



POSGRADOS

Maestría en
**PRODUCCIÓN Y OPERACIONES
INDUSTRIALES**
RPC-SO-30-NO.506-2019

Opción de Titulación:
Artículos profesionales de alto nivel

Tema:
DISEÑO DE UN MODELO DE
SIMULACIÓN DEL PROCESO
PRODUCTIVO DE LA LÍNEA DE GASES
QUE INCREMENTE LA PRODUCCIÓN DE
NITRÓGENO EN LA PLANTA ASU
GUAYAQUIL DE LINDE ECUADOR.

Autor:
Diego Leonardo Tipán Solá

Director:
Eduardo Xavier Vaca Michilena

QUITO – Ecuador
2022

Autor:



Diego Leonardo Tipán Solá

Ingeniero Industrial

Candidato a Magíster en Producción y Operaciones Industriales
por la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Quito.
dtipans1@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Eduardo Xavier Vaca Michilena

Ingeniero Mecánico

Magíster en Manufactura y Diseño Asistidos por Computador
xvaca@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

2022 © Universidad Politécnica Salesiana.

QUITO– ECUADOR – SUDAMÉRICA

DIEGO LEONARDO TIPÁN SOLÁ

Diseño de un modelo de simulación del proceso productivo

De la línea de gases que incrementa la producción de nitrógeno

En la planta ASU Guayaquil de Linde Ecuador.

DEDICATORIA

Andrea, por nunca dejar de creer en mí, por ser siempre mi fortaleza, y mi compañera de vida.

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a Linde Ecuador S.A. a sus gerencias por la confianza brindada a mi persona, para la realización de mis metas profesionales y crecimiento dentro de estos años de trabajo. A la Universidad Politécnica Salesiana, por los conocimientos brindados y por el apoyo para conseguir esta meta.

Tabla de Contenido

Resumen	9
Abstract.....	10
1. Introducción.....	11
2. Materiales y Métodos	21
3. Resultados y Discusión.....	31
3.1. Productividad.....	35
4. Conclusiones.....	37
5. Referencias	39

Índice de Figuras

Figura 1. Modelo esquemático de equipos de licuefactor para 30 Toneladas por días de Nitrógeno.....	12
Figura 2. Entrega y distribución de una ASU.....	15
Figura 3. Compresión interna en una ASU.....	15
Figura 4. Flujo de trabajo de un modelo para integrarlo en software de simulación de una ASU	16
Figura 5. Turbina expansor de nitrógeno de circuito cerrado.....	17
Figura 6. Diagrama de Proceso de una ASU	21
Figura 7. Gráfica tendencia de ventas de Nitrógeno en millones de m ³	22
Figura 8. Gráfica de producción por producto y tendencia de incremento futuro.....	24
Figura 9. Situación actual diagrama de proceso de Planta ASU Guayaquil, disponible GAN (nitrógeno gas).....	25
Figura 10. Propuesta de incremento con un Licuador de nitrógeno	26
Figura 11. Layout actual Planta.....	28
Figura 12. Layout Propuesto Planta.....	29
Figura 13. Fotografía de Planta ASU Guayaquil actual	29
Figura 14. Simulación modelada de ubicación de Licuefactor y equipos.....	30
Figura 15. Simulación modelada de ubicación de Sistema de enfriamiento y bombas	30
Figura 16. Simulación modelo actual con Software FLEXSIM	31
Figura 17. Gráfica de rendimiento situación actual	32
Figura 18. Simulación de modelo a implementar con Software FLEXSIM	33
Figura 19. Gráfica de rendimiento situación proyectada	34

Índice de Tablas

Tabla 1: Condiciones de funcionamiento de la simulación para recuperación de Nitrógeno.	14
Tabla 2: Cantidad de elementos presentes en la atmosfera	20
Tabla 3: Histórico de ventas de nitrógeno líquido en m ³	22
Tabla 4: Estadísticas de ventas de LIN (nitrógeno líquido) 2014 – 2021 en m ³	23
Tabla 5: Cuadro de producción de LIN 2015-2021 y proyección 2030 en toneladas por día	24
[15] Tabla 6: Casos de diseño con cantidades de GAN (nitrógeno gaseoso) disponible	27
Tabla 7: Productividad por instalación de un licuador de nitrógeno de 30 TPD (toneladas por día) en Planta ASU	36
Tabla 8: Beneficio económico mensual por productividad.	36

Diseño de un modelo de simulación del proceso productivo de la línea de gases que incrementa la producción de nitrógeno en la planta ASU Guayaquil de Linde Ecuador.

Autor(es):

Diego Leonardo Tipán Solá

Resumen

La planta ASU (unidad separadora de aire) de Linde Ecuador fue diseñada para producir los productos conocidos como gases del aire, que son oxígeno, nitrógeno y argón, siendo su diseño original configurado para que produzca mayor cantidad de oxígeno, así inició su operación en 2014. En los últimos años este diseño de operación no se ha mantenido constante porque las ventas de nitrógeno han ido incrementando, cambiando el modo de producción a máximo nitrógeno, cuando se hace esto, disminuye la producción de oxígeno, sin embargo, en el modo de producción de máximo oxígeno se dispone de corrientes de nitrógeno gas del proceso, las mismas que se pueden aprovechar para producir una mayor cantidad de nitrógeno líquido, sin afectar a la producción de oxígeno, lo cual es posible si se implementa equipos y maquinaria que realicen la licuefacción del nitrógeno gas y así obtener el incremento de 30 toneladas diarias de producción de nitrógeno, esto cubre el crecimiento anual de 5.3 % que se proyecta, además reafirma y fortalece el negocio de Linde Ecuador como el principal productor de nitrógeno para procesos diferentes que aportan también al crecimiento productivo del país.

Palabras Clave: ASU, congelamiento, exportación Flexsim, gases del aire, nitrógeno, producción.

Abstract

Linde Ecuador's ASU (Air Separation Unit) plant was designed to produce the products known as gases from the air, which are oxygen, nitrogen and argon, its original design being configured to produce a greater amount of oxygen, thus it began its operation in 2014. In recent years this operation design has not remained constant because nitrogen sales have been increasing, changing the production mode to maximum nitrogen, when this is done, oxygen production decreases, however, in the mode of maximum oxygen production, nitrogen gas streams from the process are available, the same ones that can be used to produce a greater amount of liquid nitrogen, without affecting the production of oxygen, which is possible if equipment and machinery are implemented that carry out the liquefaction of nitrogen gas and thus obtain an increase of 30 daily tons of nitrogen production, this covers the annual growth of 5.3% that is projected, also reaffirms and strengthens the business of Linde Ecuador as the main producer of nitrogen for different processes that also contribute to the productive growth of the country.

Keywords: ASU, freezing, export, Flexsim, air gases, nitrogen, production.

1. Introducción

Linde Ecuador es líder en el mercado ecuatoriano de producción de gases industriales, medicinales y sus variantes, dentro de los productos principales están el oxígeno, el nitrógeno y el argón, siendo estos productos de gases del aire.

A pesar de ser su producto estrella el oxígeno, en los últimos años se ve un incremento en la demanda de nitrógeno, esto debido a que en Ecuador uno de los productos líderes de exportación no petrolera es el camarón, el mismo que necesita un proceso de congelamiento especial con nitrógeno, para ser exportado a mercados europeos, asiáticos o norteamericanos como principales consumidores, este congelamiento para exportación lo logra al hacerlo con túneles de congelamiento con nitrógeno, esta producción y exportación a tenido un incremento gradual y con ello la demanda de nitrógeno se comporta de manera directamente proporcional.

