planos .....	26
2.2.1.1 Productos planos laminados en caliente.....	26
2.2.1.2 Productos planos laminados en frío.....	27
2.2.1.3 Productos recubiertos .....	29
2.2.2 Fabricación de productos largos .....	30
2.2.2.1 Barras .....	31
2.2.2.2 Alambrón .....	32
2.2.3 Plantas de fraccionamiento de aire .....	32

2.3 CRIOGENIA .....	33
2.4 Métodos de refrigeración y licuefacción .....	34
2.4.1 Expansión de Joule-Thomson .....	34
2.4.2 Expansión a través de máquinas .....	35
2.4.3 Acumulación de refrigeración con empleo de intercambiadores de calor .....	35
2.5 Sistema de linde para la separación del aire .....	35
2.5.1 Sistema de Linde de columna simple para la separación del aire .....	35
2.5.2 Sistema de Linde de columna doble para separación de aire .....	37
2.6 Sistemas de almacenamiento de fluidos criogénicos .....	39
2.7 Aislamiento térmico .....	40
2.7.1 Aislamiento al vacío .....	41
2.7.2 Aislamiento de capa múltiple .....	42
2.7.3 Aislamiento con polvo .....	43
2.7.4 Aislamiento con espuma .....	43
2.8 Principio de las plantas separadoras de aire .....	44
2.8.1 Compresión de aire .....	44
2.8.2 Enfriamiento del aire de proceso .....	45
2.8.3 Sistema de purificación del aire .....	45
2.8.4 Enfriamiento del aire a la temperatura de licuación .....	45
2.8.5 Producción de frío .....	45
2.8.6 Licuación .....	46
2.8.7 Fraccionamiento del aire (rectificación) .....	46
2.8.8 Producción de argón .....	47
2.9 Aire .....	47
2.9.1 Propiedades físicas del aire .....	49
2.9.2 Propiedades químicas del aire .....	50
2.9.3 Aplicaciones de los gases del aire .....	50
2.10 Nitrógeno .....	51

2.10.1 Aplicaciones del nitrógeno a nivel industrial.....	54
2.10.2 Efectos fisiológicos del nitrógeno .....	55
2.10.3 Almacenamiento del nitrógeno.....	56
2.10.4 Manipulación del nitrógeno .....	56
2.10.5 Proceso para la obtención de nitrógeno.....	57
2.11 Oxígeno.....	60
2.11.1 Aplicaciones del oxígeno a nivel industrial.....	62
2.11.2 Efectos fisiológicos del oxígeno .....	64
2.11.3 Almacenamiento del oxígeno .....	65
2.11.4 Manipulación del oxígeno.....	65
2.12 Argón.....	66
2.12.1 Aplicaciones del argón a nivel industrial.....	67
2.12.1.1 Efectos fisiológicos del argón .....	69
2.12.2 Almacenamiento del argón.....	70
2.12.3 Manipulación del argón .....	70
2.13 Transferencia de calor.....	71
2.13.1 Conducción .....	72
2.13.2 Convección .....	73
2.13.3 Radiación .....	74
2.14 Simulación de procesos.....	75
2.14.1 Descripción del Simulador de Procesos HYSYS.....	76
CAPITULO III.....	79
METODOLOGIA.....	79
3.1 Descripción del funcionamiento de las plantas PSA-6 y PSA-4. ....	79
3.2 Cálculo de las pérdidas de nitrógeno en el tanque de almacenamiento lv-2.....	79
3.2.1 Descripción del tanque de almacenamiento de nitrógeno líquido LV-2 .....	84

3.3 Estudio de las condiciones que generan la vaporización del nitrógeno líquido en el sistema de transporte y almacenamiento de las plantas PSA-6 y PSA-4 .....	86
3.3.1 Selección del paquete termodinámico a utilizar en el simulador... 87	
3.3.1.1 Ecuación de Peng y Robinson, (PR, 1976).....	89
3.3.2 Datos de entrada al simulador Hysys.....	93
3.3.3 Datos para simular la tubería de transporte de nitrógeno líquido al tanque LV-2.....	94
3.4 Propuesta de posibles soluciones que minimicen las pérdidas de nitrógeno en el sistema de transporte y almacenamiento de las plantas PSA-6 y PSA-4.....	95
CAPITULO IV.....	96
RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	96
4.1 Descripción del funcionamiento de las plantas PSA-6 y PSA-4 .....	96
4.1.1 Descripción general del proceso PSA6 (PL4-XL):.....	97
4.2 Cálculo de las pérdidas de nitrógeno en el tanque de almacenamiento LV-2.....	103
4.3 Estudio de las condiciones que generan la vaporización del nitrógeno líquido en el sistema de transporte y almacenamiento de las plantas PSA-6 y PSA-4 .....	106
4.4 Propuesta de posibles soluciones que minimicen las pérdidas de nitrógeno en el sistema de transporte y almacenamiento de las plantas PSA-6 y PSA-4.....	114
4.5 Conclusiones .....	114
4.6 Recomendaciones .....	115
BIBLIOGRAFÍA.....	117
METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO .....	119

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Principales componentes del aire (Gases industriales del este, 2010).....	49
Tabla 2.2 Propiedades físicas del nitrógeno (Oxicar C.A., 2008).....	53
Tabla 2.3. Propiedades físicas del oxígeno (Oxicar C.A., 2008).....	62
Tabla 2.4. Propiedades físicas del argón (Oxicar, C.A., 2008) .....	68
Tabla 3.1. Balance de masa del tanque LV-2 para el mes de febrero de 2009. .....	80
Tabla 3.2. Balance de masa del tanque LV-2 para el mes de marzo de 2009 .....	82
Tabla 3.3. Balance de masa del tanque LV-2 para el mes de abril de 2009.	83
Tabla 3.4. Datos del tanque de almacenamiento de nitrógeno líquido LV-2.	85
Tabla 3.5. Paquetes termodinámicos recomendados por el fabricante del software para sistemas típicos.....	92
Tabla 3.6. Datos de entrada para simular la tubería de la planta PSA-6 hasta el tanque de almacenamiento de nitrógeno líquido LV-2 .....	93
Tabla 3.7. Datos de entrada para simular la alimentación proveniente de la planta PSA-4 al tanque de almacenamiento de nitrógeno LV-2 .....	94
Tabla 4.1. Plantas de separación de aire.....	97
Tabla 4.2. Balance en el tanque LV-2 obtenido por simulación. ....	108

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Sistema de reducción (Sidor C.A., 2005).....	25
Figura 2.2. Sistema de laminación en caliente (Sidor C.A., 2005).....	28
Figura 2.3. Sistema de laminación en frío (Sidor C.A., 2005).....	29
Figura 2.4. Recubrimiento electrolítico (Sidor C.A., 2005).....	30
Figura 2.5. Esquema de producción de productos largos (Sidor C.A., 2005)	31
Figura 2.6. Columna de Linde simple para separación de aire (Perry, 1998)	37
Figura 2.7. Separador de aire de Linde en columna doble (Perry, 1998) .....	38
Figura 2.8. Modos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación (Marcano,2010) .....	71
Figura 4.1. Diagrama de flujo de proceso de la planta PSA-6 .....	100
Figura 4.2. Gráfica de Surge Line en el Brim Machine de la planta PSA-6.	101
Figura 4.2. Pérdidas de nitrógeno en el tanque de almacenamiento LV-2 para el mes de febrero de 2009. ....	104
Figura 4.3. Pérdidas de nitrógeno en el tanque de almacenamiento LV-2 para el mes de marzo de 2009. ....	105
Figura 4.4. Pérdidas de nitrógeno en el tanque de almacenamiento LV-2 para el mes de abril de 2009.....	105
Figura 4.5. PFD del sistema a ser simulado. ....	107
Figura 4.6. Perfil de elevación de la tubería.....	110
Figura 4.7. Perfil de presión en la tubería en condiciones normales a diferentes estados de aislante. ....	111
Figura 4.8. Perfil de temperatura en la tubería en condiciones normales a diferentes estados de aislante. ....	111
Figura 4.9. Fracción de vapor en la tubería en condiciones normales a diferentes estados de aislante. ....	112

Figura 4.10. Estudio de caso para la variación de la temperatura de entrada de nitrógeno líquido a la línea de transporte al tanque LV-2..... 113

# **CAPITULO I**

## **INTRODUCCIÓN**

### **1.1 Reseña histórica de la planta SIDOR**

La Siderúrgica del Orinoco tiene sus inicios en el año 1926, cuando son descubiertos los primeros yacimientos de mineral de hierro en la región Guayana, lo cual da impulso al desarrollo siderúrgico en Venezuela, sin embargo es hasta el inicio de la década de los cincuenta cuando en el país se comienza a abordar el proceso de transformación del hierro en acero con la instalación y puesta en marcha de una planta siderúrgica en Antímano Caracas (SIVENSA). Es hasta el año 1955 cuando el Gobierno Nacional debido a sus numerosas ventajas geográficas, económicas y naturales, decide la construcción de una planta siderúrgica en la región de Guayana, específicamente en la zona industrial Matanzas, en la margen derecha del río Orinoco, a 17 km de su confluencia con el río Caroní y a 300 km de la desembocadura del Orinoco en el océano Atlántico.

Para 1958 es creado el Instituto Venezolano del Hierro y el Acero, con el objetivo esencial de impulsar la instalación y supervisar la construcción de la planta siderúrgica. En 1960 se crea la Corporación Venezolana de Guayana (CVG) y se le asignan las funciones correspondientes al Instituto Venezolano del Hierro y el Acero.

La puesta en marcha de la planta siderúrgica se realiza de manera progresiva; primero, en 1961 se inicia la producción de tubos sin costura con lingotes importados, y en 1962 se realiza la primera colada de acero. Luego



en 1964, la Corporación Venezolana de Guayana constituye la empresa CVG - Siderúrgica del Orinoco C.A. (CVG - SIDOR) y se le confía el funcionamiento de la planta en la ejecución de operaciones de su competencia.

En 1970 se inaugura la industria de Tubos Centrifugados. Un año después (1971), el Estado Venezolano firma un contrato con un Consorcio Belga – Alemán para la construcción de la planta de laminados planos, con la finalidad de producir chapas gruesas y bobinas en caliente. Dos años más tarde se inaugura la línea de estaño y cromado electrolítico de la planta de productos planos en frío; además durante este año se obtiene la primera marca NORVEN en Venezuela, para barras (cabillas) de Sidor.

Para 1974 dadas las buenas condiciones económicas del país se emprende la ampliación de SIDOR, a través del denominado PLAN IV, que condujo a la formulación de un proyecto de desarrollo industrial, cuya finalidad implicaba elevar la capacidad instalada de producción de acero crudo de 1.200.000 a 4.800.000 toneladas métricas anuales e incrementar la capacidad de los laminadores planos y no planos.

Es el 11 de noviembre de 1978 cuando finalmente es inaugurado por el presidente de la república, el PLAN IV de SIDOR; en cuya ejecución se utilizó tecnología extranjera con la dirección de técnicos venezolanos en un tiempo récord de 4 años. Este mismo año se inician las operaciones de la planta de reducción directa Midrex I y es puesta en ejecución la máquina de colada continua de palanquillas, la planta de reducción Midrex II y los laminadores de barras y alambón. Dos años más tarde se inaugura la planta de cal y se inician operaciones en la planta de reducción HyL. En 1981 se inicia la ampliación de productos planos que concluye un año después.

En 1989 es aplicado un proceso de reconversión en Sidor, que significa entre otros cambios el cierre de hornos y laminadores convencionales. De esta forma el gobierno de Venezuela, arranca el proceso de privatización de las empresas básicas de Guayana cuando, a través de los organismos del Estado en el año de 1993 es acreditado el proyecto de ley de privatización. Para diciembre de 1994, el Consejo de Ministros aprueba el inicio de la privatización de las empresas básicas, entre ellas SIDOR; y finalmente en marzo de 1995 el Congreso de la República autoriza el desarrollo del proceso de privatización.

Seguidamente, el 18 de diciembre de 1997 luego de haber cumplido con un proceso de licitación pública, se firma el contrato de compra - venta de SIDOR con el consorcio Amazonia, conformado por cinco de las empresas más importantes de América Latina en el área de la producción de acero: SIDERAR de Argentina, TAMSA e HYLAMEX de México, USIMINAS de Brasil y SIVENSA de Venezuela. Para el 27 de enero de 1998, La CVG SIDERURGICA DEL ORINOCO, C.A. (SIDOR) es privatizada procediéndose a su transformación para alcanzar estándares de competitividad internacional al punto de llegar a representar uno de los mejores productores de acero en el mundo.

En el 2000 posterior a un año de negociaciones, SIDOR firma el acuerdo de reestructuración financiera de su deuda con los bancos acreedores y el estado venezolano. Un año después se inauguran tres nuevos hornos en la acería de planchones y se concluye el proyecto de automatización del laminado en caliente.

Durante el año 2004 comienza el proceso de participación laboral de los trabajadores de SIDOR, a través de la venta de 20% de las acciones de la

empresa por parte del Estado Venezolano, a cargo de la Corporación Venezolana de Guayana (CVG) y el Banco de Desarrollo Económico y Social (BANDES). A partir de entonces el capital accionario de SIDOR corresponde a Ternium en un 60% y al país en un 20%; el restante 20% le corresponde a los trabajadores y ex trabajadores de la empresa.

El 30 de Abril de 2008, el gobierno de Venezuela decreta con rango, valor y fuerza de Ley, la nacionalización de SIDOR, C.A. En la actualidad, la empresa atraviesa un proceso de estatización donde la mayor parte del capital accionario corresponde al ejecutivo nacional, en un 60% al estado venezolano, un 20% para otros accionistas y un restante de 20% destinado a los trabajadores de la empresa (Sidor C.A., 2005).

## **1.2 Planteamiento del problema**

La Siderúrgica del Orinoco (SIDOR), es una empresa cuyo objetivo principal implica la transformación del mineral de hierro en acero mediante complejos procesos metalúrgicos; está ubicada en la zona industrial de Matanzas en el Estado Bolívar, región suroriental de Venezuela, sobre la margen derecha del río Orinoco, a 300 km de su desembocadura en el océano Atlántico.

El complejo industrial de SIDOR es el mayor fabricante de productos de acero integrado en Venezuela, ocupa el primer lugar en la Comunidad Andina de Naciones, y el cuarto en América Latina y el Caribe. Esta organización lleva a cabo sus procesos productivos mediante la aplicación de tecnologías de reducción directa y de hornos eléctricos de arcos, los cuales se inician con la fabricación de pellas y culminan con la elaboración de productos finales largos entre ellos, las barras y alambrón, y productos

terminados planos como láminas en caliente, láminas en frío y láminas de acero recubiertas; destinados al mercado nacional e internacional.

Cabe destacar que la empresa para cumplir sus funciones está dividida en varias gerencias, las cuales están seccionadas en diversos departamentos que permiten un mejor acople de las labores para cumplir con los requerimientos de una óptima producción. El departamento de fluidos industriales, adscrito a la gerencia de Servicios Industriales de esta empresa, es el encargado de la producción y distribución de los gases industriales necesarios para la fabricación del acero, tales como: oxígeno, nitrógeno y argón, para ello cuenta con cuatro plantas separadoras de aire: PSA-3 (274 ton/día) de tecnología BOC Americana, PSA-4 (685 ton/día) de tecnología LINDE Alemana, PSA-5 (350 ton/día) y PSA-6 (356 ton/día) de tecnología PRAXAIR INC; éstas utilizan como materia prima principal el aire atmosférico, su principio se basa en la separación del aire licuado en sus componentes aprovechando las diferentes temperaturas de condensación de los mismos.

Es importante señalar al respecto, que en el referido proceso industrial el nitrógeno gaseoso es el producto de mayor demanda dentro de la empresa, éste es utilizado para crear atmósferas inertes en las plantas de reducción directa y en las acerías; además, también es utilizado en laminación en frío en el área de recocido para formar un gas protector constituido por 93% nitrógeno y 7% hidrógeno, llamado comercialmente HNX, que se encarga de darle brillo y acabado a las bobinas. Para cubrir estas necesidades, las plantas cuentan con un sistema de reserva gaseosa y uno de reserva líquida, que requiere ser almacenado.

El tanque de almacenamiento de nitrógeno líquido (LV-2) de tecnología LINDE fue diseñado en 1978, originalmente sólo para el almacenamiento de la producción de la planta PSA-4; pero posteriormente, debido al aumento en la demanda de acero en el mercado mundial, la empresa decide incrementar la producción y por tanto requiere cubrir el déficit de gases del aire, por lo que se hace necesario adquirir las plantas PSA-5 y PSA-6. En el año 2006 entra en funcionamiento la planta separadora de aire PSA-6, siendo para ello inminente adecuar la tubería de alimentación para almacenar la producción generada en el mismo tanque LV-2 (antes señalado). A partir de entonces comenzó a observarse un fenómeno de evaporación excesiva de nitrógeno dentro del sistema de almacenamiento, que sale por el sistema de venteo; lo que representa desde todo punto de vista cuantiosas pérdidas económico-financieras, además de fallas en los equipos utilizados en el proceso como la obstrucción y congelamiento de la tubería de alivio del tanque.

Por consiguiente, el objetivo principal de este trabajo es analizar las pérdidas de nitrógeno líquido en el sistema de transporte y almacenamiento de las plantas PSA-6 y PSA-4, para lo cual es necesario la realización de un proceso descriptivo de la operación de la referida planta; un examen del diseño del tanque y de la línea de entrada y salida del sistema con miras de determinar las formas de evaporación o pérdidas de nitrógeno; precisar la cantidad de nitrógeno perdido o evaporado con la finalidad de arribar al establecimiento de soluciones viables al problema.

En sumatoria se puntualiza, que la importancia de la realización del estudio, en líneas generales radica en los tangibles beneficios económicos que obtendrá la empresa con la reducción de las pérdidas de nitrógeno líquido, como aportación igualmente relacionada con la aplicación práctica

del conocimiento de la ingeniería química. Asimismo el proyecto investigativo tiene importancia gerencial o administrativa, al punto que proporciona a la gerencia de Servicios Industriales elementos de ayuda desde el punto de vista ingenieril, en cuanto a la solución de un problema de su incumbencia. De igual modo permite profundizar en el área de conocimiento de los gases criogénicos, específicamente el nitrógeno; y en la necesidad de generar conocimiento que justifique el desarrollo de trabajos posteriores, tanto en la Siderúrgica del Orinoco como en otras industrias del entorno nacional e internacional.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo General**

Analizar las pérdidas de nitrógeno líquido en el sistema de transporte y almacenamiento de las plantas PSA-6 y PSA-4, del Departamento de Fluidos Industriales de una planta siderúrgica (SIDOR).

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

1. Describir el funcionamiento de las plantas PSA-6 y PSA-4.
2. Calcular las pérdidas de nitrógeno líquido en el tanque de almacenamiento LV-2.
3. Estudiar las condiciones que generan la vaporización del nitrógeno en el sistema de transporte y almacenamiento de las plantas PSA-6 y PSA-4.
4. Proponer las posibles soluciones que minimicen las pérdidas de nitrógeno en el sistema de transporte y almacenamiento de las plantas PSA-6 y PSA-4.

## **CAPITULO II**

### **MARCO TEORICO**

#### **2.1 Antecedentes**

Jiménez, A. y Salazar T. (2004), describieron opciones de almacenamiento para el gas natural en superficie; para ello definieron cada uno de los tipos de almacenamiento en superficie tanto del gas natural como de los líquidos del gas natural, efectuando comparaciones entre ellos y estableciendo las ventajas y desventajas de cada uno. A través de la investigación pudieron constatar que la selección del tipo de almacenamiento a utilizar va a depender de las condiciones del fluido a almacenar.

Vargas, M. y Hernández, J. (2004), a través de un diseño de investigación documental analizaron que el almacenamiento y transporte de productos refrigerados provenientes de los hidrocarburos en el complejo criogénico de oriente, es una técnica que proporciona el método más conveniente para almacenar grandes cantidades de estos productos.

Rodríguez, M. y Sanhueza, C. (2004), con el objetivo de determinar las pérdidas en el poliducto que alimenta los líquidos del gas natural (LGN) a la planta de fraccionamiento del complejo criogénico de oriente Jose en el estado Anzoátegui, realizaron un estudio de dicho poliducto proveniente de la planta de extracción Santa Bárbara, para lo cual describieron el sistema de transmisión de LGN desde Santa Bárbara - Jose, especificando las condiciones de diseño y de operación, estableciendo que la zona topográfica

y el volumen de fluido transmitido forman parte de las principales causas de pérdidas de los LGN en el poliducto.

Delvalle, K. (2004), realizó un análisis de las opciones de almacenamiento y transporte de los líquidos del gas natural en el oriente del país, tanto en la superficie como en el subsuelo a fin de establecer la mejor opción. Determinó que el método más recomendado en el subsuelo, es el almacenamiento de líquidos del gas natural en yacimientos agotados con características específicas, y en la superficie se obtuvo el almacenamiento refrigerado como el más conveniente.

Mosquera, B. (2004), diseñó un tanque criogénico para almacenamiento de nitrógeno líquido con capacidad de 12 metros cúbicos, con el fin de cubrir la necesidad de este gas inerte en una empresa agroindustrial dedicada al procesamiento de frutas, con el propósito de evitar su oxidación en las diferentes etapas del proceso; logrando incrementar, tecnificar y mejorar dichos procesos.

En este trabajo se evaluarán las pérdidas de nitrógeno líquido en el sistema de almacenamiento LV-2, para ello se realizará una descripción del funcionamiento de las plantas separadoras de aire, se estudiará el tramo de tubería de alimentación al tanque proveniente de la planta PSA VI, especificando sus condiciones de diseño y de operación, tal como lo hicieron Rodríguez M y Sanhueza C. Con respecto a las pérdidas que ocurren en el tanque, se analizará si el tamaño, capacidad y diseño del mismo es apropiado para almacenar la producción proveniente de PSA 4 y PSA 6, como lo hicieron Vargas M y Hernández J, además se realizarán propuestas para minimizar estas pérdidas.



## 2.2 Procesos de sidor

La fabricación de acero en SIDOR se cumple mediante procesos de reducción directa y hornos eléctricos de arco, complementados con metalurgia secundaria en los hornos de cuchara que garantizan la calidad interna del producto. Finos de material con alto contenido de hierro se aglomeran en la planta de peletización, el producto resultante (las pellas) es procesado en dos plantas de reducción directa: una llamada HyL II, que cuenta con dos módulos de lecho fijo, y otra llamada Midrex que posee cuatro módulos de lecho móvil, que garantizan la obtención de hierro de reducción directa (HRD); éste se carga a los hornos eléctricos de arco para obtener el acero líquido. En la figura 2.1 se presenta el esquema del sistema de reducción.