Por lo expuesto se identificó la oportunidad de proponer un modelo de incremento de producción de nitrógeno en Planta ASU de Linde Ecuador S.A. porque existe una posibilidad de ocupar el nitrógeno gaseoso disponible.

Con un modelo simulado se puede identificar el incremento que se logra, apoyado de las proyecciones de venta y el estudio de mercado de como se ha comportado este segmento en últimos años.

De esta manera se recibe la asesoría del equipo de Ingeniería quienes confirman que es viable la construcción de un equipo licuefactor de nitrógeno para la Planta ASU de Guayaquil, calculan que el gas disponible es de más de 100 toneladas por día y que es suficiente instalar un equipo que produzca 30 toneladas por día.

Apoiados en las proyecciones de demanda para siguientes años y los negocios próximos definen que el crecimiento de la demanda de nitrógeno en los próximos 15 años será del 5.3 %, lo cual es la justificación para que se pueda recomendar la aprobación de la inversión que requiere el proyecto. Adicional se realiza los cálculos de la productividad posible por el

incremento de ventas lo cual traerá un beneficio económico neto y lo cual concreta el retorno esperado junto con los indicadores financieros requeridos.

Los análisis de ingeniería de instalación definen los equipos que se pueden ver en la Figura 1. Estos equipos son un licuefactor de 30 toneladas por día que necesita un compresor centrífugo de 1250 HP, una turbina de expansión, un tanque de almacenamiento de 70 toneladas de capacidad, sistema de bombas criogénicas de trasvase, sistema de enfriamiento para agua de refrigeración, sistema eléctrico, instrumentación y control completos, todo esto para que se adapte a la Planta existente. Entre las marcas conocidas de este segmento de equipos y maquinarias están Ingersoll Ram, ACD, Cosmodyne, WEG, General Electric, Siemens, ABB, Cryostar y el mismo Linde o Praxair, como los principales.



Figura 1. Modelo esquemático de equipos de licuefactor para 30 Toneladas por días de Nitrógeno.

Se revisa varios estudios de aplicación de simulaciones, así como modelos de incremento de producción de gases del aire, que se analizan para una mejor comprensión del tema.

Bulfin et al.[1] en su estudio de producción de nitrógeno de alta pureza a partir de aire, para aprovechamiento de energías generadas, analizan procesos PSA (presión, succión, adsorción), de diferentes tipos de plantas como las de membrana y también plantas criogénicas ASU, mencionando las de Linde, hace énfasis en la aplicación complementaria de proceso químico REDOX para la adsorción en los lechos de producción por presión, succión y adsorción de este tipo de plantas, analizan termodinámicamente que la energía demandada impacta directamente en la pureza del nitrógeno, con lo cual consiguen concluir

que la eliminación del oxígeno es eficiente y el grado de pureza de nitrógeno es estable, siendo un proceso muy aplicable en diferentes tipos de producciones industriales.

Yu et al. [2] desarrollan un análisis de cinética de la remoción de nitrógeno con proceso reactor de membrana no tejida, para producción de biogás, utilizan diferentes modelos matemáticos para estudiar la cinética de este proceso, hablando por primera vez de producción de nitrógeno de esta forma, que se basa en una membrana que ayuda al cultivo de bacteria anammox para la producción del biogás, pero que hace énfasis en la eliminación del nitrógeno para obtener el cultivo que ayuda a la generación, de esta manera cuantifica la cantidad eliminada de gas nitrógeno que por los porcentajes de cantidades que obtienen, hacen una referencia de cantidades de nitrógeno que se podría aprovechar.

Kim et al. [3] realizan un modelo numérico para estudiar la relación de presión y temperatura con nitrógeno para aplicarlo al enfriamiento de cables superconductores, utilizan nitrógeno llevado a su estado mixto de líquido y nieve, en sus conclusiones indican cómo utilizar el nitrógeno como medio refrigerante sin afectar las características de los cables superconductores, por ser un proceso poco intrusivo, también consiguen detectar que al aumentar el grado de subenfriamiento más bajo, se reduce también el intercambio de calor mutuo, finalmente se destaca que la estabilidad criogénica del proceso es única en el enfriamiento de los cables gracias al nitrógeno.

Karimi y Fatemi [4] en su estudio de simulación y experimentación de captura de metano y purificación de nitrógeno de un depósito mediante tecnología presión, succión, adsorción (PSA), denotan el ahorro energético al no depender de compresión o equipo compresor para la producción de nitrógeno con alta presión, logrando purificación de hasta un 95 % de pureza de nitrógeno recuperando hasta un 63 % en lechos alternantes, que a diferencia de procesos venteo, succión, adsorción (VSA) y temperatura, succión, adsorción (TSA) concluyen que no se necesita temperatura y tampoco compresores-blowers de proceso de vacío para la regeneración de los lechos.

Las corrientes de nitrógeno pueden llegar hasta una presión de 60 bares al 95 % de pureza de nitrógeno.

Con esta simulación, los valores de operación son muy consistentes como se pueden ver en la Tabla 1., donde se da valor de presión de adsorción de 20 bares y un tiempo de 180 segundos que son aceptables para una recuperación de corrientes de nitrógeno con velocidades de 0.2 ms^{-1} .

Tabla 1: Condiciones de funcionamiento de la simulación para recuperación de Nitrógeno.

Condición (u)	valor
Adsorción P (bar)	20
Tiempo de adsorción (s)	180
Velocidad de alimentación (ms^{-1})	0.225
Proporción de purga a alimentación (P / F)	0.15
Concentración de alimentación de CH ₄	0.15

Liu et al. [5] en su desarrollo de proceso de producción para mejora de una Planta ASU, proponen un ajuste en relación a la variabilidad del producto, mejorando la columna de destilación productora, donde se puede recuperar frío o energía adicional en el proceso de refrigeración de los componentes, obteniendo un 0.6 % de eficiencia adicional, y logrando reducir el consumo de energía en un 2.1 %. En el diagrama de entrega y distribución de la Figura 2. se observa cómo se convierte finalmente en subproductos o envasados los productos oxígeno, nitrógeno y argón. De la misma forma en la Figura 3. el esquema completo de balances de energía de la compresión interna de la Planta ASU con expansor de nitrógeno.

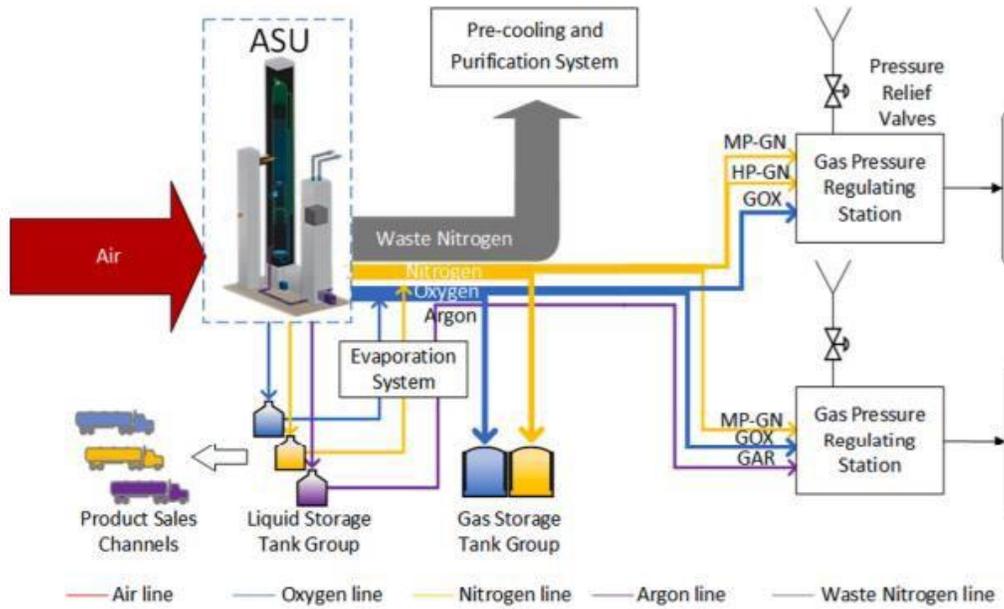


Figura 2. Entrega y distribución de una ASU

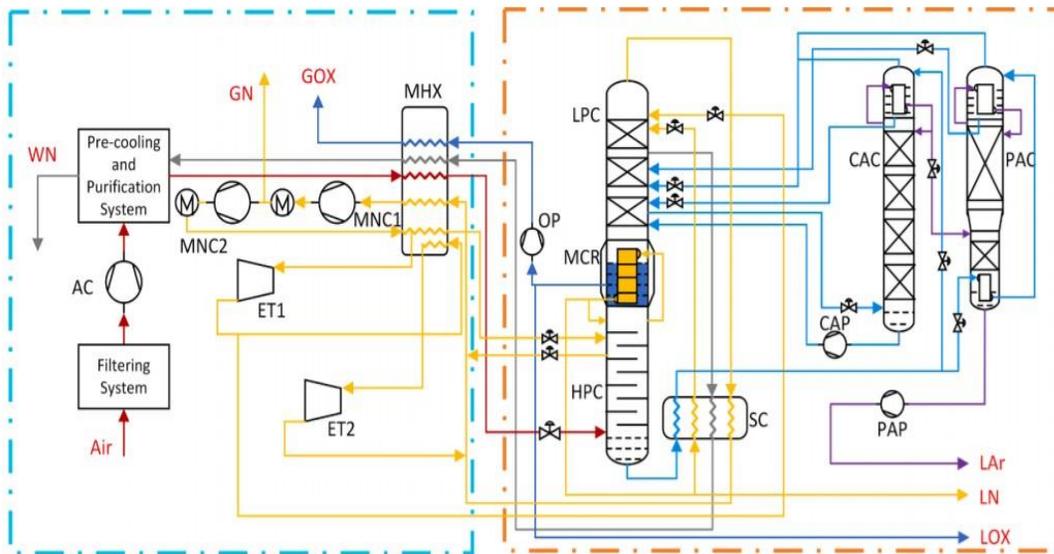


Figura 3. Compresión interna en una ASU

Kender et al. [6] en su estudio realizado de simulación de arranques y paradas de columnas de destilación de plantas ASU para funcionamiento flexible concluyen que por presión se puede modelar una operación exitosa simulada mediante software, como se puede observar

en infraestructura aplicable de la Figura 4. obteniendo datos o detalles históricos registrables que aportan a la operatividad de producción de nitrógeno, oxígeno y argón, detallando que se puede automatizar a todo nivel los procesos de las ASU, obteniendo la conclusión que es posible la simulación dinámica.

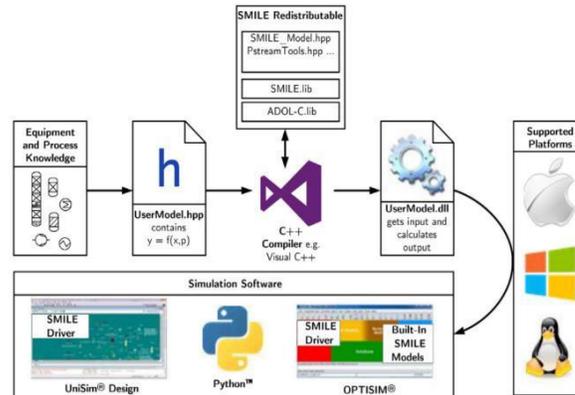


Figura 4. Flujo de trabajo de un modelo para integrarlo en software de simulación de una ASU

Wang et al. [7] realizan un análisis técnico, económico de enfoque a almacenamiento de energía de aire líquido, para generación de energía, oxígeno y los productos de las Plantas ASU, como productos a analizarse están el oxígeno y calefacción que se podría obtener con las energías no aprovechadas de las ASU, los licuefactores de nitrógeno como plantas o equipos especiales y las generadoras de energía convencionales, concluyendo que este tipo de aprovechamiento de energía es muy prometedor y en vanguardia para reducir el impacto de contaminación y gestionar de mejor manera la huella de carbono, obteniendo de esta manera inclusive ingresos económicos al reducir egresos por mejor manejo de energías.

En este aspecto se puede acotar que la instalación de un equipo licuefactor tiene muchos impactos positivos por su baja emisión de contaminantes, su seguridad en todo aspecto, adicional de ser versátil en generar productividad y eficiencia en cuanto a su funcionamiento.

Wang et al [8] desarrollaron un experimento de turbina de líquido criogénico, que ocupa nitrógeno licuado, el expansor se utiliza en un sistema de circuito cerrado, mediante simulación matemática para obtener el incremento de eficiencia isentrópica que es de 78.8 % se optimiza al 89.6 % de caudal de diseño, en comparación al flujo másico, adicional de

la eficiencia total y la eficiencia hidráulica, encontrando valores de pérdidas en paso de flujos y en el sistema de cojinetes, esto enlaza en un análisis de la velocidad variable del sistema, concluyen que la eficiencia del expansor aumenta con el flujo y cuando aumenta sobre ese valor disminuye el flujo.

En la Figura 5. se puede observar un esquema típico de turbina expansor de líquido nitrógeno. En la misma se puede ver la alimentación de nitrógeno gas, el esquema de proceso de licuefacción del gas a líquido criogénico, que mediante una válvula de expansión aprovecha la parte que se vaporiza o se gasifica para alimentar el reciclo, es decir, el compresor que nuevamente alimenta el gas que se aporta en el anterior proceso, es así como se puede comparar este proceso sencillo con el comportamiento de la licuefacción en sistemas más complejos.

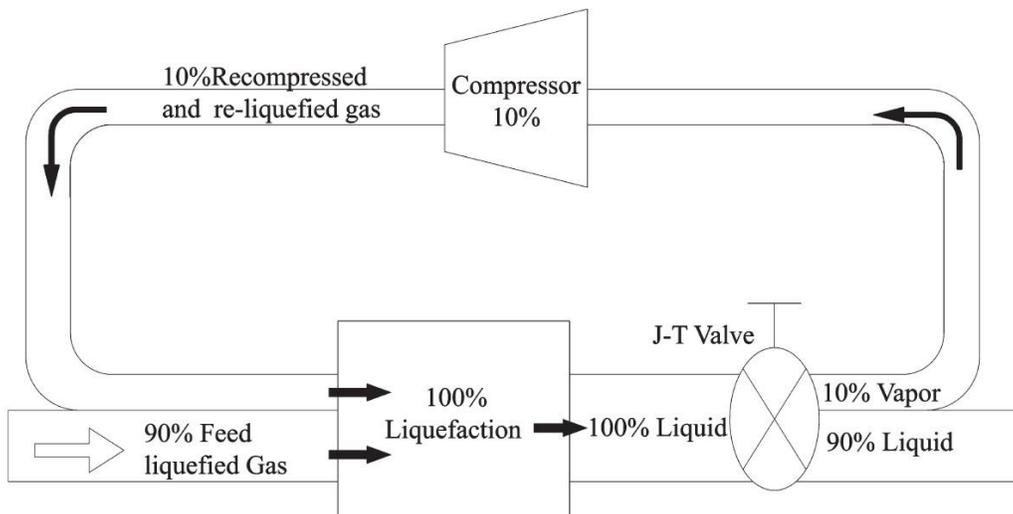


Figura 5. Turbina expansora de nitrógeno de circuito cerrado

Cummings et al. [9] desarrollan un programa binario aplicable a las unidades licuefactores de nitrógeno, enfocados a obtener ahorro energético ya que el mercado de venta de energía está planteado en dependencia de los clientes, en cuanto a precios y horarios, existiendo un

sistema de penalizaciones en horarios picos de mayor consumo, con lo cual se puede plantear un sistema predictivo que maneje la energía por lotes y así se logra programar cargas de ingreso y salida de ocupación eléctrica que generen beneficios económicos por ahorros de energía, al clasificar los consumos por horarios.