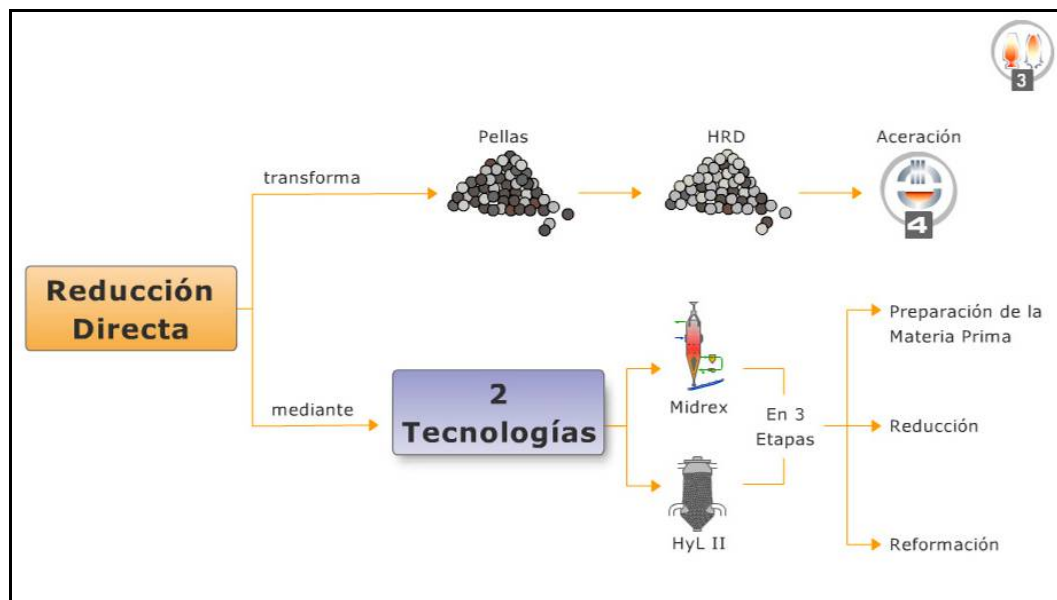


Figura 2.1. Sistema de reducción (Sidor C.A., 2005)

El acero líquido resultante con alta calidad y bajo contenido de impurezas y residuales, tiene una mayor participación de HRD y una menor proporción de chatarra (20% máximo). Su refinación se realiza en las estaciones de metalurgia secundaria, donde se le incorporan las ferroaleaciones; posteriormente pasa a las máquinas de colada continua para su solidificación, obteniéndose productos semielaborados como planchones y palanquillas, que se destinan a la fabricación de productos planos y productos largos, respectivamente (Sidor C.A., 2005)

### **2.2.1 Fabricación de productos planos**

El acero en estado líquido es conducido a los moldes de las máquinas de colada continua, para darle en este caso una forma rectangular llamada planchón, producto semielaborado que se utiliza en los procesos de transformación mecánica en caliente (Sidor C.A., 2005).

#### **2.2.1.1 Productos planos laminados en caliente**

Los planchones son cargados en hornos de recalentamiento, bajo condiciones controladas de atmósferas y velocidad de calentamiento, donde alcanzan una temperatura de laminación del orden de los 1.250 °C. Las características de este calentamiento permiten desarrollar ciertos procesos metalúrgicos que incidirán en las propiedades del producto final, eliminando imperfecciones superficiales y ablandando el acero para ser transformado mecánicamente en el tren de laminación en caliente.

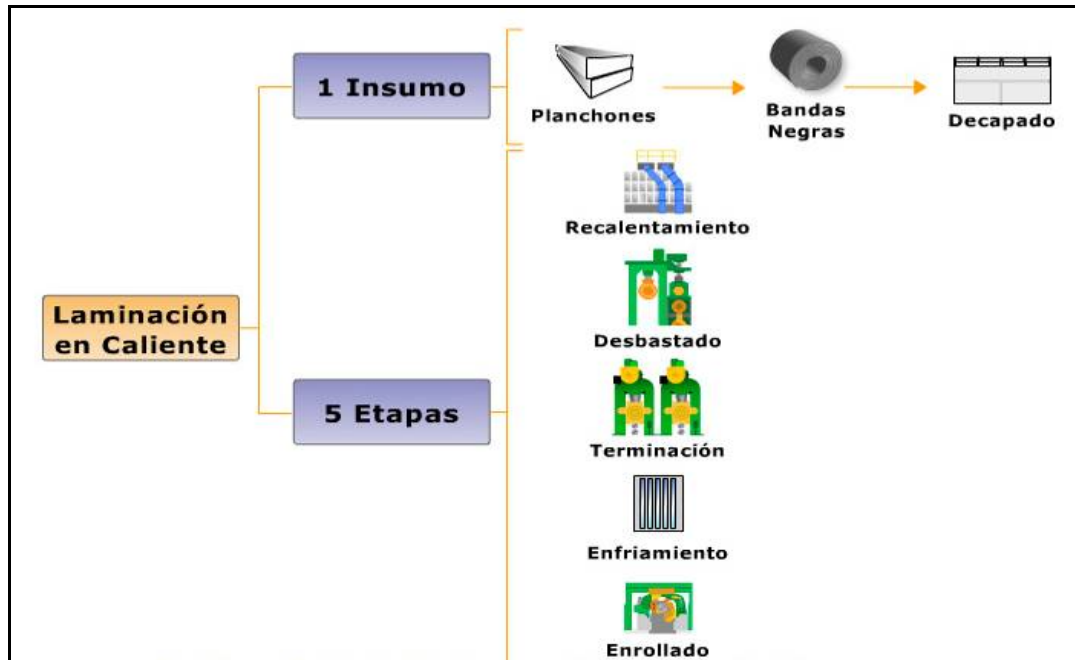
Posterior al calentamiento, los planchones son sometidos a un proceso de descamación a través de chorros de agua a alta presión, para así remover las cascarillas de óxido formado por efecto de las altas temperaturas. De allí

pasan a un tren desbastador, donde se reduce su espesor hasta un rango de 24 a 30 mm y se generan sinuosidades y deformaciones que deben ser eliminadas a través de un despunte, para lo cual utilizan cizallas instaladas en las vías de rodillos. Luego del despunte, el desbaste pasa a un laminador continuo, en el cual se le confiere al material atributos tales como dimensiones, calidad superficial, planeza y las características mecánicas necesarias.

Las bandas ya producidas, pueden ser despachadas como bobinas, en láminas cortadas de forma transversal según los requerimientos del cliente, o continuar al decapado como paso previo a la laminación en frío. Este proceso de decapado se lleva a cabo, haciendo pasar las bandas de manera continua por tanques de ácido clorhídrico, para eliminar el óxido producido durante la laminación. Posteriormente, son lavadas con agua para eliminar el ácido remanente en la superficie y luego se protegen con aceite mineral de fácil remoción. En la figura 2.2 se muestra el proceso de laminado en caliente (Sidor C.A., 2005).

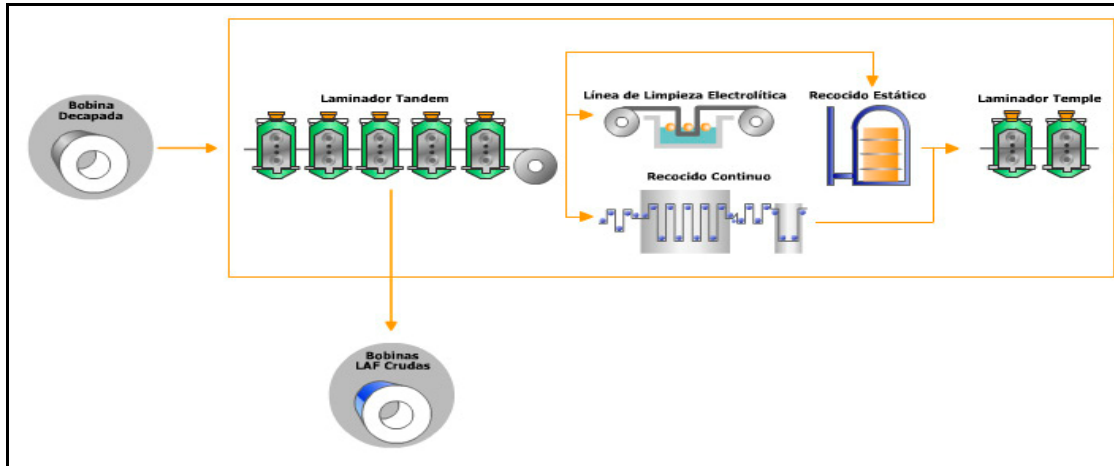
#### **2.2.1.2 Productos planos laminados en frío**

La laminación en frío se realiza mediante el procesamiento de bobinas decapadas, a través de bastidores de alta potencia colocados en serie, capaces de reducir el espesor de la banda hasta 0,17 mm. Durante esta laminación se utiliza una emulsión para lubricar y disminuir la fricción generada por el roce entre los bastidores y la lámina. Esta emulsión debe ser removida al final del proceso de laminación, para lo cual se hace pasar el material a través de una línea de limpieza electrolítica, en la que se utilizan soluciones calientes de detergentes alcalinos.



**Figura 2.2. Sistema de laminación en caliente (Sidor C.A., 2005)**

El material laminado en frío es duro, poco flexible y con usos restringidos, por lo que debe ser tratado térmicamente para ablandarlo y recuperar sus características mecánicas. Este tratamiento se cumple bajo dos modalidades: el recocido estático, que se lleva a cabo cubriendo las láminas con una campana que protege el material con una atmósfera no oxidante compuesta por hidrógeno y nitrógeno, y sobre la cual se coloca un horno que permite someter a las piezas a ciclo de calentamiento, que además de proteger el acero de una reoxidación lo limpia de los remanentes de la emulsión utilizada durante la laminación; y el recocido continuo proceso en el cual se hacen pasar las láminas de manera continua por un horno a temperatura apropiada (Sidor C.A., 2005).



**Figura 2.3. Sistema de laminación en frío (Sidor C.A., 2005)**

Luego del recocido, las bobinas se someten a un proceso de laminación en temple, con reducciones inferiores al 1%. De esta manera se logra suprimir el punto de fluencia que se encuentra en el material recocido, además de mejorar la forma y planeza, obteniendo un acabado superficial óptimo en la llamada hoja negra simple reducida. Los productos obtenidos en esta área, podrán ser proporcionados en bobinas, cortadas en láminas a longitudes específicas, o continuar procesos posteriores con recubrimiento electroquímico de cromo o estaño. En la figura 2.3 se presenta el esquema del proceso del sistema de laminación en frío (Sidor C.A., 2005).

### **2.2.1.3 Productos recubiertos**

El recubrimiento se efectúa mediante el uso de corriente eléctrica para depositar el estaño o el cromo sobre la superficie del acero. En esta fase no existe una aleación entre el acero y el estaño o el cromo; para que exista una buena adhesión, se requiere que la superficie esté limpia y libre de óxidos en el caso de la hoja estañada. Posteriormente, se funde y temple el recubrimiento para lograr la formación de una aleación entre el acero y el

estaño o cromo, que garantiza el brillo y la resistencia del depósito. El producto final recubierto puede ser suministrado en bobinas, en láminas o se les puede aplicar cualquier otro tipo de procesamiento necesario de acuerdo a las necesidades de los clientes. En la figura 2.4 se presenta un proceso de recubrimiento electrolítico (Sidor C.A., 2005).

### 2.2.2 Fabricación de productos largos

La palanquilla es un producto semielaborado de sección cuadrada, cortado a una determinada longitud, y posteriormente transformado por laminación o forja en caliente para obtener productos tales como barras lisas y con resaltes, alambrón, entre otros. En la figura 2.5 se muestra el esquema de la fabricación de los productos largos (Sidor C.A., 2005).

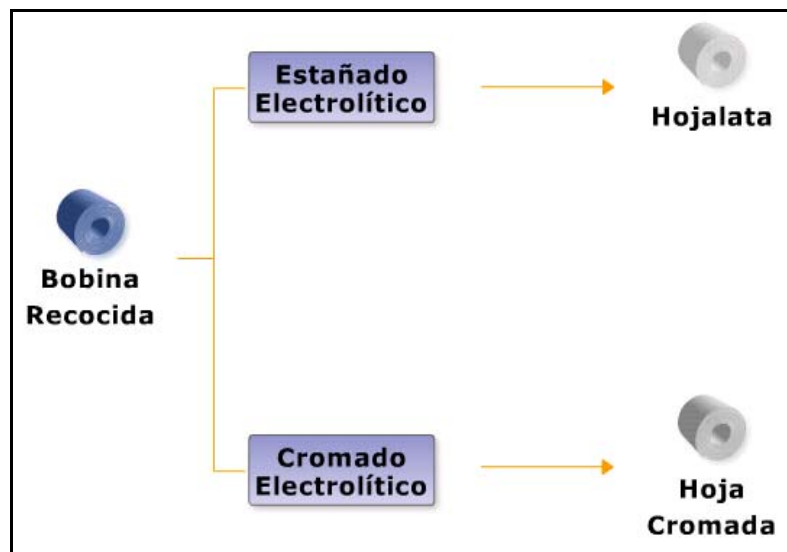
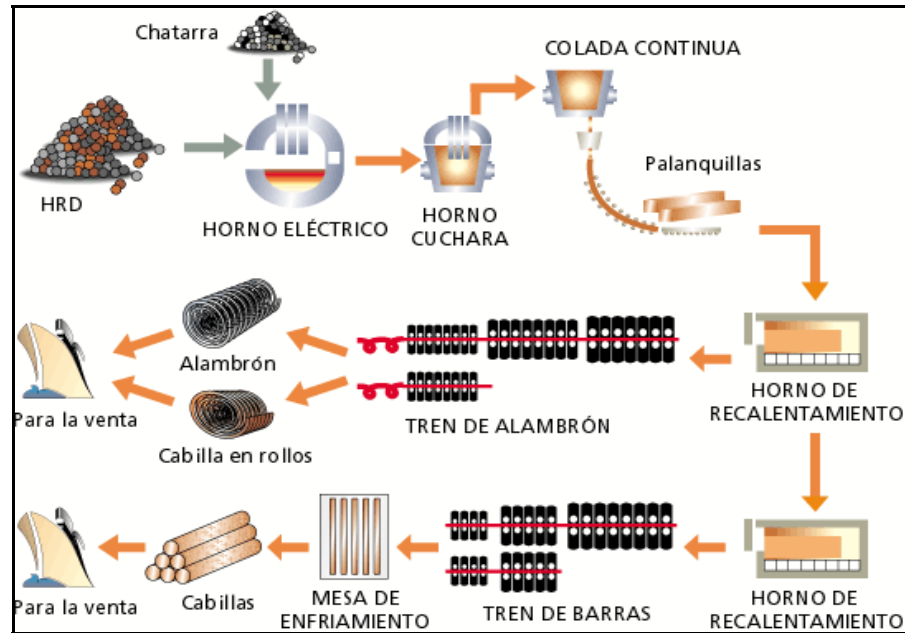


Figura 2.4. Recubrimiento electrolítico (Sidor C.A., 2005)



**Figura 2.5. Esquema de producción de productos largos (Sidor C.A., 2005)**

### 2.2.2.1 Barras

Las palanquillas son cargadas en hornos de recalentamiento y llevadas a la temperatura de laminación de 1.250 °C. Este tratamiento permite por medio de la oxidación generada, remover pequeños defectos superficiales y ablandar el acero para ser transformado mecánicamente en los laminadores de barra, que reducen la sección, hasta llegar a la forma y característica superficial deseada. Estas barras son cortadas mediante una cizalla de corte en frío, en longitudes comerciales y según los requerimientos del cliente (Sidor C.A., 2005).

### **2.2.2.2 Alambrón**

El alambrón es un producto de sección transversal circular y superficie lisa, obtenido por laminación en caliente de palanquillas. Durante este proceso se hace pasar la palanquilla a través de cilindros y anillos laminadores que gradualmente reducen la sección, hasta llegar al diámetro final deseado. Luego es llevado a cajas de enfriamiento con agua, para lograr así la temperatura adecuada para las transformaciones que permitirán alcanzar las propiedades mecánicas del diseño. El producto final es ofrecido en rollos, con una gama de diámetro del alambrón, de acuerdo a las necesidades de los clientes (Sidor C.A., 2005).

### **2.2.3 Plantas de fraccionamiento de aire**

Las plantas de separación de aire de SIDOR generan los gases industriales necesarios para la producción de acero. El oxígeno es insumo fundamental para las acerías, ya que ayuda a la combustión del carbono y a la desfosforación y, en los procesos de reducción directa generan reacciones exotérmicas que mejoran la productividad. El nitrógeno es utilizado para crear atmósferas inertes siendo sus principales consumidores las plantas de reducción directa, los recocidos y las acerías. El argón es usado en las acerías para agitar y homogeneizar térmica y químicamente el baño de acero líquido. También ayuda a la flotación de inclusiones y a la desulfurización.

Los productos generados en las plantas de separación de aire son de alta pureza. Las especificaciones requeridas por nuestros clientes internos son: oxígeno gas y líquido: 99,9%vol; nitrógeno gas y líquido: < 2ppm O<sub>2</sub>, argón líquido: < 2ppm O<sub>2</sub> y < 3ppm N<sub>2</sub>. Con la instalación de las nuevas



plantas de separación de gases del aire PSA-5 y PSA-6 se busca seguir consolidando los planes de crecimiento de SIDOR, al lograr mayor eficiencia y productividad de los equipos industriales actuales, aumentando los niveles de producción de hierro de reducción directa (HRD) y acero líquido (Sidor C.A., 2008).

### **2.3 Criogenia**

Es la técnica utilizada para la producción y utilización de bajas temperaturas. Se usa para producir gases de alta pureza a bajo costo por medio de la condensación y la destilación fraccionada, y para refrigerar materiales o alterar sus propiedades físicas.

La aplicación práctica de la criogenia comenzó con la separación del aire. Las plantas de separación de aire producen oxígeno, nitrógeno, argón y si se desea también se pueden obtener los gases nobles de neón, criptón y xenón. El intercambiador de calor principal de conmutación es el núcleo de la planta básica de separación de aire. En la moderna planta de separación donde se separan grandes cantidades de aire, se utiliza una combinación de expansor y refrigeración Joule-Thomson. El aire se comprime hasta 700 kPa (aproximadamente 100 psi) en el compresor. El intercambiador principal enfría previamente al aire utilizando para ello las corrientes efluentes de productos y extrae el dióxido de carbono y la humedad por solidificación y condensación; el expansor proporciona el enfriamiento del proceso. Las columnas de alta y baja presión separan los componentes primarios, oxígeno y nitrógeno, y concentran el argón. La columna de argón crudo separa aún más el argón del oxígeno (Kirk, 1999).

## **2.4 Métodos de refrigeración y licuefacción**

En una planta de refrigeración y licuefacción, se necesita producción de frío para compensar el ingreso de calor que ocurre en la parte fría de la planta y además durante la producción de líquidos para abastecer el frío que se llevan los líquidos producidos. Los principios de producción de frío, que se utilizan en las plantas de separación de aire del departamento de fluidos industriales de SIDOR, son los siguientes: (Linde, 1978)

### **2.4.1 Expansión de Joule-Thomson**

Es un proceso termodinámico que utiliza expansión isoentálpica para lograr temperaturas criogénicas y es conocido por lo común como ciclo Linde o Joule-Thomson. Este tipo de expansión se realiza cuando se disminuye la presión del fluido bajo condición adiabática y sin extracción de trabajo del mismo. Durante este proceso de expansión, no baja la entalpía del fluido pero sí su temperatura, por lo tanto, puede usarse el líquido expandido como refrigerante. Así pues, cualquier disminución de presión que ocurre en la planta, incluyendo las caídas en las tuberías, contribuye al enfriamiento Joule-Thomson, pero la mayor parte de la expansión ocurre a través de las válvulas de estrangulación y las válvulas de control, de modo que se puede controlar la caída de presión.

Se produce la expansión Joule-Thomson cuando se expande el gas o el líquido a una menor presión, y la cantidad de enfriamiento obtenido depende del descenso de la presión, de las propiedades del fluido y de la temperatura de éste antes de la expansión. En la mayoría de los casos el efecto de refrigeración aumenta a medida que se aumenta la caída de presión, que baja la temperatura que tiene el gas antes de la expansión (Linde, 1978).

### **2.4.2 Expansión a través de máquinas**

La expansión de gases comprimidos a través de una máquina enfría el gas de forma similar a la expansión de Joule-Thomson, pero la expansión a través de una máquina también extrae energía calorífica del gas, transformándola en trabajo mecánico en la máquina, por lo tanto, el gas que se expande a través de una máquina posee una capacidad de enfriamiento más alta que la de un gas expandido mediante la expansión Joule-Thomson (Linde, 1978).

### **2.4.3 Acumulación de refrigeración con empleo de intercambiadores de calor**

El enfriamiento de la planta avanza en etapa, ya que ninguna expansión del aire teniendo una temperatura ambiente rebajaría su temperatura lo suficiente para licuarlo. Sin embargo, usando los intercambiadores para intercambiar calor entre el aire que ingresa y el aire expandido a baja presión, se retiene en la planta el enfriamiento logrado en cada etapa de expansión, hasta que finalmente el aire a alta presión se enfría lo suficiente para formar líquido cuando se expande (Linde, 1978).

## **2.5 Sistema de linde para la separación del aire**

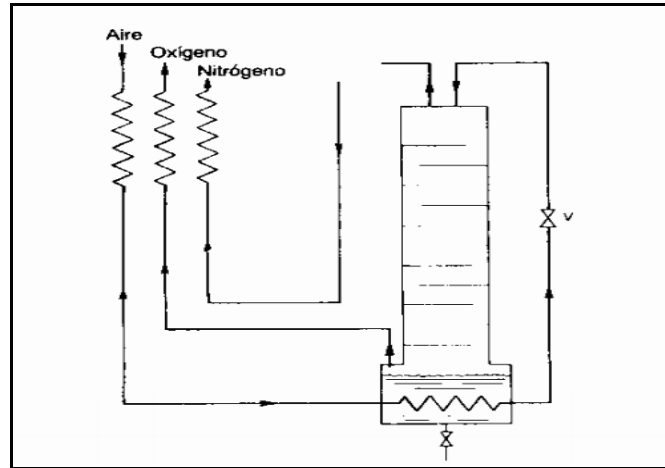
### **2.5.1 Sistema de Linde de columna simple para la separación del aire**

De los esquemas de operación disponibles para la separación del aire, el más simple es conocido como sistema de Linde de columna simple, introducido por primera vez en 1902. En este sistema el aire puro comprimido pasa a través de un intercambiador de calor para su preenfriamiento,

después se pasa a través de un serpentín en el calentador de la columna de rectificación, donde tiene lugar un enfriamiento adicional (actuando al mismo tiempo como la fuente de calor del calentador). Después de esta etapa tiene lugar una expansión, en esencia a presión atmosférica mediante una válvula Joule-Thomson, y se llega a formar básicamente líquido, que vuelve a entrar por la parte superior de la columna.

Luego tiene lugar una rectificación, con lo cual se obtiene el producto gaseoso o líquido, según sea el caso. Si este producto es oxígeno en fase gaseosa, el aire debe comprimirse y liberarse a presiones entre 3 y 6 MPa; si es líquido, es necesario tener presiones de 20 MPa.

Lamentablemente, en un proceso de columna simple, aunque la pureza de oxígeno sea alta, la corriente de nitrógeno es impura. La concentración de vapor en equilibrio para una mezcla que tiene una composición inicial de 21% de oxígeno y 79% de nitrógeno a 100 kPa de presión, es aproximadamente del 6 a 7% de oxígeno, es decir, la corriente de nitrógeno tendrá una impureza de oxígeno de esa magnitud, con lo que no es útil para ninguna aplicación de nitrógeno puro en fase gaseosa. En la figura 2.6 se puede apreciar una columna Linde para separación de aire (Perry, 1998).