He y Ju [10] en su desarrollo de un diseño conceptual de un licuefactor de nitrógeno por expansión a pequeña escala, realizan con un algoritmo que optimice el proceso en consumos de energía, también desarrollan análisis termodinámicos a diferentes equipos con resultados en optimización de consumos de energía de 4.69 % adicionando que los resultados de excedentes de energía disponibles son de 0.36 % de esta manera los resultados entonces muestran buena flexibilidad de ahorros de energía concluyendo que es un modelo muy aplicable.

Guo et al. [11] en su estudio de control de alimentos analizan la congelación criogénica que se realiza con nitrógeno, mediante la experimentación, donde indican que se mejora la seguridad alimentaria, y la vida útil de los camarones, gracias al congelamiento controlado que permite el gas nitrógeno, la combinación de recubrimientos antimicrobianos sumado la congelación criogénica lograron tener una reducción de un 99.999 % la listeria y otras bacterias naturales que con otros procesos no se había podido llegar a ese resultado de calidad del producto.

Rodriguez [12] en su tesis de fin de Master de la universidad de Valladolid menciona la alta competitividad y el acelerado ritmo actual de las compañías buscando optimizaciones , por lo que refiere el uso de herramientas lean, recalca que no es suficiente el estudio teórico, pero concluye que para confirmar estos métodos y herramientas se utiliza la simulación de procesos en programas como Fitness, Arena simulation y FLEXSIM haciendo un detalle de Flexsim y de cómo parten simplificadaamente para obtener soluciones sencillas a procesos complejos.

Chirinos y Meza [13] analizan en sus tesis de grado las reservas energéticas del Perú donde mencionan los gases como fuente de energías , relevante la gran cantidad de reservas existentes y el uso del gas natural licuado a un costo muy bajo lo cual hace competitivo el mercado, evalúan nuevas tecnologías mediante su estudio, entre ellas la simulación de procesos y hacen uso del Aspen Hysis y Flexsim, para obtención de simulaciones de nuevos compuestos químicos, utilizando la simulación como medio práctico de análisis y optimización para la generación de modelos que den mejores resultados y precisos en la generación de los compuestos.

Febres y Ochoa [14] en su estudio para propuesta de mejora de proceso productivo utilizando el software Flexsim como herramienta de toma de decisiones, mencionan el día a día de los problemas en las plantas industriales y la resolución de problemas que se vuelven demorosos y complejos, donde surge la necesidad de herramientas tecnológicas como software de simulación que permiten optimizar procesos digitalmente, donde destacan que son más precisos en el cálculo y reducen el tiempo a comparación de la mano de obra tradicional, lo cual finalmente se traduce en ahorros y mejora en general.

El Nitrógeno con fórmula N_2 , es un elemento presente en la atmosfera del planeta, conforma la lista de los elementos conocidos como gases del aire, en porcentaje, un 78% de la atmosfera terrestre es nitrógeno, es decir, está presente en mayor cantidad en la masa de aire que respiramos los seres humanos, como se puede ver en la Tabla 2. su presencia es abundante:

Tabla 2: Cantidad de elementos presentes en la atmosfera

Elemento	Cantidad presente (%)
Nitrógeno	78
Oxígeno	21
Argón y otros	1

Como se ve en la Tabla 2. de cantidad de elementos existentes en la atmósfera, el nitrógeno es el de mayor presencia con un 78 %, seguido del oxígeno con un 21 % y otros gases que entre ellos está el argón, con un 1 %.

Por su gran presencia el ser humano a buscado a lo largo de la historia, métodos o técnicas para separarlo y captarlo al nitrógeno, al igual que a los demás gases del aire y así poder utilizarlos en diferentes aplicaciones industriales, medicinales, productivas y de diversos tipos, destacando entre las aplicaciones que se le da al nitrógeno la refrigeración, congelamiento y preservación.

Existen plantas de producción de gases del aire, conocidas como ASU (Air Separation Unit), en las cuales al aire ambiente se le separa en sus componentes por procesos de purificación, licuefacción y destilación, como se observa en la Figura 6., obteniendo los llamados gases del aire de forma líquida, productos que después se gasifican para utilizarlos en diferentes aplicaciones, en este estudio modelaremos un sistema de incremento que optimice la producción con la finalidad de obtener un incremento de 30 toneladas por día de nitrógeno con herramientas tecnológicas.

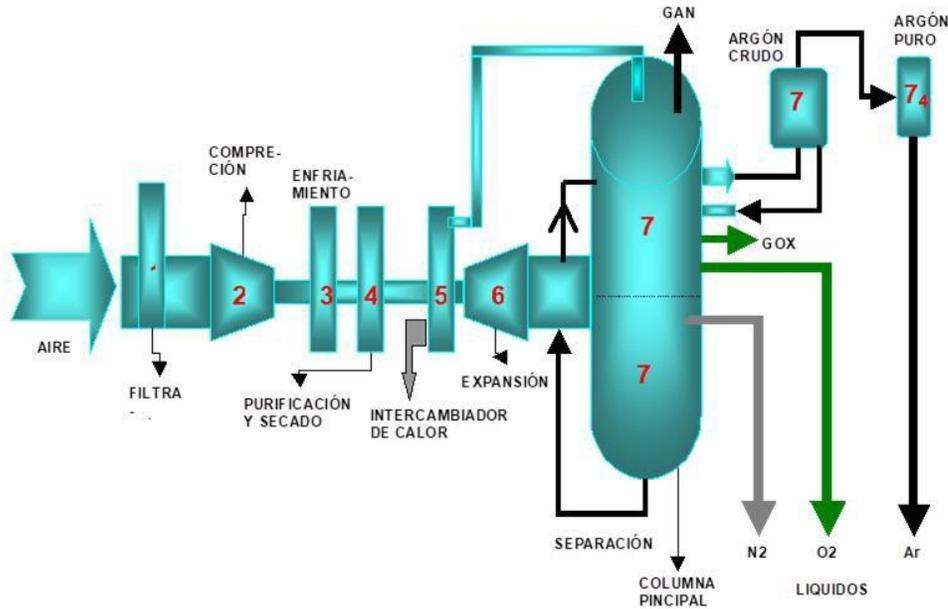


Figura 6. Diagrama de Proceso de una ASU

2. Materiales y Métodos

MODELO DE SIMULACIÓN PARA INCREMENTO:

En función del modelo actual de producción de la planta ASU Guayaquil y la situación comercial se determina las cantidades de ventas de nitrógeno, y con ello se logra identificar el déficit de nitrógeno que se necesita colocar en el mercado.

Actualmente se producen por diseño 24 toneladas diarias de nitrógeno y con el modelo de diseño que se propone se busca incrementar en 30 toneladas de nitrógeno por día.

Para esto se analiza los reportes de ventas de años pasados como se muestra en la Tabla 3., lo cual indica ventas en metros cúbicos de nitrógeno, adicional se analiza financieramente el

actual budget y se trabaja en un forecast para al menos cinco años, lo cual ayude a dimensionar el incremento necesario adecuado.

Tabla 3: Histórico de ventas de nitrógeno líquido en m³

	2017	2018	2019	2020	2021
Enero	707,897	852,618	896,534	839,839	888,620
Febrero	642,507	735,432	873,007	700,957	904,059
Marzo	618,129	753,773	863,255	824,611	897,836
Abril	593,357	752,322	1,030,087	292,505	588,691
Mayo	897,709	893,680	981,198	590,884	727,470
Junio	739,882	806,978	882,870	894,838	867,972
Julio	766,905	1,072,892	997,163	849,800	913,098
Agosto	682,848	972,474	650,616	833,166	853,299
Septiembre	566,299	930,317	746,153	848,072	1,139,579
Octubre	750,572	928,218	700,127	670,171	1,206,071
Noviembre	502,425	896,326	778,312	1,055,758	1,200,455
Diciembre	437,601	712,871	480,416	785,881	1,089,765
Total m³	7,906,131	10,307,901	9,879,738	9,186,482	11,276,915

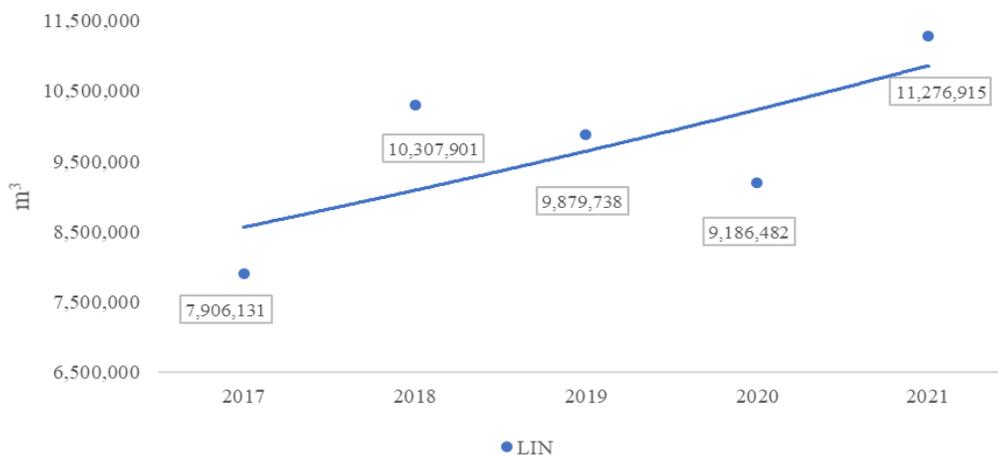


Figura 7. Gráfica tendencia de ventas de Nitrógeno en millones de m³

Como se aprecia en el gráfico de la Figura 7., el crecimiento de ventas tiene tendencia a subir por lo cual es viable incrementar la producción de nitrógeno.

Se realiza un análisis de la estadística con indicadores que ayudan a analizar mejor los datos de ventas para obtener más información que precise las cantidades y se pueda ir afinando el requerimiento, como se aprecia en la Tabla 4.

Tabla 4: Estadísticas de ventas de LIN (nitrógeno líquido) 2014 – 2021 en m³

Variable (año)	Conteo total	Media	Desviación Estándar	Mínimo	Mediana	Máximo
2014	12	272,865	72,482	151,319	266,565	419,975
2015	12	363,891	78,052	219,908	353,779	483,590
2016	12	528,753	97,021	325,481	547,305	684,191
2017	12	658,844	126,092	437,601	662,678	897,709
2018	12	858,992	109,926	712,871	873,149	1,072,892
2019	12	833,212	159,953	480,416	868,131	1,030,087
2020	12	765,540	189,829	292,505	828,889	1,055,758
2021	12	939,743	187,959	588,691	900,948	1,206,071

Con la estadística de ventas también se calcula el histórico de demanda de producción con valores reales que la planta ASU ha generado en toneladas de cada producto, el análisis es en diferentes años para de esta manera realizar la proyección actual y futura del comportamiento de producción del nitrógeno como se puede ver en la siguiente Tabla 5. Que es un cuadro de producción.

Para justificar el proyecto y la inversión requerido fue necesario un análisis completo tanto financiero como de ventas y producción, ya que todos los factores intrínsecos en este tipo de

implementación son los mencionados, solo de esta manera y asegurando un beneficio y retorno adecuado el mismo es viable para aprobación.

Tabla 5: Cuadro de producción de LIN 2015-2021 y proyección 2030 en toneladas por día

	2015	2020	2021	2022	2023	2025	2030
Oxígeno líquido	31.8	31.1	37.6	27.8	28.1	33.6	39.3
Nitrógeno Líquido	15.8	32.2	35	42.5	44.2	38.6	32.9
Nitrógeno incr.	0	0	0	0	5.3	18.1	35.1
Argón líquido	3	3	4	4	3	3	4

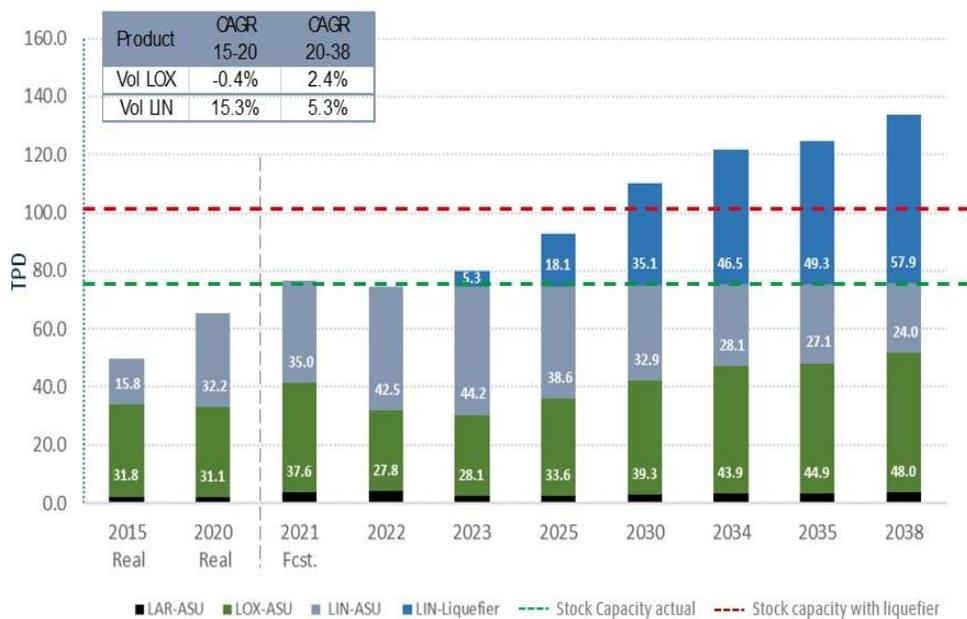


Figura 8. Gráfica de producción por producto y tendencia de incremento futuro.