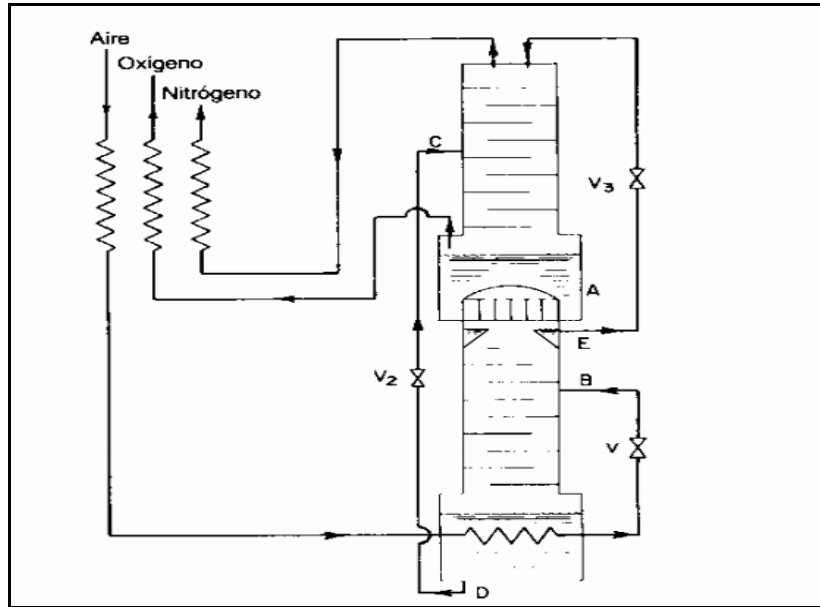


**Figura 2.6. Columna de Linde simple para separación de aire (Perry, 1998)**

### **2.5.2 Sistema de Linde de columna doble para separación de aire**

El problema de la impureza indicado en el sistema de columna simple, fue resuelto con la introducción de un sistema de Linde de doble columna, mostrada en la figura 2.7, en el cual existen dos columnas de rectificación y se coloca una en la parte superior de la otra.

En este sistema, el aire líquido se introduce en un punto intermedio B a lo largo de la columna inferior, y un condensador-evaporador en la parte superior de esta columna se establece como una columna de destilación con reflujo que libere casi todo el oxígeno puro en el punto E. Para que la columna libere de manera simultánea el oxígeno puro, el oxígeno líquido rico (con aproximadamente el 45% de pureza) obtenido desde el fondo se introduce en el punto C intermedio en la columna superior. El reflujo y la rectificación en la columna superior producen oxígeno puro en el fondo y nitrógeno puro en la parte superior, además de que la mayor parte de las impurezas se eliminan primero de la columna.



**Figura 2.7. Separador de aire de Linde en columna doble (Perry, 1998)**

En la columna superior se produce nitrógeno más que suficiente para las necesidades de reflujo. Como el condensador debe condensar vapor de nitrógeno por evaporación de oxígeno líquido, es necesario operar la columna inferior a gran presión, aproximadamente 500 kPa mientras que la columna superior es operada a una presión aproximada de 100 kPa. Este objetivo se logra con válvulas de regulación que ayuden a reducir la presión de los fluidos de la columna inferior cuando van a ser admitidos en la columna superior.

En el circuito mostrado en la figura 2.7, el nitrógeno y el oxígeno gaseoso se extraen a temperatura ambiente. El oxígeno líquido podría extraerse en el punto A y el nitrógeno líquido en el punto E, pero en este caso se requeriría mayor cantidad de refrigerante. Aun las plantas de separación de aire a bajas temperaturas más modernas tienen una eficiencia

cuyo valor es sólo una fracción pequeña del mínimo teórico, entre el 15 y el 20 %.

Las principales fuentes de la baja eficiencia son tres:

- La no idealidad de los procesos refrigerantes
- La imperfección de los intercambiadores de calor
- Las pérdidas de refrigeración mediante las fugas de calor (Perry, 1998).

## **2.6 Sistemas de almacenamiento de fluidos criogénicos**

Los recipientes de almacenamiento van desde los condensadores de bajo rendimiento aislados con espuma rígida o algún aislamiento fibroso, donde el líquido en el contenedor llega al punto de ebullición en pocas horas hasta los contenedores de alto rendimiento que tienen aislamiento en capas múltiples, en los que sólo se evapora menos del 0,1% del fluido contenido por día. En las unidades más eficientes, los contenedores de almacenamiento consisten en un recipiente interno que encierra el fluido criogénico que se almacena, y otro externo o chaqueta de vacío. En este último es necesario el vacío para que el almacenamiento sea adecuado y sirva al mismo tiempo como una barrera de vapor para la migración del vapor de agua y otros condensables en la superficie fría del recipiente interno.

Las fugas de calor tienen lugar en estos sistemas de almacenamiento de dos formas, por radiación y conducción a través del aislamiento, y por conducción a través de los soportes de la coraza interna, tubería, instrumentación y puertos o lugares de acceso. Las pérdidas por conducción se reducen al introducir largas trayectorias de fuga de calor, mediante la

formación de secciones transversales para tener bajos flujos de calor y utilizando materiales de baja conductividad térmica. Las pérdidas por radiación son el factor de fuga más importante a través de los aislamientos, pero pueden reducirse mediante el empleo de corazas de radiación, como aislamiento en capa múltiple, coraza para condensación de vapor frío y aislamiento en forma de polvo.

Se deben considerar diversos aspectos al diseñar el recipiente; los materiales de construcción deben ser compatibles con la sustancia criogénica almacenada. Se aceptan recipientes de acero al níquel al 9% para fluidos criogénicos de alto punto de ebullición ( $>75$  °K), mientras que muchas aleaciones de aluminio y aceros austeníticos son considerados estructuralmente aceptables para cualquier temperatura criogénica. Como el aluminio posee alta conductividad térmica, no es un material recomendado para tuberías y soportes que deben cruzar el espacio de aislamiento.

La mayor parte de los contenedores para fluidos criogénicos se diseñan con un volumen de merma de 10%, con lo que se permite una vaporización razonable de los contenedores debido al ingreso de calor, sin que se incurra en un descenso rápido de la presión en el contenedor (Perry, 1998).

## **2.7 Aislamiento térmico**

La eficiencia de un sistema de licuefacción o refrigeración depende en gran medida de las fugas de calor que tienen lugar en el sistema. Como la eliminación de calor llega a ser muy costosa con la reducción de la temperatura, la mayor parte de los sistemas criogénicos utilizan alguna forma de aislamiento para minimizar este efecto.



El calor puede fluir a través del aislamiento a causa de la acción simultánea de diversos sistemas, entre los que se encuentran la conducción de sólidos, conducción de gases y radiación. Estos fenómenos se presentan de manera simultánea e interactúan además uno con otro, por lo que es práctica común emplear la propiedad de la conductividad térmica para caracterizar el aislamiento. Estos aislamientos criogénicos, se dividen en cuatro categorías: al vacío, de capa múltiple, con polvo y con espuma (Perry, 1998).

### **2.7.1 Aislamiento al vacío**

El transporte de calor a través de un espacio evacuado (donde la presión es de 0,13 MPa o un poco mayor) se efectúa por radiación y conducción a través del gas residual, donde la transferencia de calor por radiación es el tipo predominante en esta categoría. Cuando se tiene conducción gaseosa normal con conductividad térmica constante, existe un gradiente lineal de temperatura en el espacio entre las superficies caliente y fría. Sin embargo, cuando la trayectoria libre media de las moléculas del gas llega a ser grande en relación con la distancia existente entre las dos superficies cuando se reduce la presión en un espacio evacuado, se puede obtener la conducción molecular libre. A fin de que tenga lugar la conducción molecular libre, la trayectoria libre media debe compararse con la distancia entre las dos superficies.

El transporte de calor por radiación se puede reducir de manera eficaz con la inserción de corazas flotantes que tienen superficies de baja emisividad en el espacio evacuado. Una coraza de baja emisividad puede reducir la transferencia de calor hasta la mitad del valor que se tiene sin

coraza; dos corazas reducen este valor a la cuarta parte, y así sucesivamente (Perry, 1998).

### **2.7.2 Aislamiento de capa múltiple**

El aislamiento de capa múltiple, consiste en capas alternadas de material con alta reflectividad, como hojas de aluminio o mylar aluminizado y materiales espaciadores o aislantes de baja conductividad, como fibra de vidrio, vidrio tejido, nylon, todos al alto vacío. Es probable que la baja conductividad térmica de los aislamientos de capa múltiple pueda atribuirse al hecho de que todos los mecanismos de transferencia de calor (convectivo, conductivo y radiactivo) se vean reducidos a un mínimo.

Como la transferencia de calor por radiación es inversamente proporcional al número de corazas intermedias reflejantes y directamente proporcional a la emisividad de las corazas, esta radiación se minimiza utilizando muchas corazas o capas de materiales con baja emisividad. La convección se elimina al disminuir la presión hasta un valor en que la trayectoria libre media de las moléculas del gas sea tan grande como el espaciamiento entre las capas de aislamiento. La transferencia de calor a través del material espaciador es directamente proporcional a la conductividad térmica del material que se utilice e inversamente proporcional a la resistencia al flujo de calor en los puntos de contacto entre los espaciadores y la coraza; la baja conductividad, las dimensiones, la geometría y la naturaleza discontinua de los materiales seleccionados para estos espaciadores, contribuye a reducir la conducción en sólido hasta un valor mínimo (Perry, 1998).

### **2.7.3 Aislamiento con polvo**

Un método empleado para lograr algunos de los beneficios de corazas flotantes múltiples, sin incurrir en las dificultades de las delicadas complicaciones estructurales, se logra utilizando aislamientos en forma de polvo. La falla que se tiene al emplear un aislamiento con estas características es la reducción de la eficiencia térmica total del sistema de aislamiento, respecto a la que se obtendría con aislamiento de capa múltiple.

El sistema de aislamiento con polvo consiste en un material compuesto de partículas finamente divididas, como perlitas, dióxido de sílice expandido, silicato de calcio, tierra diatomácea, carbón negro, que se coloca como empaque entre las superficies que se van aislar. Cuando la presión del gas es del orden de 0,1 MPa (por lo general con un inerte), el polvo reduce la transferencia de calor por convección y radiación, y cuando el tamaño de la partícula es suficientemente pequeño, también reduce la trayectoria libre media de las moléculas del gas. Cuando el polvo se evacua a presiones entre 1,33 y 0,133 Pa, la conducción del gas llega a ser muy pequeña y la transferencia de calor se efectúa de manera principal por radiación y conducción de sólidos (Perry, 1998).

### **2.7.4 Aislamiento con espuma**

Como las espumas no son materiales homogéneos, su conductividad térmica aparente depende de la densidad del material, el gas utilizado, la formación de la espuma y la temperatura media del aislamiento. La conducción de calor a través de este aislante se determina por la convección y radiación en las celdas (poros), y en la estructura sólida la evacuación de una espuma eficaz para la reducción de la conductividad térmica, indica que

se tiene una estructura celular parcialmente abierta, pero los valores obtenidos serán parcialmente mayores que en los aislamientos con capa múltiple o polvo. El efecto opuesto, la difusión de gases atmosféricos en las celdas, puede ocasionar un incremento en la conductividad térmica aparente; Esto se hace más significativo para la difusión de hidrógeno y helio en las celdas.

La mayor desventaja de la espumas no es que su conductividad térmica sea relativamente alta cuando se compara con otros aislantes, sino su rendimiento térmico muy bajo. Cuando se aplica a sistemas térmicos, tienden a agrietarse cuando es sometida a ciclos térmicos constantes y pierde su valor de aislamiento (Perry, 1998).

## **2.8 Principio de las plantas separadoras de aire**

La base de este proceso es la separación del aire licuado en sus componentes, aprovechando las diferentes temperaturas de condensación de los mismos. Así una planta de fraccionamiento de aire debe disponer de los siguientes dispositivos para poder cumplir con el proceso: (Migoya, 2003)

### **2.8.1 Compresión de aire**

El aire atmosférico necesario para la licuación es succionado a través de un filtro por un compresor de aire multietapas y comprimido a la presión correspondiente al proceso. El calor de compresión es eliminado a través de varios intercambiadores de calor dispuestos en serie (Migoya, 2003).

### **2.8.2 Enfriamiento del aire de proceso**

El aire comprimido es enviado a una serie de lavadores de gas (*scrubber*), con el propósito de eliminar las impurezas sólidas suspendidas y bajar su temperatura antes de ser enviado al sistema de purificación (Migoya, 2003).

### **2.8.3 Sistema de purificación del aire**

El aire enfriado es enviado a un sistema de purificación (tamices moleculares). Estos equipos contienen en su interior un lecho de material adsorbente en el que se atrapan o adsorben por medio de adsorción física todas las impurezas contenidas en el aire las cuales son indeseables para el proceso (Migoya, 2003).

### **2.8.4 Enfriamiento del aire a la temperatura de licuación**

El aire limpio y seco es enviado a una serie de intercambiadores de calor reversibles. En estos equipos se enfría el aire hasta la temperatura de licuación, aprovechando el intercambio de calor entre los productos gaseosos y el nitrógeno de desecho que se obtienen de las columnas de destilación (Migoya, 2003).

### **2.8.5 Producción de frío**

La constante necesidad de frío para la instalación, causada por la pérdida de aislamiento, pérdidas en intercambio térmico y toma de líquidos de la parte de baja temperaturas, se cubre mediante expansión de aire en las

turbinas y por estrangulamiento en válvulas. Es necesaria la producción de frío según la necesidad de productos líquidos (Migoya, 2003).

### **2.8.6 Licuación**

La licuación tiene lugar en los condensadores, en los cuales se da un intercambio térmico entre el gas nitrógeno y oxígeno líquido. Por las distintas presiones a las que están sometidos estos medios, se licua por un lado nitrógeno mientras que por el otro se vaporiza oxígeno líquido. Ambos componentes son conducidos a las respectivas columnas directamente conectadas. Allí son empleados como líquido de reflujo para el mantenimiento correcto de la rectificación y extraídos como productos líquidos (Migoya, 2003).

### **2.8.7 Fraccionamiento del aire (rectificación)**

En la columna de alta presión tiene lugar un fraccionamiento preliminar del aire en un líquido rico en oxígeno y en nitrógeno. El líquido con elevada proporción de oxígeno es conducido desde el fondo de la columna de alta presión hasta la columna de baja presión. Una parte del nitrógeno líquido del fondo de la columna de alta presión es introducida por la parte superior de la columna de baja presión. En la columna de baja presión tiene lugar el fraccionamiento final del aire. Los productos  $O_2$  de la parte inferior y el  $N_2$  de desecho de la cabeza de la columna de baja presión se calientan hasta la temperatura ambiente al ingresar a los distintos intercambiadores térmicos, igualmente con el  $N_2$  puro el cual se obtiene de la cabeza de la columna de alta presión (Migoya, 2003).

### **2.8.8 Producción de argón**

La producción de argón se realiza en tres fases:

En primer lugar se obtiene argón crudo, el cual contiene todavía oxígeno y nitrógeno, en la columna de argón bruto conectada a la columna de baja presión. El argón crudo es recalentado en un intercambiador térmico y extraído de la parte de baja temperatura.

En la segunda fase se realiza la extracción del oxígeno, para ello se requiere comprimir la mezcla de argón, luego se mezcla una cantidad de hidrógeno equivalente a la parte de oxígeno, se genera una reacción de combustión catalítica en un reactor generando agua. El argón ha alcanzado una elevada temperatura alrededor de los 400 a 600°C y es enfriado en distintos intercambiadores térmicos. El agua formada y condensada se separa en equipo especial. La humedad restante se adsorbe en equipos que contienen en su interior un lecho adsorbente.

La tercera fase es la purificación final del argón. Éste se enfría previamente en intercambiador térmico hasta el punto de licuación y después se separa por rectificación en la columna de argón puro, en la cual se separan las trazas de nitrógeno e hidrógeno. El argón puro se extrae de la parte inferior de esta columna (Migoya, 2003).

## **2.9 Aire**

El aire es una mezcla de gases sin olor ni sabor, que permanecen alrededor de la Tierra formando la atmósfera por la acción de la fuerza de gravedad. El aire es esencial para la vida en el planeta y dentro de su

composición destacan como elementos más abundantes el nitrógeno, el oxígeno y el argón, y formando parte del mismo en menor proporción se encuentran otros gases tales como dióxido de carbono, hidrógeno, helio, neón, criptón y xenón. Además de estos constituyentes fijos, cuya proporción permanece prácticamente constante en las capas bajas de la atmósfera, contiene el aire otros gases como vapor de agua, ozono, hidruros volátiles y productos de combustión. En la tabla 2.1 se presentan los componentes del aire.

La composición del aire permanece constante por lo menos en los primeros 100 km más bajos de la atmósfera. Se han realizado determinaciones de estas proporciones mediante espectrómetros de masa incorporados a cohetes que lo han demostrado. Esta constancia de composición debe atribuirse a fenómenos de convección y turbulencia, sin embargo esto no implica que represente un estado de equilibrio sino más bien un estado estacionario, en el que una serie de procesos cíclicos liberan los componentes fundamentales a la misma velocidad que son consumidos como consecuencia de otras reacciones químicas en las que participan (Gases Industriales del Este, 2010).



**Tabla 2.1 Principales componentes del aire (Gases industriales del este, 2010)**

Componente	Símbolo Químico	Composición
Nitrógeno	N	78,03 %
Oxígeno	O	20,99 %
Argón	Ar	0,93 %
Dióxido de Carbono	CO <sub>2</sub>	0,03 %
Hidrógeno	H	0,01 %
Neón	Ne	0,00123 %
Metano	CH <sub>4</sub>	0,0002 %
Helio	He	0,0004 %
Criptón	Kr	0,00005 %
Xenón	Xe	0,000006 %
Vapor de agua	H <sub>2</sub> O	Variable
Ozono	O <sub>3</sub>	Variable
Óxido Nitroso	N <sub>2</sub> O	Variable

### 2.9.1 Propiedades físicas del aire

El aire tiene un comportamiento que es característico del estado gaseoso; posee masa y tiene la facultad de llenar de manera uniforme el espacio que lo contiene. Adicionalmente, el aire es de baja densidad, aproximadamente de 0,001293 g/cm<sup>3</sup> y además tiene la propiedad de ser un buen aislante térmico y ecléctico. Asimismo, este gas tiene la particularidad de expandirse y contraerse debido a los diferentes factores que permiten que

las moléculas se separen o se unan. Por ejemplo, a mayor temperatura, mayor el movimiento y mayor su separación, y a mayor presión externa, menor es el movimiento y menor es la distancia entre las partículas (Gases Industriales del Este, 2010).

### **2.9.2 Propiedades químicas del aire**

Las propiedades químicas del aire son análogas a las de sus componentes, dotados de impedimentos cinéticos que los hacen relativamente inertes en condiciones normales de temperatura. Así, aun cuando son posibles un gran número de reacciones de oxidación por el oxígeno del aire en disolución, son relativamente pocas las que se producen rápidamente. A temperaturas elevadas las reacciones del aire son debidas al oxígeno. El nitrógeno, mucho más inerte aún, no hace más que atenuar el vigor de las reacciones del oxígeno. Otra propiedad significativa que cabe recalcar es la psicrometría, que desde la perspectiva de la termodinámica es la capacidad que tiene el aire de captar y retener cargas de agua (Gases Industriales del Este, 2010).

### **2.9.3 Aplicaciones de los gases del aire**

Con independencia de su papel trascendental en los procesos biológicos (respiración), los gases del aire constituyen materias primas fundamentales en la industria química. La síntesis de fertilizantes nitrogenados y en particular del amoníaco fue el proceso que constituyó el estímulo inicial para la separación de los componentes del aire en gran escala. Inicialmente el nitrógeno fue el objeto fundamental de la separación, debido a que la distribución y transporte del oxígeno resultaba costosa y muchos de los procesos para los cuales era necesario este componente se

podían realizar con aire. Pero con el paso del tiempo en los países industrializados, se ha producido una enorme expansión en la utilización de oxígeno y de otros componentes del aire como el argón, lo cual ha llevado a la puesta en funcionamiento de nuevas instalaciones que permitan separar estos gases y así satisfacer las necesidades de las diferentes industrias debido a su diversidad de aplicaciones:

- Ciencia, investigación nuclear, farmacéutica y salud.
- Industria textil, del papel, goma y plástico.
- Industria de la alimentación, ganadera y agropecuaria.
- Industria química, petroquímica y del petróleo.
- Industria de la construcción, vidrio y esmalte.
- Protección ambiental, conservación de lagos y ríos, y tratamiento de aguas negras.
- Industria siderúrgica, metalúrgica, aluminio y automotriz.
- Distribución electrotécnica, electrónica y comunicaciones.
- Militar, armamentos aeronavales, astilleros, protección industrial (Gases Industriales del Este, 2010).

## **2.10 Nitrógeno**

El nitrógeno en estado natural aparece como un gas diatómico, incoloro, inodoro, insípido, no tóxico, no corrosivo, no inflamable y en fase líquida es extremadamente frío. Constituye el 78% del aire atmosférico y posee una reactividad baja hacia la mayor parte de las sustancias comunes a condiciones normales, esto a causa del fuerte enlace triple entre sus átomos. Sin embargo, bajo la influencia de químicos, electricidad o elevadas temperaturas (condiciones especiales) reacciona con cromo, silicio, titanio,

aluminio, boro, berilio, magnesio, bario, estroncio, calcio y litio para formar nitruros, con oxígeno para formar óxidos nitrosos, y en presencia de un catalizador con hidrógeno a temperaturas y presión bastante altas para formar amoníaco.

El nitrógeno no puede considerarse como contaminante en sentido estricto, ya que no es tóxico y se halla principalmente en el aire de la atmósfera de modo natural; en el agua y en los suelos puede ser encontrado en forma de nitratos y nitritos, sustancias que forman parte del ciclo del nitrógeno. Los seres humanos han cambiado radicalmente las proporciones naturales de estos compuestos, debido a la extensa emisión de nitrógeno por parte de las industrias, incrementando así el suministro de nitratos y nitritos en los suelos y agua originando alteraciones en el ciclo e incrementando las concentraciones del mismo en el agua potable.

El nitrógeno comercial es el producto de la separación del aire por medio de una destilación fraccionada, en la cual se somete al aire a una serie de compresiones y expansiones rápidas, con lo que se llega a enfriar lo suficiente para licuarse. A presión atmosférica posee una temperatura de ebullición  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  y calor latente de vaporización de  $198\text{ kJ/kg}$ . Estas dos características dan al nitrógeno la capacidad de eliminar calor y bajar la temperatura en el proceso, donde se requiere tener un control de la temperatura. En la tabla 2.2 se muestran las propiedades físicas del nitrógeno (Gases Industriales del Este, 2010).

**Tabla 2.2 Propiedades físicas del nitrógeno (Oxicar C.A., 2008)**

<b>Propiedad</b>	<b>Unidades U.S.</b>	<b>Unidades S.I.</b>
Fórmula molecular	N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
Peso molecular	28,01	28,01
Punto de fusión (1 atm)	-345,8 °F	-209,9 °C
Calor latente de fusión (1atm, punto triple)	1,1 Btu/lb	25,7 kJ/kg
Densidad del líquido (1atm, punto ebullición)	50,47 lb/pie <sup>3</sup>	808,6 kg/m <sup>3</sup>
Punto de ebullición (1atm)	320 °F	195,9 °C
Calor latente de vaporización (1atm, punto ebullición)	85,6 Btu/lb	198 kJ/kg
Temperatura crítica	-232,4 °F	-146,9 °C
Presión crítica	493 psig	3399 kPa (abs)
Densidad crítica	19,60 lb/pie <sup>3</sup>	314,9 kg/m <sup>3</sup>
Temperatura del punto triple	346,18 °F	-210,1 °C
Presión del punto triple	1,81 psig	12,53 kPa
Densidad del gas (1atm, punto ebullición)	0,288 lb/pie <sup>3</sup>	4,6 kg/m <sup>3</sup>
Densidad del gas (1atm, 21 °C )	0,072 lb/pie <sup>3</sup>	1,153 kg/m <sup>3</sup>
Factor de compresibilidad (1atm, 21 °C)	0,9997	0,9997
Gravedad específica (1atm, 21 °C)	0,967	0,967
Volumen específico (1atm, 21 °C)	13,89 pie <sup>3</sup> /lb	0,867 m <sup>3</sup> /kg
Capacidad calorífica a presión constante (1atm, 21 °C)	0,248 Btu/lb	1,042 kJ/kg
Capacidad calorífica a volumen constante	0,177 Btu/lb	0,742 kJ/kg
Viscosidad (1atm, 0 °C)	0,0000111 lb/(pie.s)	0,0001657 Poise
Conductividad térmica (1atm, 0 °C)	0,0138 Btu.pie/(h.pie <sup>2</sup> .°F)	0,024 W/(m.K)

### **2.10.1 Aplicaciones del nitrógeno a nivel industrial**

En la industria metalúrgica el nitrógeno es aplicado para crear atmósferas inertes en tuberías, tolvas, tanques, silos y otros equipos en los cuales exista probabilidad de explosión dentro de la industria. Además es utilizado en el tratamiento de aceros y otros metales; específicamente, en la fabricación de láminas de acero, es combinado con hidrógeno para formar un compuesto llamado HNX, que le da el brillo y acabado a las bobinas.