Como se observa en la gráfica de la Figura 8. a partir del año 2023 es necesario que la planta instale un nuevo licuefactor porque el incremento es sustancial año por año y la planta ASU actual de Guayaquil solo podrá satisfacer la demanda hasta el año 2022 sin este equipo.

En 2022 el promedio diario de producción es de 42.5 toneladas de nitrógeno por día como se ve en la Tabla 5. y en la Figura 8. Así para el año 2023 ya es necesario incrementar en al menos 5.3 toneladas, en 2025 el incremento necesario es de 18.1 toneladas y así gradualmente.

En función de la tecnología de la Planta ASU Guayaquil actual, se revisa su diseño y con asesoría de ingeniería especializada se define que el mejor modelo o método para incremento es instalar un licuefactor de nitrógeno.

Lo anterior porque la planta fue diseñada con esa opción, para que tomando la corriente de gas nitrógeno (GAN) que actualmente no se aprovecha para producción, se pueda utilizar esta corriente y la misma pueda ser licuada, de esta manera se obtiene el incremento en la cantidad de producción de nitrógeno líquido de 30 toneladas por día.

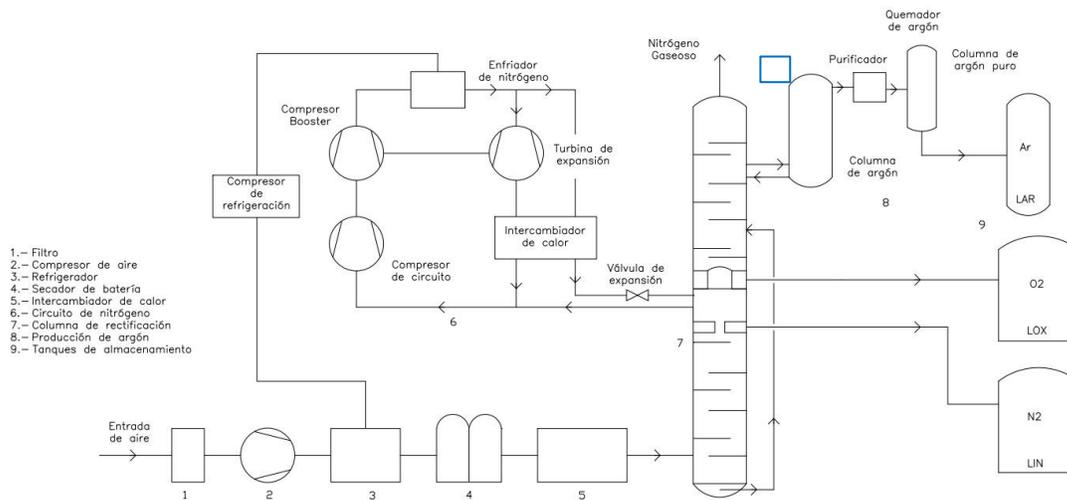


Figura 9. Situación actual diagrama de proceso de Planta ASU Guayaquil, disponible GAN (nitrógeno gas)

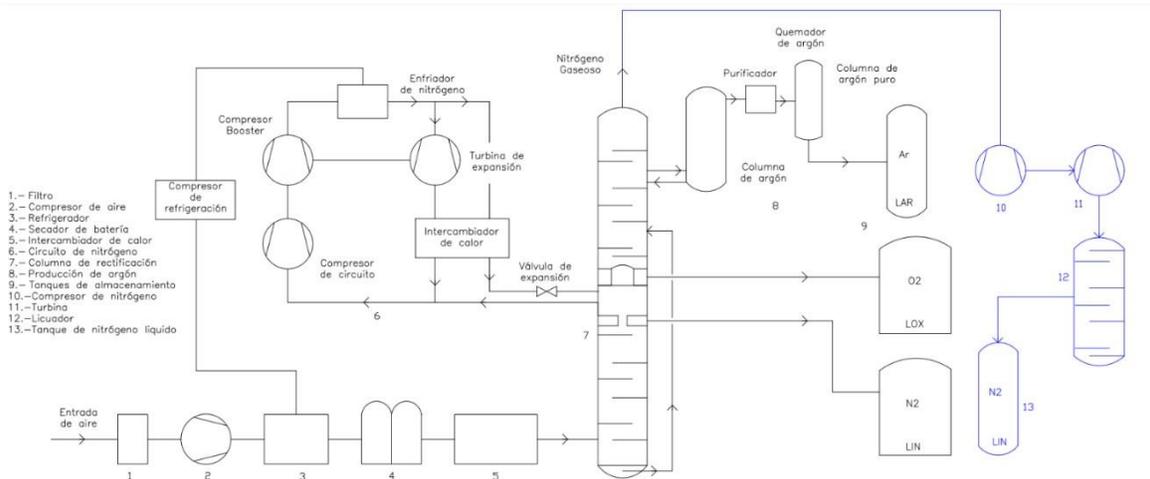


Figura 10. Propuesta de incremento con un Licuador de nitrógeno

Como se puede observar la situación actual en la Figura 9. el proceso de producción de gases del aire tiene una corriente de nitrógeno gaseoso o GAN que no se aprovecha, el cual en la Figura 10. se puede observar que sería procesado con un compresor, una turbina de expansión y un equipo licuefactor para obtener finalmente el nitrógeno líquido, el cual se va a almacenar en un tanque criogénico.

Las plantas ASU pueden funcionar muy versátilmente acorde la configuración que se requiera cuando se necesita producir más oxígeno o nitrógeno según sea el requerimiento, es así, que se puede observar en la Tabla 6. que en cada caso de diseño o funcionamiento se tiene disponibles corrientes de nitrógeno gaseoso muy considerables, por ejemplo, en el caso 1 se dispone 4900 Nm³/h de flujo de nitrógeno gaseoso.

[15] **Tabla 6:** Casos de diseño con cantidades de GAN (nitrógeno gaseoso) disponible

Prod	Pureza (%/ppm)	Caso 1 diseño		Caso 2		Caso 3	
		Flujo (Nm ³ /h)	Presión (bar)	Flujo (Nm ³ /h)	Presión (bar)	Flujo (Nm ³ /h)	Presión (bar)
GOX	>=99.5 %	1500	31	1200	31	1500	31
LOX	>=99.5 %	1500	-	1800	-	100	-
GAN	1 ppm O ₂	4900	1.05	5400	1.05	2900	1.05
LIN	1 ppm O ₂	800	-	560	-	1300	-
LAR	1 ppm O ₂ N ₂	113	-	116	-	91	-

Apoyados de software y simulaciones se muestra el Layout o la situación actual de la Planta ASU Guayaquil en la Figura 11. y también la propuesta de donde y como quedarían instalados los equipos necesarios para el licuefactor y así lograr el incremento de producción en la Figura 12.