En la industria química y petroquímica, el nitrógeno es utilizado para la inertización de sistemas a efecto de proteger las materias primas y la calidad de los productos, para la formación de peróxidos y/o gomas, la preparación de catalizadores y en la síntesis de amoníaco a través del cual se preparan una gran variedad de productos químicos como fertilizantes, urea y ácido nítrico. Además se aplica para la protección contra incendios y explosiones, y para el control de temperatura en los reactores.

En la industria del petróleo y del gas, es empleado en fase gaseosa en la presurización para limpieza de tuberías de distribución de inflamables y en la protección de la calidad de sus productos e instalaciones.

En la industria de alimentos y bebidas, es utilizado en forma líquida para enfriar, congelar y almacenar productos alimenticios, con el fin de preservarlos y transportarlos. En estado gaseoso es empleado en contacto con los productos alimenticios para evitar la oxidación y el crecimiento de microorganismos, y así preservar y proteger los productos para su empaquetamiento. Dado el carácter insípido e inerte de este gas, su

utilización en esta industria no implica riesgo alguno en la salud de los comensales, ni influye en el sabor de los alimentos.

En las industrias eléctricas se usa para llenar los bulbos de las lámparas incandescentes.

En el área medicinal es empleado para la conservación a bajas temperaturas de órganos humanos para trasplantes, de células reproductivas para inseminación artificial y para la conservación de sangre humana por más de siete años. También es utilizado en tratamientos de enfermedades dermatológicas y en la criocirugía.

En área de laboratorios y análisis, el nitrógeno es utilizado como un gas portador inerte en cromatografía de gases para los análisis y control de calidad en medios industriales y hospitalarios.

En la industria electrónica es aplicado para crear atmósferas inertes en la producción de transistores, diodos, circuitos integrados, etc. En estado líquido es empleado como un medio de enfriamiento de dispositivos electrónicos en pruebas ambientales (Air Liquide, 2009).

### **2.10.2 Efectos fisiológicos del nitrógeno**

El nitrógeno es no tóxico pero puede producir asfixia al diluir la concentración de oxígeno en el aire hasta los niveles inferiores a los necesarios para mantener la vida (19%). La exposición a atmósferas deficientes de oxígeno puede producir respiración acelerada, fallas de juicio, coordinación muscular afectada, inestabilidad emocional y fatiga. A medida que la asfixia progresa, pueden resultar mareos, náuseas, vómito, pérdida de

conciencia y eventualmente convulsiones, coma y hasta la muerte. La inconciencia y la muerte en bajas concentraciones de oxígeno pueden presentarse en segundos sin previo aviso.

La exposición de la piel u ojos, al contacto con nitrógeno líquido y sus vapores fríos puede producir graves quemaduras y daños a los tejidos, presentando efectos como el cambio de color en la piel a gris o blanco, posiblemente seguido de ampollas (Gases Industriales del Este, 2010).

### **2.10.3 Almacenamiento del nitrógeno**

El nitrógeno en estado gaseoso es almacenado en cilindros a altas presiones, y en fase líquida en tanques o termos criogénicos diseñados específicamente para resguardarlos térmicamente. Estos contenedores ya sea de líquido o gas deben ser ubicados en áreas ventiladas, evitando la exposición a humedad, sales y otros químicos que puedan causar un proceso de corrosión. Además el área de almacenamiento debe encontrarse delimitada para evitar el paso de personal no autorizado que pueda manipular de forma incorrecta el producto (Nitrox C.A., 2007).

### **2.10.4 Manipulación del nitrógeno**

- Evitar el contacto del nitrógeno líquido o sus vapores fríos con la piel.
- El nitrógeno debe ser manejado y almacenado sólo en áreas ventiladas.
- Evitar dejar líquidos de nitrógeno atrapados dentro de sistemas cerrados.



- Mantener la válvula cerrada mientras el cilindro no se encuentre en servicio o si ya está vacío.
- Las válvulas de nitrógeno deben ser abiertas lentamente, ya que el producto gaseoso se encuentra a altas presiones.
- Utilizar una válvula de contención o anti retorno en la línea de descarga para prevenir un contraflujo peligroso al sistema.
- No se deben forzar las válvulas ni introducir objetos en los orificios de las mismas, ya que se pueden dañar y provocar la fuga del producto.
- Los cilindros de nitrógeno gaseoso deben ser manipulados con cuidado ya que se encuentran a alta presión, evitando arrastrar o golpear el cuerpo de los mismos o la válvula.
- Utilizar un regulador para reducir la presión cuando se vaya a emplear el producto en un sistema de menor presión (AGA, 2005).

#### **2.10.5 Proceso para la obtención de nitrógeno**

El aire es succionado desde la atmósfera por un compresor centrífugo de cuatro etapas y pasa a través de un sistema de filtro para eliminar partículas sólidas en suspensión que posee el aire. En la entrada al compresor, el aire se encuentra a una presión de 1 kg/cm<sup>2</sup> y una temperatura de 27 a 30 °C aproximadamente. A medida que pasa a través de cada una de las etapas de compresión, su temperatura aumenta y es necesario eliminar el calor por medio de tres enfriadores en contracorriente colocados en la salida de cada una de las etapas de compresión. El aire entra con la presión de 8 kg/cm<sup>2</sup> y una temperatura de 110 °C, pasa a un post-enfriador de tipo contacto directo, lo que trae la ventaja de que además de enfriar el aire, elimina parte de las impurezas como el dióxido de carbono y otros gases solubles, y sale a una temperatura de 40 °C aproximadamente. Para

obtener una temperatura más baja del aire de proceso, éste continúa el enfriamiento con agua que, a su vez es enfriada por el nitrógeno de desecho que sale de los intercambiadores reversibles, aquí el aire llega a una temperatura de 10 °C aproximadamente.

El aire posee ciertos componentes como el dióxido de carbono, vapor de agua e hidrocarburos que deben ser eliminados antes de la introducción a la columna, de no ser así el proceso sufriría ciertas perturbaciones. Si circularan a través del proceso dióxido de carbono y vapor de agua, éstos pasarían de estado gaseoso a líquido y posteriormente a sólido, obstruyendo así los pasajes dentro de la columna. Los hidrocarburos como el acetileno reaccionan con el oxígeno puro pudiendo provocar una explosión en el condensador. Entonces, para la eliminación de estas impurezas, el aire pasa por el proceso de adsorción en los tamices moleculares. Existen por lo general dos equipos que trabajan en conjunto, de forma tal, que cuando uno de ellos se satura se procede a limpiarse con nitrógeno caliente (regeneración), mientras que en ese momento el otro realiza el trabajo de purificación.

Una vez cumplido este paso, el aire continúa su circulación a través de intercambiadores reversibles para su enfriamiento hasta la temperatura de licuefacción por intercambio de calor con los productos gaseosos de manera que circulen en forma alterna. En este punto el aire sale a una temperatura de – 165 °C, aproximadamente. Es importante controlar las temperaturas de los diferentes fluidos a fin de asegurar un balance térmico del proceso, porque de no ser así se puede perder la pureza de los productos, o peor aún permitir la entrada de dióxido de carbono y humedad al sistema, lo cual imposibilita la correcta operación de la planta.

El aire entra a una columna de alta presión para su rectificación, la cual consiste en separar el aire en sus componentes debido a los diferentes puntos de ebullición. Aquí se encuentra una serie de platos o bandejas perforadas que posee la columna donde la cantidad de éstos determina la pureza del producto final. El nitrógeno impuro sale de la parte intermedia de la columna de alta presión, pasa por un enfriador para refrigerar en contracorriente y entra en la parte superior de una columna de baja presión donde es usado como sello. Sigue por el licuefactor a intercambiar temperatura con el oxígeno, pasando luego por los intercambiadores reversibles para el intercambio térmico y limpieza de conducto. Este nitrógeno sigue su recorrido al tamiz molecular para el enfriamiento del agua y regeneración de los tamices para luego ser expulsado a la atmósfera. El nitrógeno puro gaseoso sale de la cabeza de la columna de alta presión, una parte va hacia la columna de producción de argón para la rectificación, pasa a enfriarse por el licuefactor hasta llegar a los intercambiadores reversibles y así intercambiar calor con los productos gaseosos, obteniendo en la salida una presión de 5 a 7 kg/cm<sup>2</sup>, aproximadamente.

Luego se lleva a la presión deseada por los usuarios a través de una válvula reguladora. Una parte de este nitrógeno puro es utilizado para llenar las reservas gaseosas a una presión de 40 kg/cm<sup>2</sup> a través de dos compresores, pasando por sus respectivos enfriadores para sacarlo luego a 4 kg/cm<sup>2</sup> aproximadamente, para los usuarios en caso de un alto consumo.

Una parte del nitrógeno gaseoso que se encuentra en la cabeza de la columna de alta presión pasa a los condensadores donde ocurre un intercambio térmico entre el nitrógeno gaseoso a 6 kg/cm<sup>2</sup> y el oxígeno líquido a 7 kg/cm<sup>2</sup>. En estas condiciones de presión, la temperatura de licuefacción del nitrógeno es más alta que la temperatura de ebullición del

oxígeno, por lo tanto el resultado de este intercambio es la licuefacción del nitrógeno y la evaporación del oxígeno (Linde, 1978).

## 2.11 Oxígeno

El oxígeno es un gas a temperatura y presión ambiental; bajo estas condiciones presenta fórmula molecular  $O_2$ . Es ligeramente magnético, incoloro, inodoro, insípido, comburente y reacciona fácilmente con materiales orgánicos y metálicos. Existe en otras dos formas moleculares, una formada por tres átomos de oxígeno,  $O_3$ , denominada ozono, y otra formada por cuatro átomos por molécula,  $O_4$ , ésta última se descompone fácilmente en oxígeno ordinario.

Es uno de los elementos más importantes de la química y participa de forma muy importante en el ciclo energético de los seres vivos, esencial en la respiración celular de los organismos aeróbicos y en los procesos de combustión. En su forma triatómica, (ozono) desempeña un rol importante protegiendo a la Tierra de la incidencia de la radiación ultravioleta procedente del sol.

El oxígeno es el elemento más abundante en la Tierra, siendo éste el que predomina en la corteza terrestre, donde se encuentra como componente de la mayoría de las rocas y minerales (un 46,7% estimado), en los océanos (en torno al 87% como componente del agua) y el segundo en la atmósfera (cerca del 21%), además representa un 60% del cuerpo humano.

En su estado líquido y sólido, este elemento tiene una ligera coloración azulada; reacciona con prácticamente todos los metales, provocando la corrosión, forma compuestos llamados óxidos con casi todos los elementos.

En la combustión espontánea, el calor desarrollado por la reacción de oxidación es suficientemente grande para elevar la temperatura de la sustancia hasta el punto de producir llamas; por ejemplo, el fósforo se combina tan vigorosamente con el oxígeno, que el calor liberado en la reacción hace que el fósforo se funda y arda.

Los métodos industriales más importantes para la obtención de oxígeno son la electrólisis del agua y la destilación fraccionada de aire líquido. En este último método se licua el aire y se deja evaporar el nitrógeno, ya que es más volátil y se vaporiza primero quedando el oxígeno en estado líquido. En la tabla 2.3 se muestran las propiedades físicas del oxígeno (Gases Industriales del Este, 2010).

**Tabla 2.3. Propiedades físicas del oxígeno (Oxicar C.A., 2008)**

Propiedad	Unidades U.S.	Unidades S.I.
Fórmula molecular	O <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
Peso molecular	31,9988	31,9988
Punto de fusión (1 atm)	-362 °F	-219 °C
Calor latente de fusión (1atm, punto	5,96 Btu/lb	13,9 kJ/kg
Densidad del líquido (1atm, punto	71,23 lb/pie <sup>3</sup>	1141 kg/m <sup>3</sup>
Punto de ebullición (1atm)	-297 °F	-183 °C
Calor latente de vaporización (1atm, punto ebullición)	91,7 Btu/lb	13,86 kJ/kg
Temperatura crítica	-181,43 °F	-118 °C
Presión crítica	731,4 psig	5043 kPa (abs)
Densidad crítica	27,22 lb/pie <sup>3</sup>	436,1 kg/m <sup>3</sup>
Temperatura del punto triple	-361,8 °F	-218.8 °C
Presión del punto triple	0,022 psi	0,1480 kPa
Densidad del gas (1atm, punto	0,279 lb/pie <sup>3</sup>	4,475 kg/m <sup>3</sup>
Densidad del gas (1atm, 21 °C )	0,084 lb/pie <sup>3</sup>	1,326 kg/m <sup>3</sup>
Factor de compresibilidad (1atm, 21 °C)	0,9994	0,9994
Gravedad específica (1atm, 21 °C)	1,105	1,105
Volumen específico (1atm, 21 °C)	12,08 pie <sup>3</sup> /lb	0,7541 m <sup>3</sup> /kg
Capacidad calorífica a presión constante	0,2197Btu/lb°F	0,9191 kJ/kg °C
Capacidad calorífica a volumen	0,1572 Btu/lb°F	0,6578 kJ/kg °C
Viscosidad (1atm, 0 °C)	0,0000128	0,0001909
Conductividad térmica (1atm, 0 °C)	0,014 Btu pie/(h pie <sup>2</sup> °F)	0,0242 W/m.K

### 2.11.1 Aplicaciones del oxígeno a nivel industrial

En la industria metalúrgica el oxígeno es utilizado en el área de tratamiento del metal en soldaduras oxicorte, en la fabricación de acero líquido (acerías) como comburente para crear lanzas de oxígeno que aumentan la energía química en los hornos de fundición (hornos de arco eléctrico). Además, es utilizado en el área de reducción directa, donde las

pellas ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) se convierten en hierro metálico al ponerse en contacto con un medio reductor, compuesto por una mezcla de gas natural y oxígeno.

En la industria química y petrolera, este elemento es utilizado para mejorar el rendimiento de un amplio número de procesos, como la producción de gasolina, metanol y amoníaco, y para enriquecer la regeneración del aire en unidades de craqueo catalítico de fluidos. Además es empleado en reacciones químicas de oxidación como la producción de óxido de etileno, óxido de propileno, acetato de vinilo, sulfato férrico, etc.

En la industria de alimentos y bebidas, es usado en la piscicultura, en la aceleración de procesos de fermentación y en la creación de atmósferas modificadas para el envasado de carnes.

En la industria de pulpa y papel, el oxígeno es utilizado para el blanqueo ecológico de la pasta de papel, es aplicado principalmente en la etapa de delignificación. Interviene también en la producción y combustión de licores de polisulfuros (hornos de calentamiento, dosificación de calderas) y en el tratamiento de los efluentes como precursor de ozono.

En el área de la ciencia y la medicina, el oxígeno es empleado en ensayos y calibraciones, como medio de oxidación detector de ionización y como suplemento en pacientes con dificultades respiratorias.

En las industrias del vidrio y del cemento, es empleado principalmente para la fundición del vidrio y en general para todo proceso de oxicomustión.

En la industria electrónica, el oxígeno puro es usado para la oxidación activa de ciertos materiales tales como el silicio o dióxido de silicio y para la fabricación de ozono en la oxidación o limpieza.

En el área del espacio y aeronáutica, el oxígeno es empleado en forma líquida en una mezcla combustible utilizada para la propulsión de etapas criogénicas de cohetes.

En la protección ambiental, el oxígeno es utilizado para incrementar el tratamiento de los efluentes de agua (DBO, barro, olores, energía), mejora el tratamiento del agua minimizando los barros generados y actúa en la purificación del agua potable (Air Liquide, 2009).

### **2.11.2 Efectos fisiológicos del oxígeno**

El oxígeno no es tóxico bajo la mayoría de las condiciones de uso y es necesario para mantener la vida en el planeta, pero en estado líquido o gaseoso a bajas temperaturas, congelaría los tejidos y ocasionaría quemaduras criogénicas severas, y como ozono es altamente perjudicial por su acción irritante. Aunque este elemento sólo no es inflamable, sí es un excelente comburente y reacciona violentamente con materias combustibles y puede causar fuego y explosiones.

La inhalación de este gas en altas concentraciones (mayores de 75%) causa síntomas de hiperoxia que incluyen náuseas, mareos, dolor de garganta, hipotermia, problemas respiratorios, dolor en el pecho, pérdida de la visión, y en algunos casos afecta el sistema nervioso causando contorsiones musculares, pérdida del conocimiento y convulsiones, capaces de conducir a la muerte (Gases Industriales del Este, 2010).



### **2.11.3 Almacenamiento del oxígeno**

El oxígeno gaseoso se envasa en cilindros de alta presión y en estado líquido en tanques o termos criogénicos a la presión permisible de acuerdo al diseño del recipiente.

Estos contenedores, ya sea de líquido o de gas, deben ser ubicados en espacios frescos y ventilados, lejos de áreas congestionadas y salidas de emergencia. Asimismo, deben estar separados de materiales combustibles e inflamables por una distancia mínima de 6 metros. Además se deben prevenir ataques químicos o daños mecánicos como cortes o abrasión sobre la superficie de los contenedores y evitar que los mismos entren en contacto con algún sistema energizado eléctricamente (Nitrox C.A., 2007)

### **2.11.4 Manipulación del oxígeno**

- Evitar el contacto del oxígeno líquido o sus vapores fríos con la piel.
- El oxígeno debe ser manejado en áreas ventiladas.
- Prevenir que líquidos de oxígeno queden atrapados en sistemas cerrados.
- Las válvulas de oxígeno deben ser abiertas lentamente, ya que el producto gaseoso se encuentra a altas presiones.
- Es esencial la limpieza y la compatibilidad de los materiales en contacto con oxígeno.
- No forzar las válvulas de oxígeno ni introducir objetos en los orificios de la misma, ya que se podrían causar daños y provocar fuga del producto.

- Los cilindros de oxígeno deben ser manipulados con cuidado, evitando arrastrar o golpear el cuerpo de los mismos o la válvula.
- Utilizar una válvula de control o de retención para evitar riesgos de retroceso de flujo al interior del contenedor.
- Usar un regulador para reducir la presión, cuando se vaya a emplear el producto en un sistema de menor presión (AGA, 2005)

### **2.12 Argón**

El argón es un elemento monoatómico, incoloro, inodoro, insípido, no tóxico, no corrosivo y no inflamable, tanto en estado líquido como gaseoso, además posee una solubilidad en agua 2,5 veces mayor que la del nitrógeno y la del oxígeno. Es el elemento más abundante de los gases nobles presentes en el aire y constituye un 0,93% de la atmósfera, siendo ésta la única fuente conocida para la extracción del mismo. Sin embargo, se encuentran trazas de este gas en minerales y meteoritos. El argón es un gas extremadamente inerte y no reacciona químicamente con otros elementos.

La producción de argón a nivel industrial, se lleva a cabo por destilación fraccionada del aire líquido. Dado que el punto de ebullición del argón está entre el del nitrógeno y el del oxígeno, se puede obtener una mezcla rica en argón de las fracciones de las capas correspondientes a la parte superior de la columna de destilación. La mezcla rica en argón se destila, se calienta y se quema catalíticamente con hidrógeno para eliminar el oxígeno. Mediante una destilación final se elimina el hidrógeno y nitrógeno, produciendo argón de elevada pureza. En la tabla 2.4 se presentan las propiedades físicas del argón (Gases Industriales del Este, 2010).

### **2.12.1 Aplicaciones del argón a nivel industrial**

En la industria metalúrgica, el argón es utilizado como gas protector contra los efectos de la oxidación del aire con la soldadura y corte de metales, para la desgasificación y remoción de impurezas en la industria del aluminio, y como gas inerte de soplado en la industria del acero, con el fin de homogeneizar temperatura y composición química en el acero líquido.

En la industria de alimentos y bebidas, se usa en atmósferas controladoras reemplazando al nitrógeno en la mayoría de sus aplicaciones. Su solubilidad y determinadas características moleculares le proporcionan propiedades especiales para el uso con vegetales, ya que bajo ciertas condiciones reduce las reacciones metabólicas (Air Liquide, 2009)

**Tabla 2.4. Propiedades físicas del argón (Oxicar, C.A., 2008)**

Propiedad	Unidades U.S.	Unidades S.I.
Fórmula molecular	Ar	Ar
Peso molecular	39,95	39,95
Punto de fusión (1 atm)	-308,6 °F	-189,2 °C
Calor latente de fusión (1atm punto triple)	12,8 Btu/lb	29,6 kJ/kg
Densidad del líquido (1atm punto ebullición)	87,02 lb/pie <sup>3</sup>	1394 kg/m <sup>3</sup>
Punto de ebullición (1atm)	-302,6 °F	-185,9 °C
Calor latente de vaporización (1atm, punto ebullición)	69,8 Btu/lb	162,3 kJ/kg
Temperatura crítica	-188,1 °F	-122,3 °C
Presión crítica	711,5 psig	4905 kPa (abs)
Densidad crítica	33,44 lb/pie <sup>3</sup>	535,6 kg/m <sup>3</sup>
Temperatura del punto triple	-308,8 °F	-199,3 °C
Presión del punto triple	9.965 psig	68,7 kPa (abs)
Densidad del gas (1atm, punto triple)	0,365 lb/pie <sup>3</sup>	5,853 kg/m <sup>3</sup>
Densidad del gas (1atm, 21 °C )	0,103 lb/pie <sup>3</sup>	1,650 kg/m <sup>3</sup>
Factor de compresibilidad (1atm, 21 °C)	0,9993	0,9993
Gravedad específica (1atm, 21 °C)	1,38	1,38
Volumen específico (1atm, 21 °C)	9,707 pie <sup>3</sup> /lb	0,606 m <sup>3</sup> /kg
Capacidad calorífica a presión constante (1atm, 21 °C)	0,1257Btu/lb°F	0,523 kJ/kg °C
Capacidad calorífica a volumen constante (1atm, 21 °C)	0,075 Btu/lb°F	0,314 kJ/kg °C
Viscosidad (1atm, 0 °C)	0,0000141	0,0002099 Poise
Conductividad térmica (1atm, 0 °C)	0,0094 Btu pie/(h pie <sup>2</sup> °F)	0,0163W/m.K

En el campo eléctrico, se emplea como gas de relleno en lámparas incandescentes ya que no reacciona con el material del filamento incluso a altas temperaturas y presión, prolongando de este modo la vida útil de la bombilla.

En la industria electrónica, el argón es utilizado como gas de plasma en espectrometrías de emisión de plasma, en la fabricación de semiconductores y circuitos, y como gas de protección contra impurezas para los mismos.

En la fabricación de vidrio, el argón por su capacidad de aislamiento térmico es empleado para el relleno del espacio interior en ventanas de doble acristalamiento de alta eficiencia térmica.