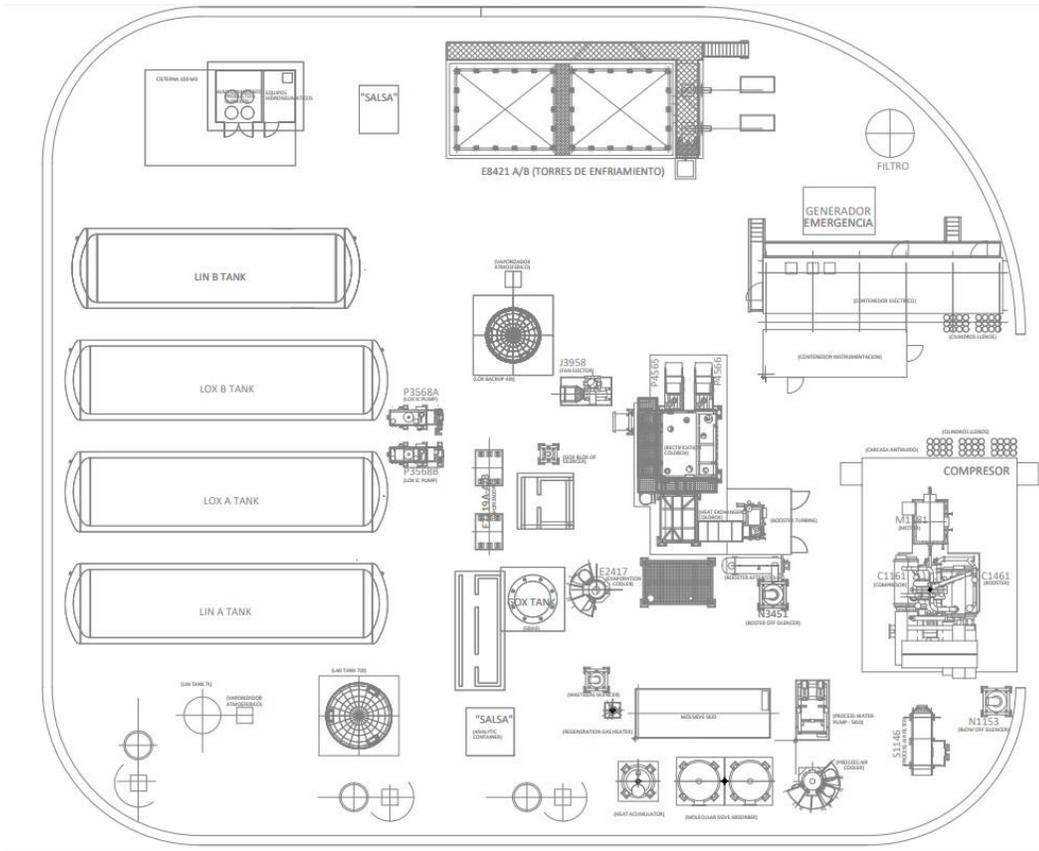


Figura 11. Layout actual Planta

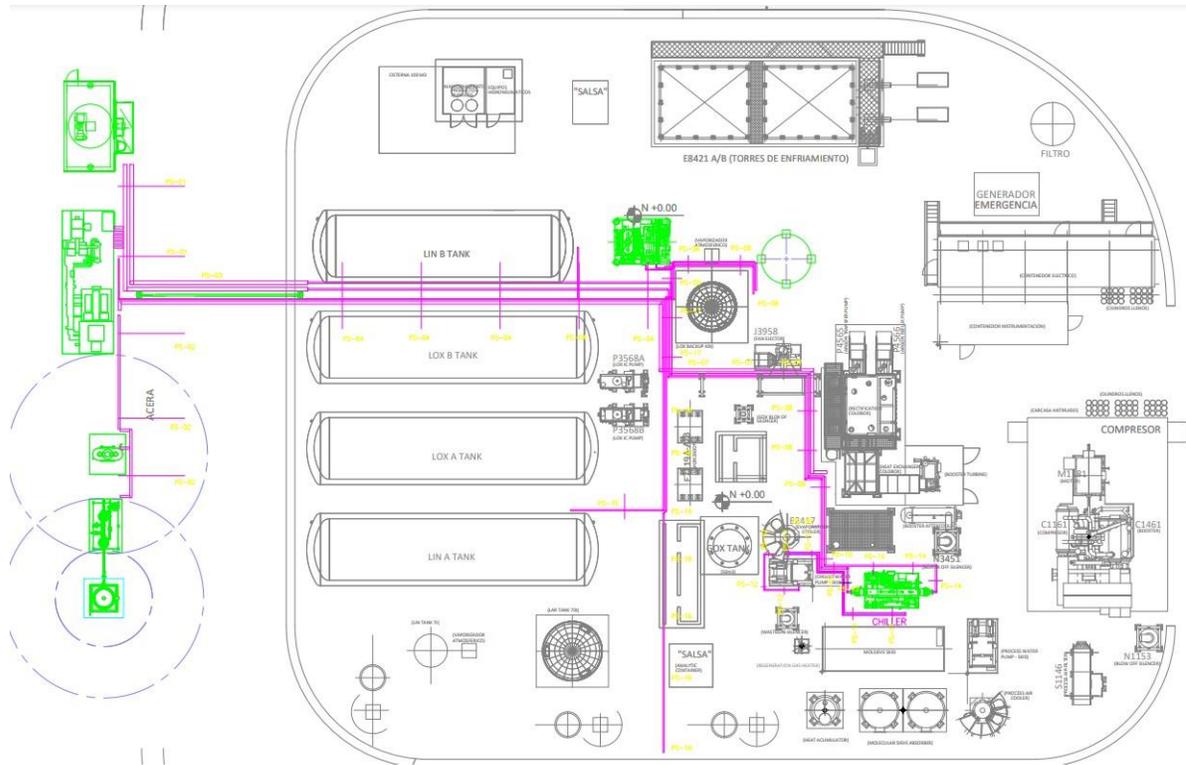


Figura 12. Layout Propuesto Planta



Figura 13. Fotografía de Planta ASU Guayaquil actual



Figura 14. Simulación modelada de ubicación de Licuefactor y equipos



Figura 15. Simulación modelada de ubicación de Sistema de enfriamiento y bombas

Con el apoyo de un equipo multidisciplinario con áreas de soporte de ingeniería y operaciones se diseña el sistema más adecuado para la cantidad de incremento calculada y la situación de demanda del mercado y proyección de ventas, como se mostró en la gráfica de la Figura 8.

Se obtiene una propuesta de incremento de producción de nitrógeno con procesos, maquinaria o equipos que se ajusten al modelo de planta actual y a la disponibilidad de gas nitrógeno que se puede licuar.

3. Resultados y Discusión

Con el software FLEXSIM se simula el incremento de producción que se lograría con los diseños realizados, en diferentes escenarios de cantidades de incremento de producción de nitrógeno, que satisfagan la demanda del mercado.

En la Figura 16. Se puede observar el modelado de la situación actual del proceso de producción de gases del aire de la planta ASU Guayaquil, realizado con el software FLEXSIM.