En el buceo técnico, se emplea el argón para el inflado de trajes secos los que impiden el contacto de la piel con el agua a diferencia de los húmedos típicos de neopreno tanto por ser inerte como por su pequeña conductividad térmica lo que proporciona el aislamiento térmico necesario para realizar largas inmersiones a cierta profundidad (Air Liquide, 2009)

#### **2.12.1.1 Efectos fisiológicos del argón**

El argón no es tóxico pero puede producir asfixia al diluir la concentración de oxígeno en el aire hasta niveles inferiores a los necesarios para mantener la vida. Este gas se considera un asfixiante simple, y como tal, los primeros síntomas producidos son respiración rápida y fatiga, la alerta mental disminuye y la coordinación muscular se ve perjudicada, el juicio se vuelve imperfecto y todas las sensaciones se deprimen y normalmente resulta en inestabilidad emocional. A medida que la asfixia progresa, pueden presentarse náuseas y vómitos, postración y pérdida de consciencia, y finalmente convulsiones, coma profundo y muerte por asfixia.

La exposición de la piel y ojos al contacto con argón líquidos o sus vapores fríos pueden ocasionar graves daños a los tejidos por quemaduras criogénicas (Gases Industriales del Este, 2010).

### **2.12.2 Almacenamiento del argón**

El argón en estado gaseoso es envasado en cilindros a alta presión y en estado líquido en tanques criogénicos especialmente diseñados para resguardarlos térmicamente. Estos contenedores deben ser almacenados en áreas ventiladas y lejos de fuentes de calor o donde puedan formar parte de un circuito eléctrico. Estas áreas deben encontrarse delimitadas y señaladas, libres de tráfico y congestión, a fin de evitar daños en los recipientes y la manipulación incorrecta de los mismos por personal no autorizado. Asimismo, se debe evitar la exposición a espacios donde estén presentes sales y otros químicos corrosivos (Nitrox C.A., 2007).

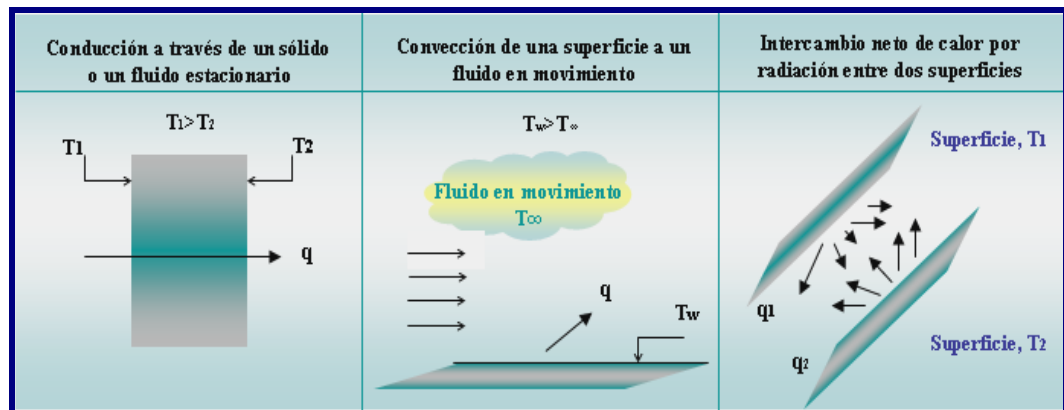
### **2.12.3 Manipulación del argón**

- Evitar el contacto de argón líquido o sus vapores fríos, con la piel y ojos.
- El argón debe ser manipulado en áreas ventiladas.
- Utilizar una válvula de contención o antireflujo en la línea de descarga de argón para prevenir un contraflujo peligroso al sistema.
- Prevenir que líquidos de argón queden atrapados en sistemas cerrados.
- Las válvulas de los cilindros de argón deben ser abiertas lentamente, ya que el producto gaseoso se encuentra a altas presiones.
- No forzar las válvulas de argón ni introducir objetos en los orificios de la misma, ya que se podrían causar daños y provocar fuga del producto.
- Los cilindros de argón deben ser manipulados con cuidado, evitando arrastrar o golpear el cuerpo de los mismos o la válvula.

- Usar un regulador para reducir la presión, cuando se vaya a emplear el producto en un sistema de menor presión (AGA, 2005)

### 2.13 Transferencia de calor

Se basa en el principio de la conservación de la energía, la cual establece que cuando un cuerpo se deja en un medio que tiene una temperatura diferente, la transferencia de energía sucede entre el cuerpo y los alrededores hasta que se establece el equilibrio térmico; es decir, el cuerpo y los alrededores alcanzan la misma temperatura. La dirección de la transferencia de energía siempre es del cuerpo de mayor temperatura al de temperatura más baja. El calor se transfiere, generalmente, por conducción, convección o radiación. [17] En la figura 2.3 se pueden apreciar los tres mecanismos de transferencia de calor.



**Figura 2.8. Modos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación (Marcano,2010)**

La ciencia de la transferencia de calor está relacionada con la razón de intercambio de calor entre cuerpos calientes y fríos llamados fuente y receptor. Esta ciencia pretende no sólo explicar cómo la energía térmica

puede ser transferida, sino también predecir la rapidez con la que, bajo ciertas condiciones específicas, tendrá lugar esa transferencia (Holman, 1998).

### 2.13.1 Conducción

Por este mecanismo, el calor puede ser conducido a través de sólidos, líquidos y gases. La conducción se verifica mediante la transferencia de energía cinética entre moléculas adyacentes. En un gas las moléculas “más calientes”, que tienen más energía y movimiento, se encargan de impartir energía a moléculas colindantes que están a niveles energéticos más bajos. Este tipo de transferencia siempre está presente, en mayor o menor grado, en sólidos, líquidos y gases en los que existe un gradiente de temperatura. En la conducción la energía también se transfiere por medio de electrones “libres”, un proceso muy importante en los sólidos metálicos. Entre los ejemplos en los que la transferencia se verifica ante todo por conducción, se cuentan la transferencia a través de paredes o intercambiadores de una nevera, el tratamiento térmico en el forjado de acero, la congelación del suelo durante el invierno, etc (Holman, 1998).

Los fundamentos de la conducción de calor se establecieron hace más de un siglo y se atribuyen generalmente a Fourier. La ley de Fourier de la conducción del calor, establece que la densidad de flujo de calor por conducción es proporcional al gradiente de temperatura y se representa mediante la ecuación 2.1 (Geankoplis, 1998).

$$q = -k \frac{dT}{dx} \quad (\text{Ec. 2.1})$$



*donde:*

q: flujo de calor por unidad de área o densidad de flujo de calor ( $W/m^2$ ).

k: conductividad térmica del sólido conductor ( $W/m \cdot K$ ).

dT: diferencial de temperatura (K).

dx: longitud del sólido conductor (m).

### **2.13.2 Convección**

La convección es un mecanismo de transferencia de calor que ocurre en una interfase sólido fluido, en donde el fluido actúa como vehículo para el transporte de energía, y la densidad de flujo de calor depende de la velocidad con que se renueva el fluido sobre la superficie del sólido. Normalmente se distinguen dos tipos de movimiento de fluido: laminar y turbulento. En régimen laminar, las líneas de corriente del fluido siguen trayectorias estables, de modo que al alcanzarse el estado estacionario la velocidad en cada punto es constante. En cambio, en el régimen turbulento, si bien se habla de un estado estacionario, donde cada punto del fluido puede caracterizarse por una velocidad media, existen fluctuaciones completamente aleatorias de velocidad alrededor de este valor medio (Cao, 2004).

Existen dos tipos de convección: natural y forzada. La diferencia entre ambas radica en que en la forzada se provoca el flujo de un fluido sobre una superficie sólida por medio de una bomba, un ventilador, u otro dispositivo mecánico, y en la convección libre o natural, un fluido más caliente o más frío que está en contacto con la superficie sólida causa una circulación debido a la diferencia de densidades que resulta del gradiente de temperaturas en el fluido (Holman, 1998).

Sin embargo, sin importar la naturaleza particular del proceso de transferencia de calor por convección, la ecuación o modelo apropiado es de la forma: (Incropera, 1999)

$$q = h (T_w - T_\infty) \quad (\text{Ec. 2.2})$$

donde:

q: flujo de calor por convección ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

h: coeficiente convectivo de transferencia de calor ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ )

$T_w$ : temperatura de la superficie (K)

$T_\infty$ : temperatura del fluido (K)

La ecuación 2.2 se conoce como la ley de enfriamiento de Newton, y la constante de proporcionalidad h se denomina coeficiente de transferencia de calor por convección, el cual depende de las condiciones en la capa límite, en las que influyen la geometría de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido y una variedad de propiedades termodinámicas del fluido y de transporte.

### 2.13.3 Radiación

Este mecanismo no depende de algún medio de transferencia y puede efectuarse a través del vacío absoluto. La rapidez a la que se emite energía radiante desde un cuerpo, es directamente proporcional a la amplitud de oscilación de sus moléculas; como el movimiento molecular u oscilación aumenta al elevarse la temperatura, la radiación del cuerpo se incrementará al elevarse la temperatura del mismo (Perry, 1998).

## 2.14 Simulación de procesos

Los simuladores permiten realizar una evaluación rápida y confiable de diversos procesos, proporcionando información útil para el diseño conceptual y básico, así como el estimado del costo de los equipos. También, mediante ellos es posible analizar u optimizar diagramas de flujo, localizar restricciones (cuellos de botellas) y predecir el comportamiento de plantas existentes que pueden ser sometidas a diversas condiciones de operación, a fin de analizar las respuestas del proceso a estas modificaciones, proporcionando guías para una mejor operación.

En una simulación se requiere de la información necesaria sobre el proceso, corrientes y equipos de la planta que se desean simular. Se hace necesario planificar un muestreo de las corrientes influyentes del proceso, elaborar un registro diario de los datos operacionales y preparar un diagrama de flujo del proceso a simular. Generalmente, un simulador está organizado de tal forma que cada equipo, proceso físico o termodinámico está representado por un modelo matemático equivalente a un módulo de cálculo donde se efectúan los balances de materia y energía de cada equipo, de acuerdo a una secuencia indicada por el usuario o establecida automáticamente por el simulador.

Finalmente, se puede decir que un simulador es un programa que predice el comportamiento de un proceso a partir de un modelo adecuado previamente analizado, que incluye: ecuaciones de transferencia de calor, sistema termodinámico adecuado, modelos de propiedades de transporte y de las características de construcción del mismo. La exactitud con la cual el programa produce los resultados dependerá básicamente de la fidelidad de

los modelos matemáticos y sus limitaciones teóricas, los métodos numéricos y la confiabilidad de los valores de las variables de entrada (White, 1998).

#### **2.14.1 Descripción del Simulador de Procesos HYSYS**

HYSYS es una herramienta que modela procesos para simulación en estado estacionario, diseño, supervisión de funcionamiento, optimización y planificación para negocios de producción de crudo, industrias de procesamiento del gas natural y refinación de petróleo.

Proporciona una solución en modelo de procesos intuitiva e interactiva que permite crear los modelos en estado estacionario para diseño de una planta, supervisión de funcionamiento, localización de averías, etc.

Para funcionar con eficiencia máxima y proveer de conocimientos necesarios, la herramienta de un modelo en estado estacionario debe combinarse con el robusto poder de la ingeniería. HYSYS aporta las herramientas para simular procesos de las industrias de petróleo y gas en especial. Este simulador presenta las siguientes características:

- **Ambiente Fácil de utilizar en Windows**

El DFP (Diagrama de flujo del proceso) suministra una representación gráfica clara y concisa del diagrama de proceso. Incluyendo características productivas tales como: cortar, copiar, pegar, autoconexión, entre otros.

- **Extensos Fundamentos Termodinámicos**

Asegura el cálculo exacto de propiedades físicas, propiedades de transporte y del comportamiento de fase para procesos de la industria del gas y refinación de petróleo. Contiene una extensa base de datos de componentes y la capacidad de agregar más componentes para ser utilizados.

- **Conformidad con Active X (Automatización OLE)**

Permite la integración de operaciones creadas por el usuario en la unidad, expresiones propias de las reacciones cinéticas y los paquetes de propiedades especializados. Interactúa fácilmente con programas como Microsoft Excel y Visual Basic.

- **Comprensión de las Operaciones Unitarias**

Incluye la destilación, reacciones, operaciones de transferencia de calor, equipos rotativos, operaciones lógicas en estado estacionario y ambiente dinámico.

Diseño y Clasificación Detallado de los Intercambiadores de Calor.

Los usuarios opcionalmente pueden vincularse a las herramientas rigurosas del diseño y clasificación de los intercambiadores de calor, tales como: intercambiadores de tubos y carcasa, intercambiadores de pasos múltiples y enfriadores de aire.

- **Evaluación Económica de Diseños de Procesos**

Los modelos de simulación de HYSYS pueden realizar evaluaciones económicas para gerencias de proyectos de diseños de procesos. Esta tecnología es útil para operaciones unitarias, costos de los equipos y del proceso.

- **Trabajos de Ingeniería Anticipados**

Los modelos de simulación HYSYS agilizan el proceso por anticipado en trabajos de ingeniería. Este proceso da lugar al incremento en la eficiencia de ingeniería, calidad y un tiempo del ciclo de proyecto reducido. HYSYS concede la flexibilidad máxima y el poder a sus usuarios para utilizar una arquitectura abierta que permita capacidades específicas a la industria para ser fácilmente añadidas por su proveedor o terceros. El simulador HYSYS ayuda a las industrias de proceso a mejorar la productividad y la rentabilidad a través del ciclo de vida de la planta. Las herramientas de gran alcance de la simulación en HYSYS son el análisis, las aplicaciones en tiempo real y el acercamiento integrado a las soluciones de ingeniería permitiendo a las industrias mejorar diseños, optimizar la producción y mejoras de decisiones para la fabricación (Aspen Tech, 2006).

Algunas ventajas claves de HYSYS son: diseños mejorados del proceso, supervisión de funcionamiento de los equipos y reducción de los costos de ingeniería.

## **CAPITULO III**

### **METODOLOGIA**

#### **3.1 Descripción del funcionamiento de las plantas PSA-6 y PSA-4.**

Para el cumplimiento de este objetivo se utilizó el documento de Descripción del Proceso PSA-5 – PSA-6, el documento Memoria Operativa de la PSA-6 y el Manual de Funcionamiento de PSA-4, a fin de verificar las condiciones de diseño y operación de las plantas antes mencionadas.

#### **3.2 Cálculo de las pérdidas de nitrógeno en el tanque de almacenamiento lv-2.**

Este objetivo se cumplió mediante medición directa en el tanque de almacenamiento LV-2 de la cantidad de nitrógeno gaseoso emitido al ambiente y la cantidad entregada a la empresa PRAXAIR desde el 01 de febrero de 2009 hasta el 27 de abril de 2009, que corresponde a un período de operación continua de planta de 86 días. Las mediciones fueron efectuadas directamente mediante un registro diario de los balances de masa, del porcentaje de volumen ocupado por el nitrógeno líquido en el tanque de almacenamiento LV-2 al inicio y al final del día, la diferencia entre los balances y la cantidad almacenada. A continuación se muestran los valores obtenidos.

**Tabla 3.1. Balance de masa del tanque LV-2 para el mes de febrero de 2009.**

FECHA	Producción N <sub>2</sub> (líq) PSA.4	Producción N <sub>2</sub> (líq) PSA.6	Despacho de LV-2	Gasificado	Venteo	% Volumen de N <sub>2</sub> (líq) en LV-2 (Sala de Control)	
	(Nm <sup>3</sup> /d)	(Nm <sup>3</sup> /d)	(Nm <sup>3</sup> /d)	(Nm <sup>3</sup> /d)	(Nm <sup>3</sup> /d)	% Inicial	% Final
01/02/2009	0,00	31.851,00	0,00	0,00	12.509,38	79,26	82,74
02/02/2009	0,00	31.328,00	11.409,32	0,00	12.503,09	82,74	83,82
03/02/2009	0,00	31.246,00	38.420,45	0,00	12.471,88	83,82	79,46
04/02/2009	0,00	31.537,88	43.493,04	0,00	12.562,30	79,46	74,50
05/02/2009	0,00	31.827,66	43.589,05	0,00	12.218,68	74,50	69,16
06/02/2009	0,00	33.430,00	0,00	0,00	12.473,11	69,16	72,89
07/02/2009	0,00	26.780,00	0,00	0,00	12.243,61	72,89	75,31
08/02/2009	0,00	31.388,00	0,00	0,00	12.304,48	75,31	78,82
09/02/2009	0,00	32.962,00	16.577,92	0,00	12.471,38	78,82	79,08
10/02/2009	0,00	32.622,00	26.771,10	0,00	12.508,97	79,08	77,29



**Tabla 3.1. Balance de masa del tanque LV-2 para el mes de febrero de 2009. (Continuación)**

FECHA	Producción N <sub>2</sub> (líq) PSA-4	Producción N <sub>2</sub> (líq) PSA-6	Despacho de LV-2	Gasificado	Venteo	% Volumen de N <sub>2</sub> (líq) en LV-2 (Sala de Control)	
	(Nm <sup>3</sup> /d)	(Nm <sup>3</sup> /d)	(Nm <sup>3</sup> /d)	(Nm <sup>3</sup> /d)	(Nm <sup>3</sup> /d)	% Inicial	% Final
11/02/2009	0,00	33.199,00	31.843,69	0,00	12.235,73	77,29	74,51
12/02/2009	0,00	33.560,00	15.921,84	0,00	12.016,17	74,51	75,07
13/02/2009	0,00	33.560,00	16.129,87	0,00	12.588,17	75,07	75,63
14/02/2009	0,00	33.559,00	0,00	0,00	12.570,77	75,63	79,37
15/02/2009	0,00	33.560,00	0,00	0,00	12.584,66	79,37	83,14
16/02/2009	0,00	33.560,00	15.921,84	0,00	12.664,37	83,14	83,68
17/02/2009	0,00	33.689,00	19.378,25	0,00	12.492,62	83,68	83,62
18/02/2009	0,00	33.789,00	43.317,02	0,00	12.409,80	83,62	78,82
19/02/2009	0,00	34.012,00	42.036,87	0,00	10.644,07	78,82	74,01
20/02/2009	0,00	33.813,00	15.505,80	0,00	10.146,01	74,01	74,75
21/02/2009	0,00	33.559,00	15.937,85	0,00	11.987,08	74,75	75,41
22/02/2009	0,00	33.560,00	0,00	0,00	12.723,06	75,41	79,23
23/02/2009	0,00	28.095,00	0,00	0,00	12.348,66	79,23	82,49
24/02/2009	0,00	29.095,00	0,00	0,00	12.721,63	82,49	85,52
25/02/2009	0,00	28.172,00	19.362,24	0,00	12.397,17	85,52	85,44
26/02/2009	0,00	29.352,00	22.082,56	0,00	12.466,30	85,44	84,18
27/02/2009	0,00	33.027,00	22.002,55	0,00	12.438,29	84,18	83,50
28/02/2009	0,00	32.736,00	22.066,56	0,00	12.472,82	83,50	82,60

Donde:

**Producción N<sub>2</sub>(líq) PSA-6:** Producción de Nitrógeno líquido de PSA-6

**Producción N<sub>2</sub>(líq) PSA-4:** Producción de Nitrógeno líquido de PSA-4

**Despacho de LV-2:** Entrega de Nitrógeno líquido vía cisternas a la empresa de PRAXAIR

**Venteo:** Volumen de nitrógeno de desahogo del tanque LV-2

**% Volumen de N<sub>2</sub>(líq) en LV-2:** Porcentaje de llenado del tanque medido en la sala de control

**Tabla 3.2. Balance de masa del tanque LV-2 para el mes de marzo de 2009**

FECHA	Producción N <sub>2</sub> (líq) PSA-4	Producción N <sub>2</sub> (líq) PSA-6	Despacho de LV-2	Gasificado	Venteo	% Volumen de N <sub>2</sub> (líq) en LV-2 (Sala de Control)	
	(Nm <sup>3</sup> /d)	(Nm <sup>3</sup> /d)	(Nm <sup>3</sup> /d)	(Nm <sup>3</sup> /d)	(Nm <sup>3</sup> /d)	% Inicial	% Final
01/03/2009	0,00	32.411,00	0,00	0,00	12.478,77	82,60	86,32
02/03/2009	0,00	32.738,60	10.081,17	0,00	12.520,20	86,32	87,80
03/03/2009	0,00	32.163,00	22.130,56	0,00	12.436,51	87,80	86,81
04/03/2009	0,00	30.638,00	21.890,54	0,00	12.304,70	86,81	85,69
05/03/2009	0,00	30.413,71	43.733,07	0,00	12.321,50	85,69	80,39
06/03/2009	0,00	31.621,00	0,00	0,00	12.263,52	80,39	83,76
07/03/2009	0,00	30.028,00	0,00	0,00	12.296,59	83,76	87,04
08/03/2009	0,00	27.564,00	0,00	0,00	12.312,89	87,04	89,84
09/03/2009	0,00	25.113,00	0,00	0,00	12.336,38	89,84	92,28
10/03/2009	0,00	23.422,19	64.775,50	0,00	12.430,42	92,28	81,78
11/03/2009	0,00	31.216,92	21.650,51	0,00	12.434,84	81,78	80,94
12/03/2009	0,00	33.559,00	21.586,50	0,00	12.449,75	80,94	80,38
13/03/2009	0,00	33.777,00	15.841,84	0,00	12.432,24	80,38	80,87
14/03/2009	0,00	33.593,00	16.097,87	0,00	12.490,96	80,87	81,29
15/03/2009	0,00	33.292,00	0,00	0,00	12.490,16	81,29	85,00
16/03/2009	0,00	28.446,82	0,00	3840,00	11.957,50	85,00	82,87
17/03/2009	0,00	33.261,36	0,00	0,00	12.300,01	82,87	82,60
18/03/2009	0,00	33.249,00	0,00	0,00	12.380,17	82,60	81,35
19/03/2009	0,00	29.027,00	0,00	4050,00	10.454,99	81,35	83,44
20/03/2009	0,00	32.270,00	0,00	0,00	10.303,76	83,44	74,49
21/03/2009	3.951,13	32.095,00	19.714,28	0,00	12.138,25	74,49	77,92
22/03/2009	12.287,07	32.403,36	0,00	0,00	12.333,51	77,92	83,16
23/03/2009	15.759,94	32.477,40	27.763,22	0,00	12.364,86	83,16	83,65
24/03/2009	7.793,19	31.822,07	21.410,48	0,00	12.369,87	83,65	84,00
25/03/2009	9.709,78	32.444,07	35.620,13	0,00	12.390,07	84,00	82,20
26/03/2009	13.801,44	32.469,65	34.868,04	0,00	12.364,84	82,20	80,96
27/03/2009	13.365,52	32.403,00	43.173,00	0,00	12.394,52	80,96	78,14
28/03/2009	13.391,92	32.309,00	34.836,04	0,00	12.341,13	78,14	77,04
29/03/2009	12.794,95	32.269,00	0,00	0,00	12.365,45	77,04	82,73
30/03/2009	10.212,03	32.200,00	26.515,07	0,00	12.383,50	82,73	82,64
31/03/2009	6.654,41	32.383,47	22.034,55	0,00	12.398,81	82,64	82,75

Donde:

**Producción N<sub>2</sub>(líq) PSA-6:** Producción de Nitrógeno líquido de PSA-6

**Producción N<sub>2</sub>(líq) PSA-4:** Producción de Nitrógeno líquido de PSA-4

**Despacho de LV-2:** Entrega de Nitrógeno líquido vía cisternas a la empresa de PRAXAIR

**Venteo:** Volumen de nitrógeno de desahogo del tanque LV-2

**% Volumen de N<sub>2</sub>(líq) en LV-2:** Porcentaje de llenado del tanque medido en la sala de control

**Tabla 3.3. Balance de masa del tanque LV-2 para el mes de abril de 2009**

FECHA	Producción N <sub>2</sub> (líq) PSA-4	Producción N <sub>2</sub> (líq) PSA-6	Despacho de LV-2	Gasificado	Venteo	% Volumen de N <sub>2</sub> (líq) en LV-2 (Sala de Control)	
	(Nm <sup>3</sup> /d)	(Nm <sup>3</sup> /d)	(Nm <sup>3</sup> /d)	(Nm <sup>3</sup> /d)	(Nm <sup>3</sup> /d)	% Inicial	% Final
01/04/2009	2.267,03	32.632,91	44.565,16	0,00	12.353,50	82,75	77,89
02/04/2009	4.307,27	33.120,00	20.418,37	0,00	12.371,95	77,89	78,39
03/04/2009	4.607,01	33.027,00	0,00	0,00	12.379,20	78,39	82,85
04/04/2009	3.947,42	32.237,00	23.890,77	0,00	12.363,77	82,85	82,27
05/04/2009	4.263,98	31.291,00	0,00	0,00	12.353,48	82,27	86,57
06/04/2009	0,00	30.967,00	41.892,85	0,00	12.398,34	86,57	81,38
07/04/2009	1.890,83	29.758,00	27.523,19	0,00	12.424,65	81,38	79,58
08/04/2009	0,00	25.895,00	11.489,33	0,00	12.323,77	79,58	79,67
09/04/2009	0,00	23.858,00	11.689,35	0,00	12.374,36	79,67	79,57
10/04/2009	0,00	23.958,00	11.313,31	0,00	1.238,78	79,57	79,53
11/04/2009	0,00	25.716,00	0,00	0,00	12.357,88	79,53	82,07
12/04/2009	0,00	30.066,37	0,00	0,00	12.356,04	82,07	85,29
13/04/2009	0,00	32.820,40	23.010,67	0,00	12.381,10	85,29	84,66
14/04/2009	0,00	33.385,00	11.329,31	0,00	12.360,83	84,66	85,21
15/04/2009	0,00	33.001,00	22.258,58	0,00	12.404,90	85,21	84,46
16/04/2009	0,00	32.676,01	10.497,22	0,00	12.373,43	84,46	82,57
17/04/2009	0,00	33.029,00	37.076,30	0,00	12.344,29	82,57	78,76
18/04/2009	0,00	32.927,00	31.123,61	0,00	12.372,08	78,76	76,12
19/04/2009	0,00	33.559,00	0,00	0,00	12.389,25	76,12	79,84
20/04/2009	0,00	33.559,00	20.930,43	0,00	12.425,75	79,84	79,33
21/04/2009	0,00	33.512,00	22.018,55	0,00	12.400,56	79,33	78,60
22/04/2009	0,00	33.455,41	21.618,50	0,00	12.393,79	78,60	77,88
23/04/2009	0,00	33.559,00	21.170,45	0,00	12.381,98	77,88	77,43
24/04/2009	0,00	33.989,00	17.986,08	0,00	12.369,88	77,43	77,63
25/04/2009	0,00	34.009,00	14.641,70	0,00	12.388,52	77,63	78,37
26/04/2009	0,00	34.094,00	0,00	0,00	12.406,42	78,37	82,07
27/04/2009	0,00	33.955,00	29.875,46	0,00	12.386,51	82,07	79,61

Donde:

**Producción N<sub>2</sub>(líq) PSA-6:** Producción de Nitrógeno líquido de PSA-6

**Producción N<sub>2</sub>(líq) PSA-4:** Producción de Nitrógeno líquido de PSA-4

**Despacho de LV-2:** Entrega de Nitrógeno líquido vía cisternas a la empresa de PRAXAIR

**Venteo:** Volumen de nitrógeno de desahogo del tanque LV-2

**% Volumen de N<sub>2</sub>(líq) en LV-2:** Porcentaje de llenado del tanque medido en la sala de control

A partir de estos datos, se determina el porcentaje de aumento o disminución esperado del volumen ocupado por el nitrógeno líquido en el tanque LV-2 del cual se conoce la siguiente información:

### **3.2.1 Descripción del tanque de almacenamiento de nitrógeno líquido LV-2**

El tanque de almacenamiento de nitrógeno líquido es un tanque de doble pared con material aislante entre ambas. La pared interior, que contiene el nitrógeno líquido, es de material especial (acero 9% níquel) que mantiene sus propiedades a las temperaturas criogénicas. La pared exterior es de acero al carbón normal.

El espacio entre las paredes que contiene el material aislante se mantiene en un ambiente de nitrógeno seco y se realiza una purga constante de nitrógeno para evitar el ingreso de humedad con el aire ambiental que pueda reducir la eficiencia del aislamiento.

El tanque tiene su válvula de seguridad contra sobrepresión y vacío. El sistema de instrumentación del tanque incluye indicadores de nivel e indicadores de presión del vapor ubicados tanto al lado del tanque como en el panel de control en la sala de control de la planta.

**Tabla 3.4. Datos del tanque de almacenamiento de nitrógeno líquido LV-**

**2**

<b>DATOS DEL EQUIPO</b>	
Fabricante	Van-Dam/CBI de Venezuela
Tipo	Tanque criogénico tipo vertical con doble pared
Volumen de almacenamiento.	800 m <sup>3</sup>
Cantidad de nitrógeno líquido almacenado	650 TM
Cantidad de nitrógeno Disponible	520.000 Nm <sup>3</sup>
Espacio de vapor sobre el líquido	5 %
Razón de evaporación natural ("Boil off") con temperatura de ambiente de 30°C	0,4 %
<b>PARED INTERIOR</b>	
Diámetro	10.000 mm
Altura del parte recto	10.330 mm
Altura total	12.082 mm
Presión de diseño	1.000 mm C.A. manométrico 50 mm C.A. vacío
Temperatura de diseño	-196°C
<b>PARED EXTERIOR</b>	
Diámetro	12.200 mm
Altura del parte recto	11.780 mm
Altura total	13.904 mm
Presión de diseño	50 mm C.A. manométrico 50 mm C.A. vacío
Temperatura de diseño	Ambiente (45°C)
<b>AISLAMIENTO DEL TANQUE</b>	
Aislamiento del fondo	712 mm "Foamglass"
Aislamiento de parte vertical	1.100 mm Perlita
Aislamiento del tope del tanque	738 mm a 1.100 mm Perlita

Para los cálculos del porcentaje de aumento y disminución del volumen ocupado por el nitrógeno líquido en el tanque LV-2 se considera una razón de evaporación natural de 0,6277%, mayor al 0,4% original de diseño, esto

debido a estudios realizados posteriores al diseño que pudieron evidenciar que para todos los efectos el 100% de capacidad del tanque es 645,92 TM.

Con este valor se calculan los porcentajes de aumento del volumen de líquido en el tanque por las contribuciones de las plantas PSA-6 y PSA-4, realizando la conversión del caudal llevando el flujo de Nm<sup>3</sup>/d a porcentaje con el siguiente cálculo:

$$\left( \frac{\text{Flujo Nm}^3/\text{d}}{800\text{m}^3} \right) \times (100/645,92 \text{ TM}) = \% \text{ volumen N}_2(\text{líqu}) \text{ esperado}$$

(Ec. 3.1)

Luego, realizando un balance de masa se comparan los porcentajes de volumen de nitrógeno líquido esperado en el tanque con los valores reales obtenidos en campo y se obtiene por diferencia el flujo de nitrógeno perdido por día cuando éste sea el caso. Los resultados serán presentados en el Anexo 1.

### **3.3 Estudio de las condiciones que generan la vaporización del nitrógeno líquido en el sistema de transporte y almacenamiento de las plantas PSA-6 y PSA-4**

Para conocer las razones que originan la pérdida de nitrógeno evidenciada en el tanque de almacenamiento, se determinó el comportamiento del fluido dentro de la tubería que transporta el nitrógeno líquido desde la planta PSA-6 hasta el tanque de almacenamiento LV-2, utilizando para tal fin el simulador comercial de procesos Aspen Hysys en su versión 2006.5.

Se realizó un levantamiento en campo de la línea de transporte de nitrógeno y se establecieron las características operacionales y de construcción tales como presión, accesorios, longitudes, materiales y tipo de aislante, mediante observación directa e información suministrada por el personal que opera la planta.

Para obtener resultados confiables en el simulador, es necesaria la utilización del paquete termodinámico que mejor se ajuste a las características del sistema. Los paquetes de propiedades incorporados en HYSYS proveen predicciones precisas de propiedades termodinámicas, físicas y de transporte para hidrocarburo, no-hidrocarburo y fluidos químicos y producto petroquímicos. La base de datos consta de más de 1.500 componentes y más de 16.000 coeficientes binarios. Si un componente de la biblioteca no puede ser encontrado dentro de la base de datos, están disponibles métodos de estimación para crear completamente componentes hipotéticos definidos.

En el manual del simulador se encuentra una lista de sistemas típicos y correlaciones recomendadas. Cabe destacar que al existir dudas en cuanto a la exactitud o posibilidad de aplicación de uno de los paquetes de propiedades, se solicita al usuario contactar al fabricante del software para recibir material de validación adicional.

### **3.3.1 Selección del paquete termodinámico a utilizar en el simulador.**

El conocimiento del paquete termodinámico apropiado para simular este modelo es un punto fundamental de este estudio y por tal motivo se debe escoger el modelo matemático que describa con precisión las propiedades de las sustancias.

La base de las ecuaciones de estado es la ecuación de van der Waals (1873). Esta ecuación ha sufrido numerosas modificaciones a fin de mejorar sus predicciones de propiedades volumétricas y termodinámicas, así como su aproximación al equilibrio líquido-vapor. La ecuación mencionada y cualquiera de sus modificaciones son casos particulares de una ecuación cúbica genérica que puede escribirse como se muestra en la ecuación 3.1.

$$P = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v(v+d) + c(v-d)}$$

(Ec. 3.2)

Se sabe que  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $d$  son constantes o funciones de la temperatura y de algunas propiedades físicas de las sustancias como el factor acéntrico ( $\omega$ ), el factor de compresibilidad crítico ( $Z_c$ ) y la temperatura de ebullición normal ( $T_{EW}$ ), entre otros.

A través de los años se ha propuesto un elevado número de teorías y ecuaciones, como las basadas en modelos moleculares (de gran complejidad), las empíricas multiparámetros (ninguna de ellas es cúbica, tienen entre 15 y 60 parámetros y comenzaron a desarrollarse en la década de 1970) y las basadas en la energía libre de Helmholtz (útiles para mezclas de fluidos), aunque las ecuaciones cúbicas (como la ecuación 3.1) continúan empleándose en predicciones de equilibrios de fases y en simulaciones.



### 3.3.1.1 Ecuación de Peng y Robinson, (PR, 1976)

Peng y Robinson desarrollaron una ecuación de estado de dos parámetros. En esta correlación el término atractivo de presión de la ecuación semiempírica de Van der Waals fue modificado. Esto predice correctamente la presión de vapor de sustancias puras y el equilibrio de mezclas. Además de ofrecer la simplicidad en el cálculo, la ecuación de Peng Robinson es más aproximada en la predicción del coeficiente de fugacidad y otras propiedades termodinámicas. Por otro lado, de las ecuaciones de estado cúbicas, diversos autores han demostrado que la ecuación de Peng y Robinson es la más utilizada en los trabajos de simulación, en sistemas de hidrocarburos y han dado resultados aceptables, reproduciendo las propiedades termodinámicas y el comportamiento de las fases. La ecuación de Peng Robinson es la siguiente:

$$P = \frac{R \times T}{V - b} - \frac{a}{V(V - b) + b(V - b)}$$

(Ec. 3.3)

Y en función del factor de compresibilidad:

$$Z^3 - (1 - B)Z^2 + (A - B - B^2)Z - (A * B - B^2 - B^3) = 0$$

(Ec. 3.4)

Las constantes para una mezcla se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$b = \sum x_i \times b_i$$

(Ec. 3.5)

$$b_i = 0,077796 * \frac{R \times T_{Ci}}{P_{Ci}}$$

(Ec. 3.6)

$$a = \sum \sum x_i \times x_j \times (a_i \times a_j)^{0,5} \times (1 - k_{ij})$$

(Ec. 3.7)

$$a_i = a_{Ci} \times \alpha_i$$

(Ec. 3.8)

$$a_{Ci} = 0,457235 \times \frac{(R \times T_{Ci})^2}{P_{Ci}}$$

(Ec. 3.9)

$$\alpha_i^{0,5} = 1 + m_i (1 - T_{ri}^{0,5})$$

(Ec. 3.10)

$$m_i = 0,37646 + 1,54226w_i - 0,26992w_i^2$$

(Ec. 3.11)

$$A = \frac{a \times P}{(R \times T)^2}$$

(Ec. 3.12)

$$B = \frac{b \times P}{R \times T}$$

(Ec. 3.13)

Donde:

$V$  = Volumen del sistema ( $L$ ).

$P$  = Presión del sistema ( $atm$ ).

$T$  = Temperatura del sistema ( $K$ ).

$R$  = Constante universal de los gases  $\left( \frac{atm \times L}{K \times gmol} \right)$ .

$Z$  = Factor de compresibilidad.

$a, b$  = Constantes definidas para cada componente.

$x$  = Fracción molar de cada componente.

$\alpha_i$  = Propiedad característica de cada componente.

$T_{Ci}, P_{Ci}$  = Temperatura y presión crítica del componente  $i$ .

$T_{ri}$  = Temperatura reducida del componente  $i$  ( $K$ ).

$m_i$  = Masa del componente  $i$  ( $g$ ).

$w_i$  = Factor acéntrico para el componente  $i$ .

$k_i$  = Interacción binaria para los componentes  $i$  y  $j$ .

Las ecuaciones cúbicas de estado son ampliamente empleadas en áreas de investigación, simulación y optimización en las que se requiera el cálculo de propiedades termodinámicas o el equilibrio líquido-vapor, por lo tanto, y considerando la importancia de cuantificar correctamente tanto la fase líquida, como la fase gaseosa en este trabajo, se utilizará la ecuación de Peng Robinson con la modificación de SV para el estudio, en concordancia con la teoría y con las recomendaciones del fabricante del software presentadas en la siguiente tabla.

**Tabla 3.5. Paquetes termodinámicos recomendados por el fabricante del software para sistemas típicos**

Tipo de Sistema	Paquete de Propiedades Recomendado
Deshidratación con TEG	PR
Agua Amarga	PR, Sour PR
Procesamiento criogénico de gas	PR, PRSV
Separación de aire	PR, PRSV
Columnas de crudo atmosféricas	PR, PR Options, GS
Columnas al vacío	PR, PR Options, GS (<10 mm Hg), Braun K10, Esso K
Columnas de etileno	Lee Kesler Plocker
Sistemas con alto H <sub>2</sub>	PR, ZJ or GS (see T/P limits)
Sistemas de yacimientos	PR, PR Options
Sistemas de vapor	Steam Package, CS or GS
Inhibición de hidratos	PR
Sistemas químicos	Activity Models, PRSV
Alquilación de HF	PRSV, NRTL (Contactar a Hyprotech)
Deshidratación con TEG y aromáticos	PR (Contact Hyprotech)
Sistemas de hidrocarburos en donde la solubilidad de H <sub>2</sub> O es importante.	Kabadi Danner
Sistemas con gases seleccionados e hidrocarburos livianos	MBWR

### 3.3.2 Datos de entrada al simulador Hysys

Una vez determinado el paquete termodinámico se establecen los datos de entrada a la red de tuberías para su posterior montaje en el simulador, los cuales corresponden a informes de operación del sistema y valores de diseño de los equipos involucrados, los cuales se muestran en la tabla 3.6.

**Tabla 3.6. Datos de entrada para simular la tubería de la planta PSA-6 hasta el tanque de almacenamiento de nitrógeno líquido LV-2**

Condiciones	Normal	Mínimo	Promedio	Máximo
Flujo de N <sub>2</sub> líquido Nm <sup>3</sup> /d	33.6000,00	23.422,19	31.697,75	34.094,00
Presión de descarga de la planta a la tubería (Puig)	66,3			
Temperatura (°F)	-313			

La planta PSA-4 en condiciones normales solo produce nitrógeno gaseoso; pero cuando es requerido puede entregar al tanque LV-2 este producto líquido a las condiciones de presión de operación del tanque y a la temperatura del nitrógeno líquido igual a la de la planta PSA-6, la cual es -313°F. La planta PSA-4 se encuentra a una distancia aproximada de 5 metros del tanque de almacenamiento, por lo que se descarta la vaporización de nitrógeno en la tubería que entrega el producto al tanque; por lo tanto, para efectos de este estudio, se considera para la simulación únicamente su aporte de producto líquido al tanque.

**Tabla 3.7. Datos de entrada para simular la alimentación proveniente de la planta PSA-4 al tanque de almacenamiento de nitrógeno LV-2**

Condiciones	Normal	Mínimo	Promedio	Máximo
Flujo de N <sub>2</sub> líquido Nm <sup>3</sup> /d	0,00	0,00	1.639,59	15.759,94
Presión de descarga de la planta a la tubería (Puig)	1,42			
Temperatura (°F)	-313			

### 3.3.3 Datos para simular la tubería de transporte de nitrógeno líquido al tanque LV-2

Para la simulación de la tubería de nitrógeno líquido se tomaron las medidas obtenidas del levantamiento en campo. Los datos se encuentran en el perfil de elevación de la tubería que se muestra en el Anexo 2.

En los cálculos de transferencia de calor dentro de la tubería se debe considerar la vaporización en la misma, por lo tanto se utiliza el método de estimación del coeficiente convectivo de la transferencia de calor interna *Profes*, que es una correlación propia del simulador. También se consideró la transferencia de calor en la pared del tubo, al ambiente y la capa de aislante que recubre la tubería.

La capa de aislante es espuma de poliuretano, la cual tiene un espesor de 3,96 pulgadas, y posee una conductividad térmica de 0,0104 BTU/h.

Para identificar las condiciones que favorezcan la vaporización del nitrógeno en el sistema, se efectuó para cada alimentación un análisis de sensibilidad, en el cual se realizó una disminución del grosor de la capa de

aislante para los cuales se consideraron tres escenarios, al 100%, 70% y al 40%, que corresponden a valores de 0,33 ft, 0,23 ft y 0,13 ft, así como también se elevó gradualmente la temperatura de entrada a la línea, desde la temperatura de diseño (-313°F) hasta la temperatura de saturación de nitrógeno a la presión de diseño (-287,8°F @ 66,3 psig).

### **3.4 Propuesta de posibles soluciones que minimicen las pérdidas de nitrógeno en el sistema de transporte y almacenamiento de las plantas PSA-6 y PSA-4.**

Al ser determinadas las posibles causas de la evaporación del nitrógeno se elaboran las conclusiones y recomendaciones basadas en el estudio y en la experiencia en campo que permitan minimizar la pérdida de nitrógeno en el sistema de almacenamiento y transporte de la planta.

## **CAPITULO IV**

### **RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **4.1 Descripción del funcionamiento de las plantas PSA-6 y PSA-4**

Las plantas de separación de aire de SIDOR generan los gases industriales necesarios para la producción de acero. El oxígeno es insumo fundamental para las acerías, ya que ayuda a la combustión del carbono y a la desfosforación y en los procesos de reducción directa generando reacciones exotérmicas mejorando la productividad.

El nitrógeno es utilizado para crear atmósferas inertes siendo sus principales consumidores las plantas de reducción directa, los recocidos y las acerías.

El argón es usado en las acerías para agitar y homogeneizar térmica y químicamente el baño de acero líquido. También ayuda a flotación de inclusiones y a la desulfurización.

En la tabla 4.1 se muestran las plantas separadoras de aire presentes en la empresa.



**Tabla 4.1. Plantas de separación de aire**

Planta	Tecnología	Capacidad (Ton/día)	Productos Generados
PSA3	BOC AMERICANA	257	Oxígeno gas Nitrógeno Gas Nitrógeno Líquido
PSA4	LINDE ALEMANA	617	Oxígeno gas Nitrógeno Gas Nitrógeno Líquido Oxígeno Líquido Argón Líquido
PSA5	WHITE MARTINS PRAXAIR	300	Oxígeno gas
PSA6	WHITE MARTINS PRAXAIR	350	Oxígeno gas Nitrógeno Gas Nitrógeno Líquido Oxígeno Líquido Argón Líquido

**4.1.1 Descripción general del proceso PSA6 (PL4-XL):**

La PSA6, consiste en un conjunto de equipos integrados, todos montados sobre un *Skid*.

Básicamente, el proceso toma aire de la atmósfera, lo purifica previamente a través de un proceso de adsorción por presión (PSA) para ser comprimido, luego pasa a un equipo llamado *Brim Machine*, en el cual se eleva la presión del aire hasta un máximo de 40bar, posteriormente pasa al proceso criogénico de expansión de la corriente en una turbina especialmente diseñada para este objetivo ubicada dentro de la caja fría (Cold Box). La caja fría está compuesta por dos columnas la inferior de alta presión y la superior de baja presión, la columna de argón y por un intercambiador PHX. En la columna superior e inferior se realiza el fraccionamiento y destilación del aire a temperaturas criogénicas, obteniéndose oxígeno y nitrógeno líquido. Parte de estos productos son enviados al intercambiador principal PHX para ser evaporados. El oxígeno gaseoso va directo al gasoducto SIDOR a una presión de 17 bar, el nitrógeno gas se obtiene a baja presión y se envía hacia el compresor de nitrógeno (BLNC) donde se eleva hasta una presión de 5 bar para ser entregado hacia el sistema de distribución de gases de SIDOR. El resto es entregado como líquido y es almacenado en tanques criogénicos (LV1, LV2) donde posteriormente se despacha por camiones cisternas. Por otra parte, el argón es obtenido de una corriente de oxígeno rico en argón en donde aprovechando la diferencia en los puntos de ebullición y mediante destilación fraccionada se obtiene argón de pureza requerida por el cliente.

Los productos generados en las plantas de separación de aire, son de alta pureza, cuyas especificaciones son requeridas por los clientes internos de la empresa, las cuales son: Oxígeno gas y líquido: 99,9 % vol; Nitrógeno gas y líquido: < 2 ppm O<sub>2</sub>, Argón Líquido: < 2 ppm O<sub>2</sub> y < 3 ppm N<sub>2</sub>.

El diagrama de proceso mostrado en la figura 4.1 muestra de manera gráfica el sistema descrito anteriormente.

Las maniobras operativas de la planta consisten en:

- a) Monitoreo constante de la succión y descarga del compresor de aire de proceso (BLAC) y de sus equipos conexos para su funcionamiento, bomba auxiliar y principal de aceite y diferencial de presión en la caja de filtros de succión.
  
- b) Una vez que el aire es comprimido ingresa al sistema de prepurificación (PP) el cual consiste en 12 ciclos de regeneración; allí se varia el tiempo de duración de cada ciclo que depende de la concentración de CO<sub>2</sub> presente, en este punto hay que asegurarse que el aire que ingrese al PHX este libre de CO<sub>2</sub>.

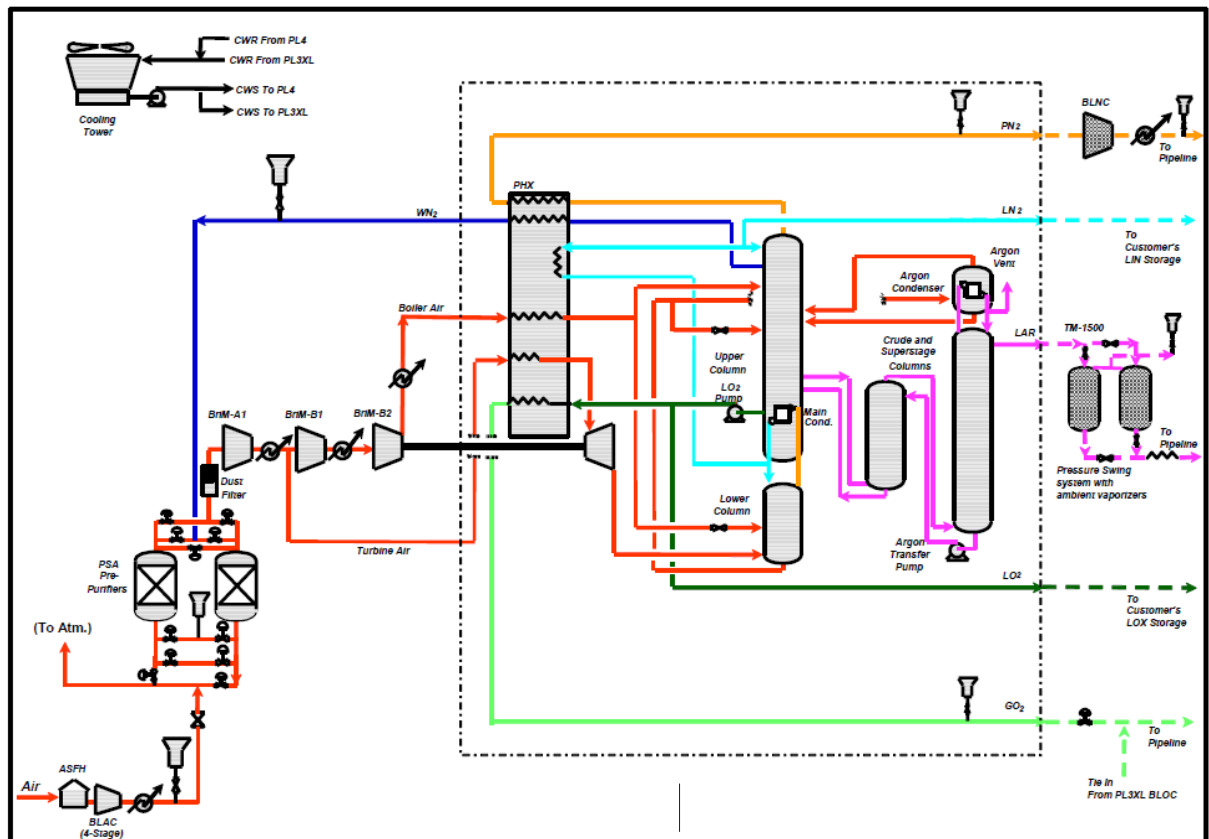
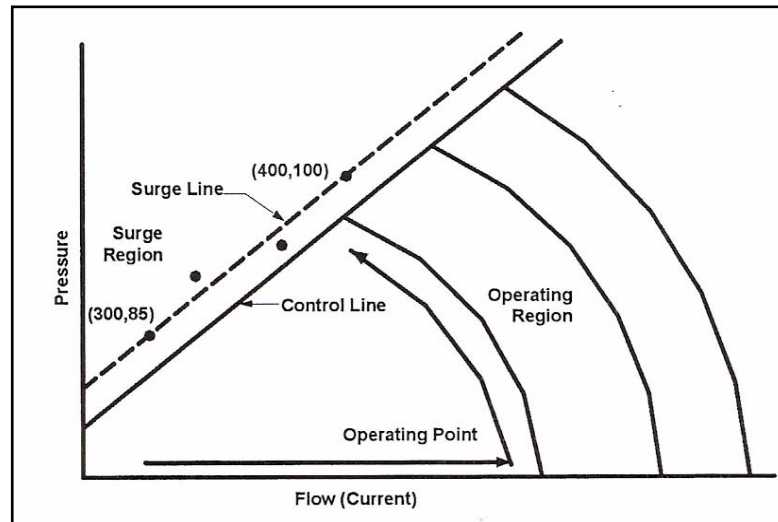


Figura 4.1. Diagrama de flujo de proceso de la planta PSA-6

- c) Se debe prestar especial atención a la recirculación y diferenciales de presión a fin de mantener la línea de control y no exceder los límites (*surge Line*) en el *Brim Machine*, ya que estos parámetros son críticos y podrían causar descompensación en el proceso, con la inevitable parada de planta.



**Figura 4.2. Gráfica de Surge Line en el Brim Machine de la planta PSA-6**

- d) En la caja fría (Cold Box) se monitorea los niveles de líquido, la presión de trabajo (un aumento brusco de esta presión causan disparo de las válvulas de seguridad, ruptura de disco y parada de planta), además de controlar la pureza de los productos oxígeno y nitrógeno entregados al gasoducto SIDOR o enviados a los tanques de almacenamiento. De igual forma se debe monitorear la concentración de hidrocarburos ya que es causante de parada de planta.
- e) Monitoreo permanente de los diferenciales de presión y temperaturas de los enfriadores de cada etapa del compresor *BLNC*, ya que un aumento en estos parámetros causan parada de este equipo.
- f) Se garantiza la recirculación de los líquidos dentro de la columna así como en el intercambiador principal PHX a través de la bomba

de oxígeno, por lo tanto se monitorea su funcionamiento ya que una puesta fuera de servicio causa parada de planta.

- g) En la columna de argón, se monitorea de forma constante la zona de argón (también conocida nube de argón), allí se debe controlar la concentración de oxígeno y nitrógeno en el argón, el nivel de la columna, las temperaturas, así como la pureza del producto final argón, el cual es enviado a dos tanques de almacenamiento los cuales operan de forma intermitente para la distribución de argón gas, aquí se debe monitorear el flujo de carga y descarga al tanque el cual envía al gasoducto SIDOR. Una descompensación en el nivel de los tanques de argón causan perturbación en la columna de argón y en todo el proceso.
- h) En el almacenamiento de oxígeno y nitrógeno líquido en los tanques LV-1, LV-2 respectivamente, se debe monitorear la presión interna del tanque y la no apertura de las válvulas de drenaje.
- i) Para el llenado de cisternas de oxígeno y nitrógeno líquido desde el llenadero, el personal autorizado para esta labor debe cumplir con las siguientes actividades, tomando en cuenta que se despachas entre 3 a 5 cisternas por día:
- Elaborar permiso de trabajo y análisis de riesgo
  - Estar atento al estacionado del camión cisterna en la estación de llenado.
  - Análisis de pureza del camión cisterna vacío

- Puesta en servicio de la bomba de oxígeno o nitrógeno líquido según corresponda.
- Enfriamiento de la bomba.
- Inyección de líquido al cisterna
- Monitoreo constante de la presión del tanque de almacenamiento, de la presión de la bomba y de la presión interna del cisterna.
- Una vez finalizado el llenado del cisterna debe realizar análisis del producto a despachar.
- Cierre del permiso de trabajo y validación de certificación de entrega de producto.

Normalmente la planta PSA-6 opera de manera continua, mientras que la planta PSA-4, la cual funciona de manera similar, opera como respaldo bajo escenarios de fallas, paradas programadas o repentinas de alguna de las otras plantas del complejo, incluyendo PSA-6.

#### **4.2 Cálculo de las pérdidas de nitrógeno en el tanque de almacenamiento LV-2.**

El tanque de nitrógeno líquido LV-2 está concebido por diseño para el almacenamiento de líquido criogénico hasta  $-196^{\circ}\text{C}$  ( $-320,8^{\circ}\text{F}$ ) a la presión de 1.000 mm de columna de agua, lo que equivale a 1,42 psig. Con una capacidad total de almacenamiento de 650ton, que luego de estudios realizados se comprobó que la capacidad de almacenamiento real es 645,92 ton. Actualmente sus entradas son la producción de nitrógeno líquido de las plantas PSA-4 y PSA-6 y las salidas el despacho de producto en cisternas a PRAXAIR, el venteo del tanque y la gasificación o evaporación de producto

en caso de paradas programadas o imprevistas de alguna de las plantas de Sidor. Cabe destacar que el sistema sólo permite realizar una maniobra de descarga del tanque a la vez y no así en forma paralela.

Se realizó un balance de masa al sistema de almacenamiento tanque LV-2 en donde se definieron como:

Entradas: Producción de PSA-4 y Producción de PSA-6

Salidas: Producto Despachado, Venteo y Gasificación de producto.

Volumen de líquido esperado: Volumen de líquido del tanque LV-2 por balance

Aplicando el balance másico para cada mes se obtienen los siguientes resultados:

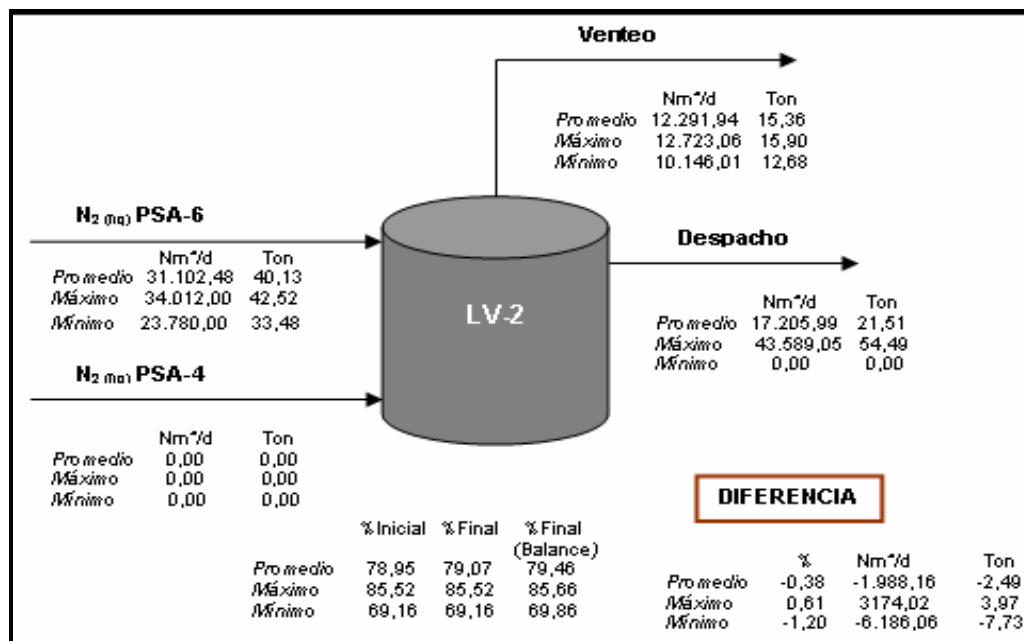


Figura 4.2. Pérdidas de nitrógeno en el tanque de almacenamiento LV-2 para el mes de febrero de 2009.



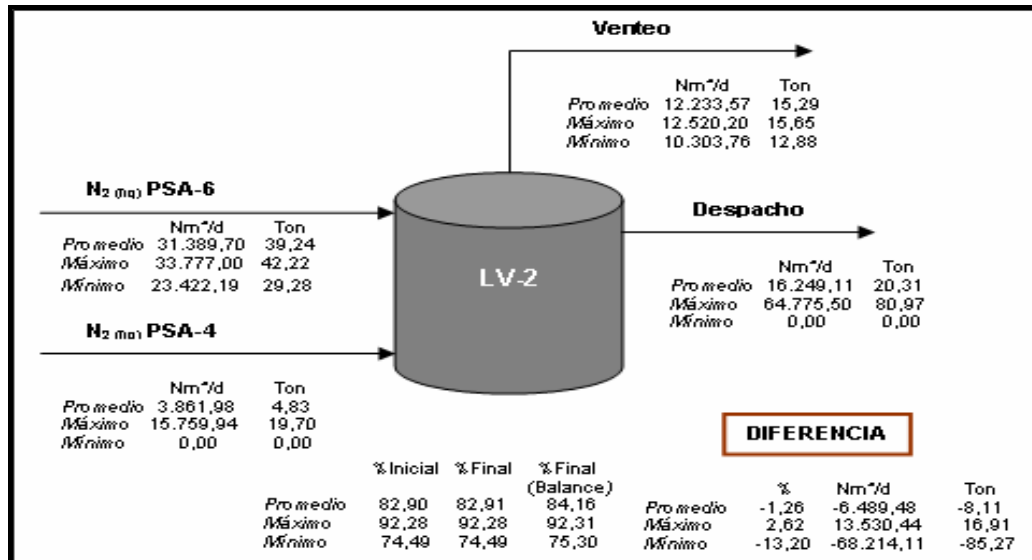


Figura 4.3. Pérdidas de nitrógeno en el tanque de almacenamiento LV-2 para el mes de marzo de 2009.

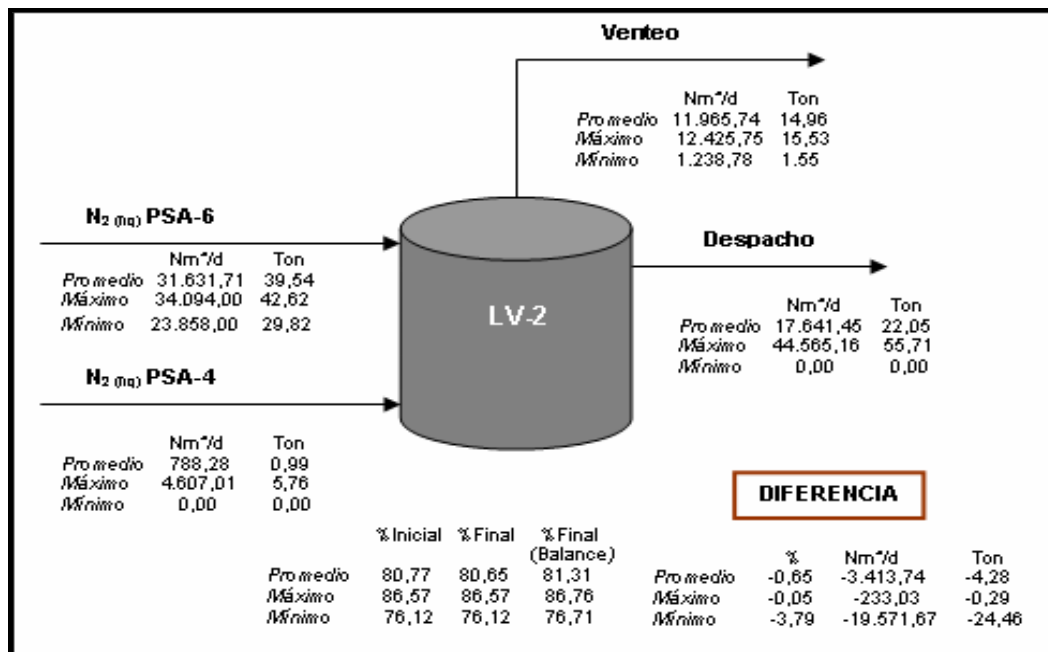


Figura 4.4. Pérdidas de nitrógeno en el tanque de almacenamiento LV-2 para el mes de abril de 2009.

En las figuras 4.2, 4.3 y 4.4, puede observarse que en promedio se despachan 21 toneladas de nitrógeno líquido por día, con lo que se incumple con el convenio que se tiene con PRAXAIR de entregarle 42 ton/día (1.400,00 Nm<sup>3</sup>/d) de nitrógeno líquido.

Se puede observar que en los meses de marzo y abril se reporta una diferencia máxima positiva en cuanto a los balances. Esto se debe a problemas operacionales en los cuales se detuvo ya sea PSA-6 y/o PSA-4 por espacios reducidos de tiempo. Durante estas paradas el medidor de nivel de sala de control deja de funcionar, lo que genera que al iniciar nuevamente la operación normal el tanque tenga más volumen que el que se esperaría por balance de masa.

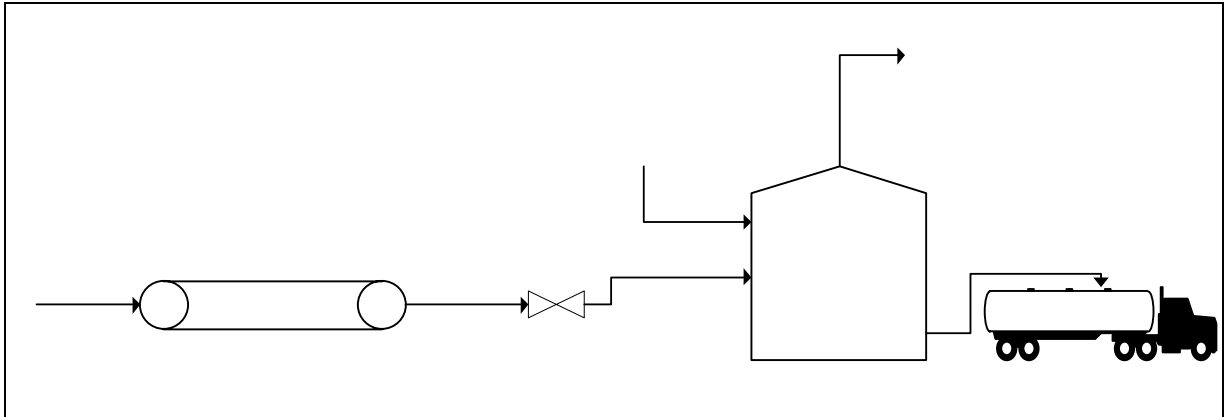
Vale la pena destacar que el tanque nunca disminuye su nivel a menos del 69,16%, llegando en ocasiones a estar al 92,28% de su capacidad total.

Finalmente puede observarse en el anexo 1, que durante este periodo de 3 meses se determinó que se produjeron pérdidas equivalentes a un volumen acumulado al final del ejercicio de **349.013,28 Nm<sup>3</sup>** adicionales a los **1.046.489,94 Nm<sup>3</sup>** que se pierden en el venteo del tanque y de los **7.890,00 Nm<sup>3</sup>** gasificados por la planta.

#### **4.3 Estudio de las condiciones que generan la vaporización del nitrógeno líquido en el sistema de transporte y almacenamiento de las plantas PSA-6 y PSA-4**

El esquema de simulación para el estudio comprende la producción de nitrógeno líquido de la planta PSA-6 a través de la tubería PIPE-100 hasta el

tanque LV-2, donde también se incorpora la producción de nitrógeno líquido de la planta PSA-4 como se muestra en la figura siguiente.



**Figura 4.5. PFD del sistema a ser simulado.**

Se incluye en el esquema una válvula a la entrada del tanque para garantizar que independientemente de las pérdidas de presión que se produzcan en la tubería proveniente de PSA-6, el nitrógeno líquido ingrese a la presión de operación del tanque, la cual está fijada por diseño en 1,42 psig.

Se realizaron diferentes corridas, utilizando los valores de producción y su equivalente de nivel de tanque promedio, máximo y mínimo de PSA-6 y PSA-4 correspondientes al acumulado de tres meses, obteniendo los siguientes resultados:

**N2 PSA6**

Descarga tub

**PIPE-100**

**Tabla 4.2. Balance en el tanque LV-2 obtenido por simulación.**

Nombre		Fracción Vapor	Temperatura (°F)	Presión (psig)	Flujo Molar (Mm <sup>3</sup> /d)
Descarga tub	Promedio	0,00	-309,05	25,94	31.697,75
	Máximo	0,00	-309,35	18,48	34.094,00
	Mínimo	0,00	-307,54	47,47	23.422,19
Despacho	Promedio	0,00	-318,87	1,42	29.930,41
	Máximo	0,00	-318,87	1,42	32.006,68
	Mínimo	0,00	-318,87	1,42	21.928,66
N <sub>2</sub> PSA-4	Promedio	1,00	-312,80	1,42	1.639,59
	Máximo	1,00	-312,80	1,42	15.759,00
	Mínimo	1,00	-312,80	1,42	0,00
N <sub>2</sub> PSA-6	Promedio	0,00	-313,80	66,30	31.697,75
	Máximo	0,00	-313,80	66,30	34.094,00
	Mínimo	0,00	-313,80	66,30	23.422,19
N <sub>2</sub> PSA-6 a LV-2	Promedio	0,05	-318,87	1,42	31.697,75
	Máximo	0,05	-318,87	1,42	34.094,00
	Mínimo	0,06	-318,87	1,42	23.422,19
Venteo LV-2	Promedio	1,00	-318,87	1,42	3.406,93
	Máximo	1,00	-318,87	1,42	17.846,32
	Mínimo	1,00	-318,87	1,42	1.493,53

Se evidencia que bajo cualquier condición de flujo ocurre evaporación en el tanque, en donde se observa que la mayor caída de presión se obtiene con el flujo máximo de PSA-6 (34.094,00 Nm<sup>3</sup>/d) disminuyendo de 66,3 psig a 18,48 psig, valor que está por encima de la presión de operación del tanque (1,42 psig). Cuando este flujo disminuye a la presión de 1,42 psig gracias al control de presión de la válvula de entrada al tanque, ocurre una vaporización máxima de 6% correspondiente al flujo mínimo de PSA-6 (23.422,19 Nm<sup>3</sup>/d).

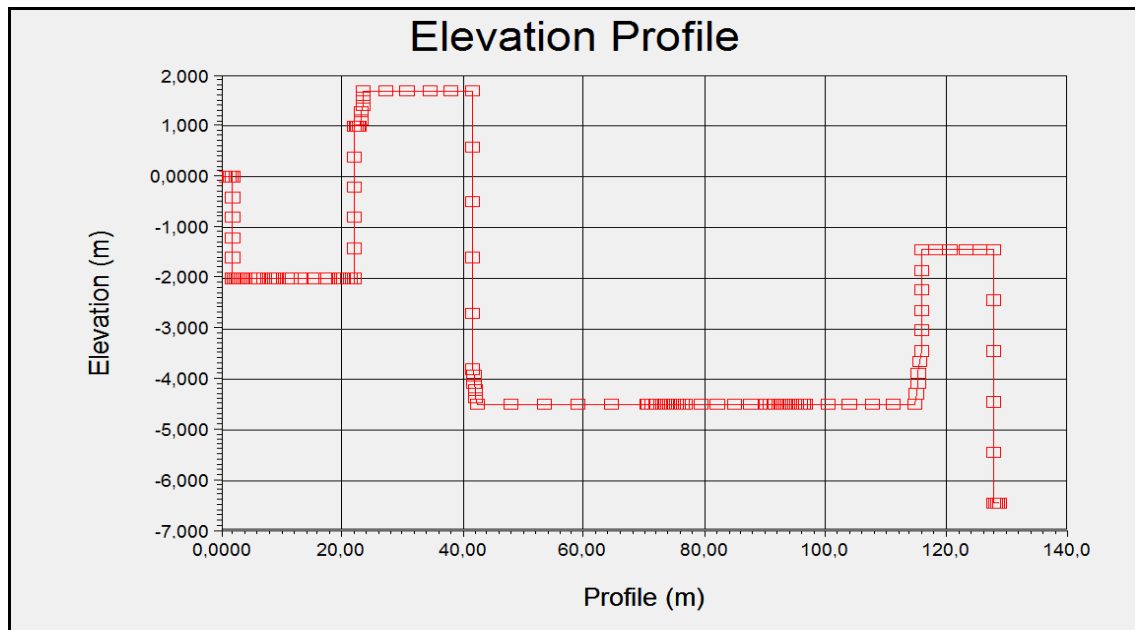
Este fenómeno de vaporización, a la salida de la válvula de estrangulamiento se explica por el efecto Joule Thomson, ya que al estrangular el fluido la caída de presión es negativa, y si el coeficiente de

Joule Thomson para el nitrógeno a la temperatura de salida de la planta (313,8 °F) es positivo, esto implica un incremento de la temperatura y por lo tanto de la entalpía, ocurriendo así esta vaporización. Se incluye la tabla de datos de Joule Thomson para el nitrógeno en el Anexo 4.

$$dH = c_p dT + (-c_p \mu_j dP) \quad (\text{Ec. 4.1})$$

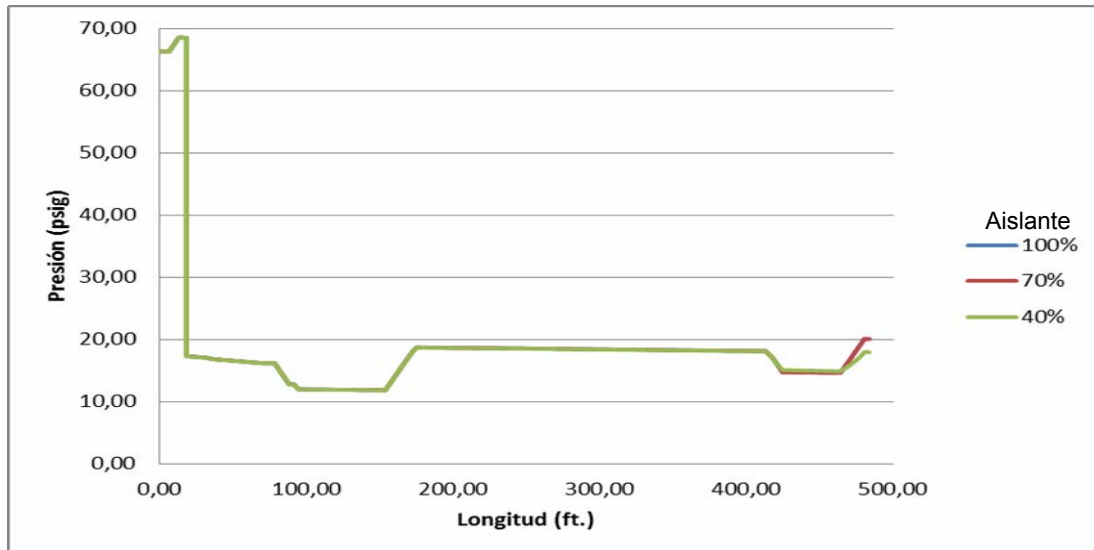
Si se suman las pérdidas promedio más el venteo del tanque de los valores obtenidos en el capítulo 4.2, se obtiene un valor de 16.226,78 Nm<sup>3</sup>/d, que se asemeja al valor de venteo obtenido por simulación para un flujo de PSA-4 y PSA-6 Máximos (17.846,32 Nm<sup>3</sup>), por lo que los altos flujos de nitrógeno líquido, aunados a la baja presión del tanque LV-2 y la falta de control de temperatura a las salidas de las plantas PSA-4 y PSA-6 contribuyen en la evaporación del líquido del tanque, quedando descartada la formación de vapor dentro de la tubería. Se incluye, para mayor información, los reportes de simulación de los diferentes escenarios en el Anexo 3.

Se realizó la simulación considerando una disminución de la capa de aislante de la tubería para un grosor de aislante de 70% y de 40% del valor de diseño, para una producción normal recomendada por PRAXAIR en el documento Informe Técnico de PSA-6 de Agosto de 2008, el cual corresponde a un caudal de 33.600,00 Nm<sup>3</sup>/d (1.400,00 Nm<sup>3</sup>/d, 42 ton) y únicamente se observa vaporización correspondiente al 0,51% al final de la tubería para una disminución del 40% lo cual no brinda por sí sola el total de las pérdidas registradas en la planta. Los resultados se muestran en las gráficas 4.7, 4.8 y 4.9.

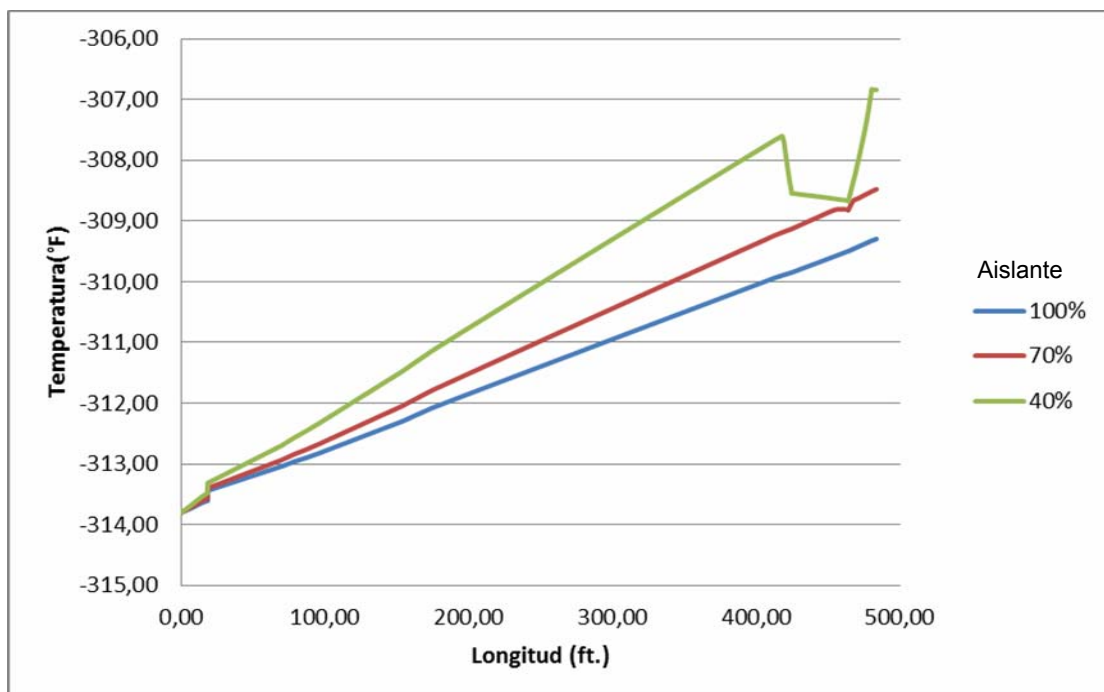


**Figura 4.6. Perfil de elevación de la tubería**

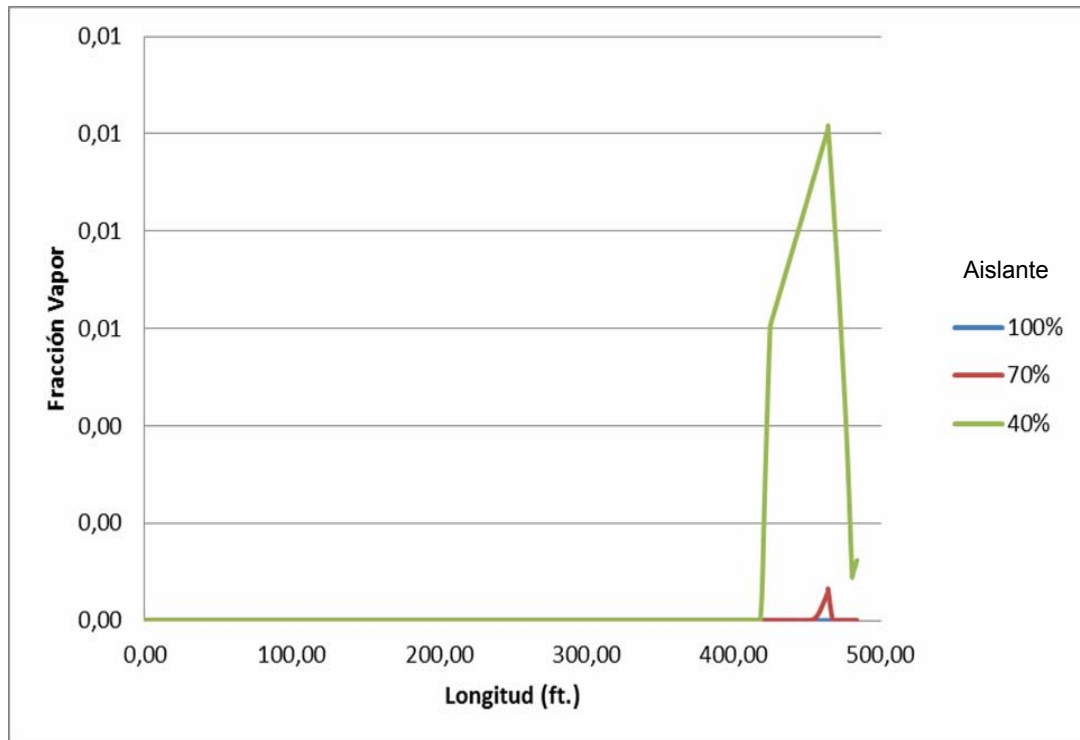
Como se puede observar en el perfil de elevación que la tubería experimenta un descenso en su recorrido, por lo que los dispositivos internos deberían disminuir suficientemente la presión para el almacenamiento a baja presión del nitrógeno líquido.



**Figura 4.7. Perfil de presión en la tubería en condiciones normales a diferentes estados de aislante.**



**Figura 4.8. Perfil de temperatura en la tubería en condiciones normales a diferentes estados de aislante.**



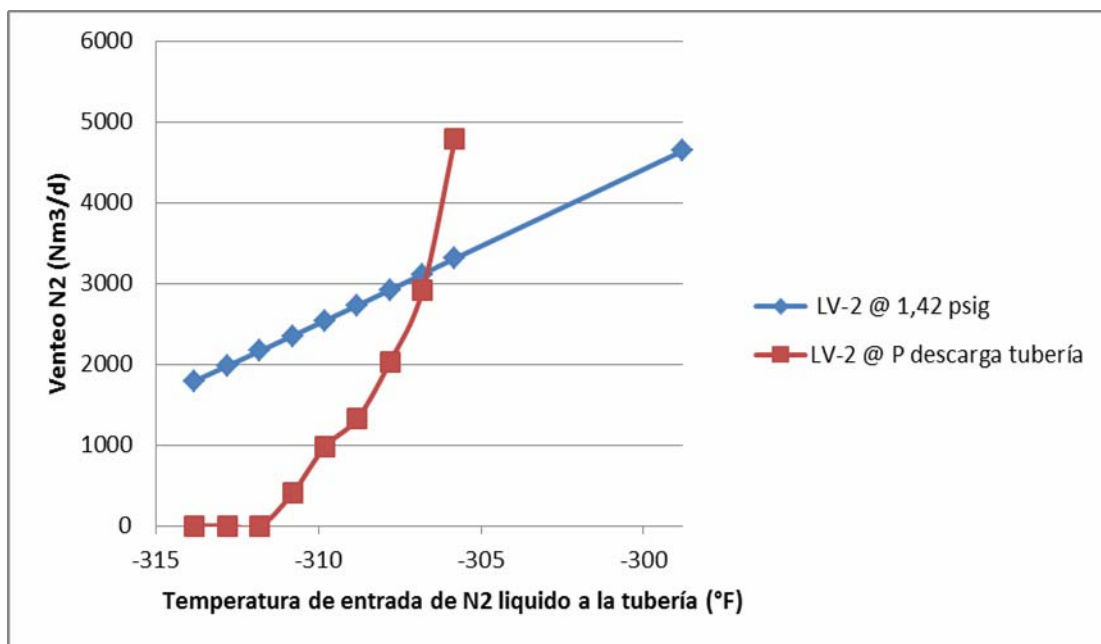
**Figura 4.9. Fracción de vapor en la tubería en condiciones normales a diferentes estados de aislante.**

Se puede observar que la caída de presión que se obtiene en la línea es principalmente ocasionada por la placa de orificio (dispositivo 8) de la línea de transporte de nitrógeno líquido, la cual es de 8,30 mm de diámetro, valor que es menor que el recomendado por White (1998) de 12,5 mm, sin embargo la presión alcanzada al final de la línea se encuentran sobre los 15 psig, valor que difiere del obtenido en campo que corresponden a 1,42 psig.

De igual manera se realizó un estudio de caso en donde, a condiciones normales de flujo de nitrógeno líquido, se varía la temperatura de entrada desde el valor de diseño (-313 °F) hasta la temperatura de burbuja a 66,30 psig (-287,80 °F), y se observa un aumento considerable del venteo con variaciones pequeñas de temperatura, como se observa en la figura 4.10.



Cabe destacar que para variaciones de 1 °F, la variación del flujo de venteo es en promedio 189,38 Nm<sup>3</sup>/día para el caso en el cual el tanque opera a su presión de diseño (1,42 psig). En cambio, si el estudio se hace considerando la presión a la descarga de la tubería (en el orden de los 20 psig) es posible observar que para los valores de diseño, el venteo se elimina, pero al calentar el nitrógeno 5 °F comienza a observarse vaporización en el tanque, igualándose los valores de vaporización en el tanque en temperaturas correspondientes a 306 °F aproximadamente, en donde el venteo está por el orden de los 3.000 Nm<sup>3</sup>/día, confirmando que una pequeña diferencia en el control de la temperatura a la entrada del sistema puede producir pérdidas considerables de nitrógeno en el tanque LV-2.



**Figura 4.10. Estudio de caso para la variación de la temperatura de entrada de nitrógeno líquido a la línea de transporte al tanque LV-2**

#### **4.4 Propuesta de posibles soluciones que minimicen las pérdidas de nitrógeno en el sistema de transporte y almacenamiento de las plantas PSA-6 y PSA-4.**

Se realizó la simulación del sistema aumentando la presión del tanque LV-2 a la presión de descarga de la tubería de PSA-6, con lo cual no se produce venteo en el tanque LV-2 para el caso de flujo normal.

El estudio económico del reemplazo del tanque LV-2 por uno diseñado para soportar una presión de 20 psig, aunado a la instalación de medidores de temperatura a la descarga de nitrógeno líquido de las plantas de aire, la revisión de los respectivos medidores de presión existentes y la realización de estrangulaciones parciales a lo largo de la tubería, así como también un análisis de capacidad estructural de la línea de transporte de nitrógeno líquido de la planta PSA-6 al tanque LV-2 sería la alternativa para eliminar las pérdidas de nitrógeno y cumplir con los acuerdos del contrato de SIDOR con PRAXAIR.

#### **4.5 Conclusiones**

- Las Plantas PSA-6 y PSA-4 funcionan de manera similar y generan los mismos productos, sin embargo difieren en la modalidad de operación y en la capacidad de producción.
- La mayor caída de presión a la salida de la tubería (descarga tub), se obtuvo con el flujo máximo de PSA-6 (34.094,00 Nm<sup>3</sup>/d) disminuyendo de 66,3 psig a 18,48 psig.

- Las pérdidas de nitrógeno en el tanque LV-2 equivalen en promedio a 16.226,78 Nm<sup>3</sup>/d (20,28 ton), cantidad que siendo recuperada, se utilizaría para completar la cuota de producción faltante a la empresa PRAXAIR.
- No se evidencia, para los escenarios planteados, evaporación de nitrógeno en la línea de transporte de PSA-6, sin embargo la baja presión del tanque LV-2 sí favorece la vaporización del nitrógeno líquido.
- Al generar pequeñas diferencias de temperatura a la entrada del sistema, se producen perdidas considerables de nitrógeno líquido.
- Si se mantiene una presión de 20 psig en el tanque de almacenamiento de nitrógeno, a las temperaturas de proceso se elimina la vaporización.

#### **4.6 Recomendaciones**

- El sistema estudiado es sensible a pequeños cambios de temperatura, por lo que es necesaria la instalación de un termómetro a la salida de nitrógeno líquido de las plantas PSA-6 y PSA-4.
- Revisar y ajustar los dispositivos de medición de flujo, tanto de las plantas PSA-6 y PSA-4, como de las salidas del tanque.
- Realizar un levantamiento de la tubería que transporta nitrógeno líquido desde PSA-6 hasta el tanque LV-2, para verificar los accesorios presentes en la misma.

- Se deben monitorear de manera eficiente los procesos de llenado de los cisternas, ya que cuando la carga de los camiones es mayor, es cuando se produce la mayor cantidad de pérdidas según los registros efectuados.
- Realizar estrangulamientos parciales de la presión a lo largo de la tubería, a fin de evitar incremento en la temperatura y por lo tanto la evaporación.

## BIBLIOGRAFÍA

Air Liquide, “**Enciclopedia de Gases**”. (2009), disponible en: <http://www.encyclopedia.airliquide.com/encyclopedia.asp?languageid=9>

Cao, E. “**Transferencia de Calor en Ingeniería de Procesos**”. Primera Edición. Argentina, (2004).

Cengel Y. y Boles M., “**Termodinámica**”. Segunda Edición, McGraw-Hill. México, (1995).

Delvalle, K., “**Análisis de las Opciones de Almacenamiento y Transporte de los Líquidos del Gas Natural**”. Tesis de grado, Departamento de Tecnología del Gas, IUTA Anzoátegui, Puerto la Cruz (2004).

Gases Industriales del Este C.A. “**Productos**”. (2010), disponible en: <http://www.gasesindustriales.com.ve/>

Geankoplis, C. “**Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias**”, Tercera Edición, Continental S.A. México, (1998).

AGA, “**Hoja de Seguridad del Material (MSDS): Nitrógeno Líquido**”, Marca: Lince Gas, AGA. (2005). Disponible en: <http://www.aga.com.co>

Holman, J. “**Transferencia de Calor**”. Octava Edición, McGraw-Hill. España, (1998).

Incropera, F. y De Witt, D. “**Fundamentos de Transferencia d Calor**”. Cuarta Edición, Prentice Hall Hispanoamericana S.A. México, (1999).

Jiménez, A. y Salazar T., “**Descripción de las Opciones de Almacenamiento para Gas Natural a Nivel de Superficie**”. Tesis de grado, Departamento de Ingeniería en Petróleo, UDO Anzoátegui, Puerto la Cruz (2004).

Kirk, O., “**Enciclopedia Temática de Química**”. Tomo 2. Editorial Limusa. Grupo Noriega Editores, México (1999).

AspenTech. Manual de HYSYS, Tutoriales y Aplicaciones. 2006.

Linde, “**Manual de Operaciones de la Planta Separadora de Aire PSA IV**”, Firma: Linde. (1978).

Marcano, N., “**Estudio de la Aplicación de un Nuevo Método de Análisis Térmico de Intercambiadores de Tubos y Coraza, mediante el uso de Simuladores Comerciales**”. Tesis de grado. Universidad de Oriente, Coordinación del Postgrado de Ingeniería Química (2010).

Migoya J., “**Proceso de Separación de los Gases del Aire por Destilación**”. Air Liquide, (2003).

Mosquera, B., “**Diseño de Tanque Criogénico para Almacenamiento de Nitrógeno Líquido con Capacidad de 12 Metros Cúbicos**”. Tesis de grado, Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción, ESPOG Guayaquil, Ecuador (2004). Disponible en: <http://cib.espol.edu.ec>

Nitrox C.A., “**Hoja de de Seguridad del Material**”. (2007), disponible en: <http://www.gruonotrox.com.ve/seguridad/>

Oxicar, C.A. “**Productos Oxicar**”. (2008), disponible en: <http://www.oxicar.net>

Perry, R. “Manual del Ingeniero Químico”. Sexta Edición, McGraw-Hill. España, (1998).

Rodríguez M. y Sanhueza, C., “**Análisis de las Causas que Producen Pérdidas de los Líquidos del Gas Natural en el Poliducto Santa Bárbara – Jose**”. Tesis de grado, Departamento de Tecnología del Gas, IUTA Anzoátegui, Puerto la Cruz (2004).

Sidor C.A., “**Catalogo de productos SIDOR**”. Versión 2.0, (2005).

Sidor C.A. “**Plantas de Fraccionamiento de Aire Sidor**” Departamento de Fluidos industriales, Sector gases, (2008).

Vargas, M. y Hernández, J., “**Análisis del Sistema de Manejo y Transporte de Productos Refrigerados Provenientes de los Hidrocarburos en el Complejo Criogénico de Oriente (CCO)**”. Tesis de grado, Departamento de Tecnología del Gas, IUTA Anzoátegui, Puerto la Cruz (2004).

White, F. “**Fluid Mechanics**”. Cuarta Edición, McGraw-Hill. Boston, (1998).

## METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO

<b>TÍTULO</b>	ANÁLISIS DE LAS PÉRDIDAS DE NITRÓGENO LÍQUIDO EN EL SISTEMA DE TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO DEL DEPARTAMENTO DE FLUIDOS INDUSTRIALES DE UNA PLANTA SIDERÚRGICA
<b>SUBTÍTULO</b>	

### AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CULAC / E MAIL
Zora Angelica Cermeño Navarro	<b>CVLAC:</b> 16.665.830 <b>E MAIL:</b> zorangelica83@hotmail.com
	<b>CVLAC:</b> <b>E MAIL:</b>
	<b>CVLAC:</b> <b>E MAIL:</b>

### PALABRAS O FRASES CLAVES:

NITROGENO

AIRE

PERDIDAS

ARGON

PRESION

TANQUE

## METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ÁREA	SUBÁREA
INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS	DEPARTAMENTO DE QUÍMICA.

### RESUMEN (ABSTRACT):

En el siguiente trabajo se analizaron las causas que producen las pérdidas de nitrógeno líquido en el sistema de transporte y almacenamiento de las plantas PSA-6 y PSA-4, del departamento de Fluidos Industriales de la Siderúrgica del Orinoco (SIDOR). En primer lugar se describió el funcionamiento de las plantas separadoras de aire PSA-6 y PSA-4 y los productos obtenidos en el proceso, seguidamente se procedió a determinar las pérdidas de nitrógeno líquido en el tanque de almacenamiento LV-2 mediante el seguimiento del nivel del tanque en la sala de control de la empresa, durante un período de tres meses de funcionamiento continuo de la planta, en los que se establecieron tres escenarios de producción: mínimo, promedio y máximo, en donde las plantas producen en conjunto de 23.422,19; 33.337,34 y 49.853,94 Nm<sup>3</sup>/día respectivamente, permitiendo comprobar pérdidas de nitrógeno equivalentes a -68.214,11 Nm<sup>3</sup>/día para el caso mínimo, -4.058,29 Nm<sup>3</sup>/día para el caso promedio y un incremento de 13.530,44 Nm<sup>3</sup>/día para el caso máximo, que se explica por fallas en el sistema de control de nivel del tanque en caso de mal funcionamiento de la planta.



**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y  
ASCENSO:**

**CONTRIBUIDORES:**

<b>APELLIDOS Y NOMBRES</b>	<b>ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL</b>				
Osvaldo Ochoa	<b>ROL</b>	<b>CA</b>	<b>AS X</b>	<b>TU</b>	<b>JU</b>
	<b>CVLAC:</b>	3.995.379			
	<b>E_MAIL</b>	ochoa.osvaldo@gmail.com			
	<b>E_MAIL</b>				
Fidelina Moncada	<b>ROL</b>	<b>CA</b>	<b>AS</b>	<b>TU</b>	<b>JU X</b>
	<b>CVLAC:</b>	13.366.691			
	<b>E_MAIL</b>	fidelina@cantv.net			
	<b>E_MAIL</b>				
Hector Silva	<b>ROL</b>	<b>CA</b>	<b>AS</b>	<b>TU</b>	<b>JU X</b>
	<b>CVLAC:</b>	3.955.570			
	<b>E_MAIL</b>	hectorlsu@yahoo.es			
	<b>E_MAIL</b>				

**FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:**

<b>2010</b>	<b>11</b>	<b>11</b>
<b>AÑO</b>	<b>MES</b>	<b>DÍA</b>

**LENGUAJE. SPA**

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y  
ASCENSO:**

**ARCHIVO (S):**

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
TESIS. Análisis de pérdidas de nitrógeno.Doc	Application/msWord

**CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS:** A B C D E F G H  
I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z. a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v  
w x y z. 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9.

**ALCANCE**

**ESPACIAL:** \_\_\_\_\_(OPCIONAL)

**TEMPORAL:** \_\_\_\_\_(OPCIONAL)

**TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:**

INGENIERO QUÍMICO

**NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:**

PREGRADO

**ÁREA DE ESTUDIO:**

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA

**INSTITUCIÓN:**

UNIVERSIDAD DE ORIENTE. NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y  
ASCENSO:**

**DERECHOS**

De acuerdo al artículo 44 del reglamento de trabajos de grado: “Los trabajos de grado son de la exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y sólo podrán ser utilizados para otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo quien lo participará al Consejo Universitario”

Zora Cermeño

---

**AUTOR**

Oswaldo Ochoa

---

**ASESOR**

Fidelina Moncada

---

**JURADO**

Héctor Silva

---

**JURADO**

---

**POR LA SUBCOMISION DE TESIS**