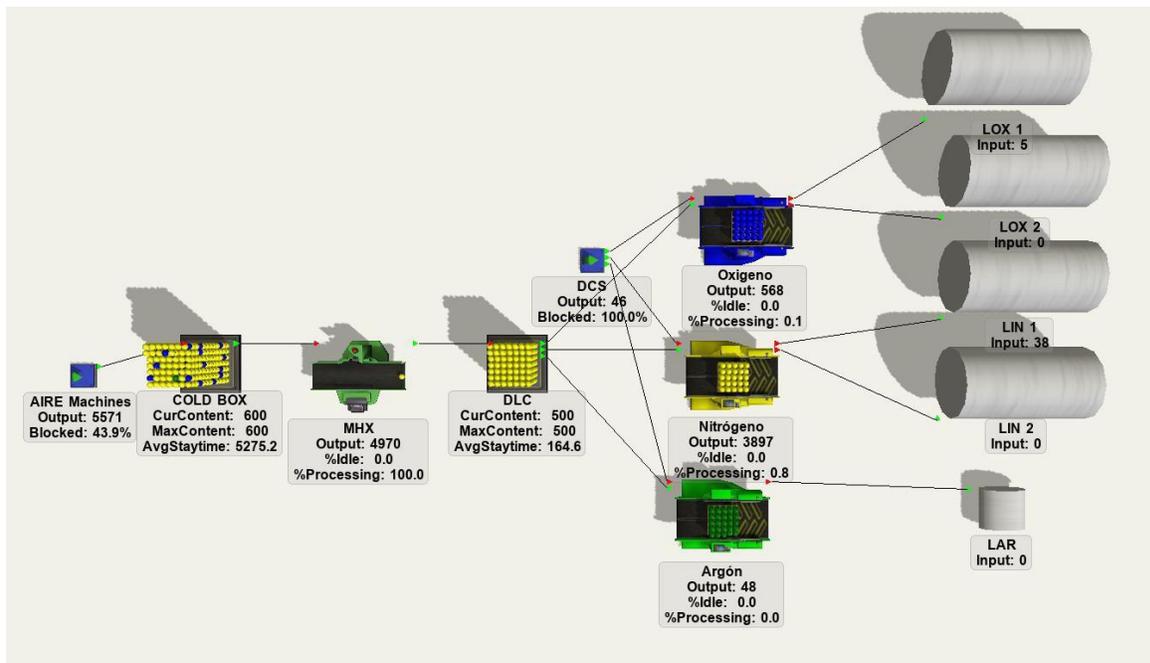


Figura 16. Simulación modelo actual con Software FLEXSIM

Se realizó la simulación en el software FLEXSIM de la situación actual tomando en cuenta los procesos y las maquinarias, adicional de los productos de la Planta ASU, gracias a la versatilidad del simulador se puede configurar desde las máquinas o los equipos utilizados, así como también se puede colocar simulaciones de personal o robots inclusive que conformen la simulación, en fin un sin número de opciones que ayudan a adaptarse al proceso que se necesite, se puede configurar también valores de proceso como ingresos y salidas, temporizaciones, paros, restricciones, etc., se puede elegir procesadores de

diferentes tipos, modos de transporte e incluso almacenamiento de diferentes formas, como este caso utilizamos tanques para el almacenamiento final, logrando un esquema muy apegado a la realidad de como es el proceso productivo, una vez configurado se asigna tiempos y características de los diferentes subprocessos y se puede obtener resultados, es así que el software tiene algunas herramientas de estadística y control, las cuales nos permite realizar análisis más precisos y comparaciones con lo que se requiere proyectar.

De la misma forma en la Figura 17. Se presenta la gráfica de rendimiento de del proceso de producción de la Planta ASU Guayaquil, que, en función del tiempo de simulación aplicado, se aprecia un resultado de 5 unidades de producción como salidas y 38 unidades de Nitrógeno en el modo de producción actual, como salida también, recordemos que el argón tiene menos presencia en la atmosfera por lo que tarda más tiempo en tener salidas o producción.

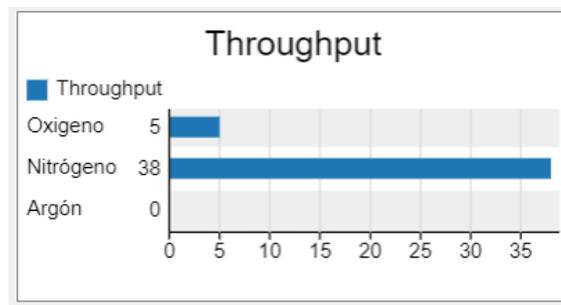


Figura 17. Gráfica de rendimiento situación actual

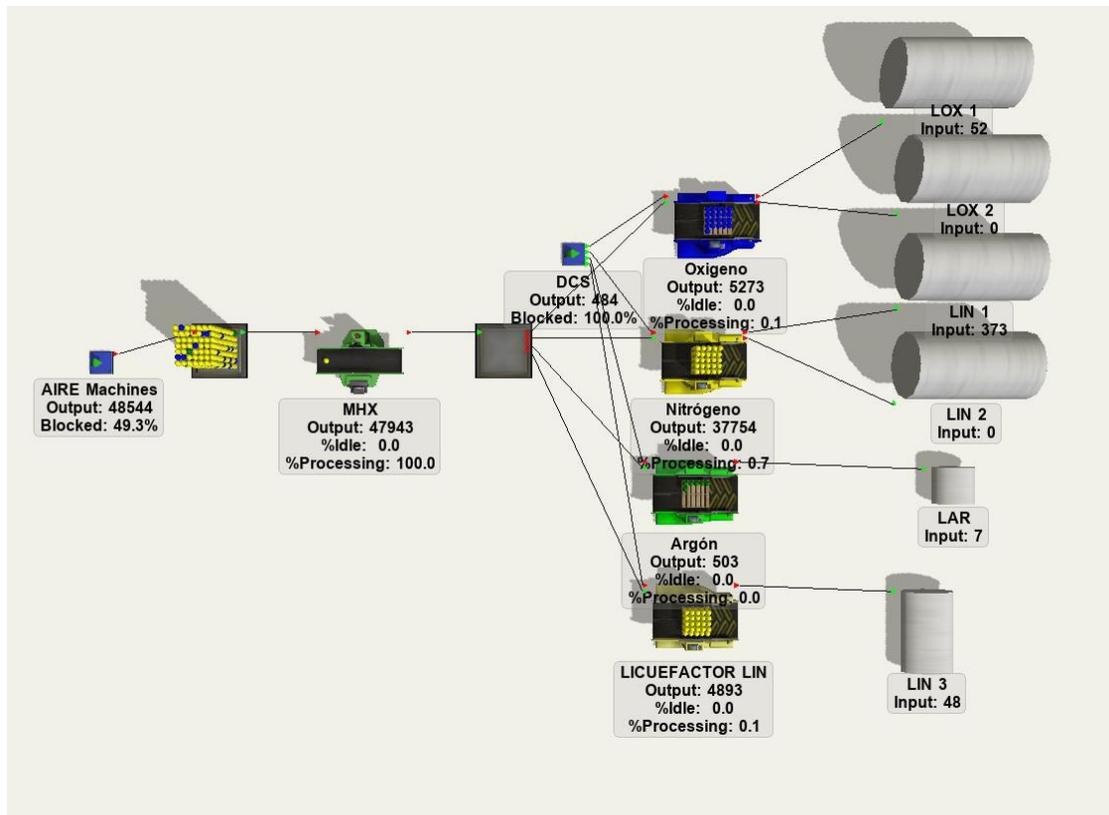


Figura 18. Simulación de modelo a implementar con Software FLEXSIM

En la Figura 18. podemos observar el resultado de la implementación simulada en el software FLEXSIM, tenemos el equipo licuefactor que realizaría el incremento de producción de nitrógeno en 30 toneladas por día, adaptado a la situación actual, de la misma manera que se realiza la proyección de ingeniería, instalando equipos que realicen el proceso de licuar el nitrógeno gas disponible y aprovechando esa corriente de gas de manera productiva, de la misma forma se puede observar las estadísticas que genera el software FLEXSIM en sus dashboards, donde se registra el equipo licuefactor como una nueva línea de producción

De la misma manera la gráfica de la Figura 19. en sus salidas ya muestra el Licuefactor y en función del tiempo de simulación aplicado, se puede observar que la salida LICUEFACTOR LIN presenta 48 unidades de producción dando la muestra de que todo el proceso se mejora

al haber realizado este incremento, inclusive el Nitrógeno en este modo de producción muestra un valor de 373 unidades de producción.

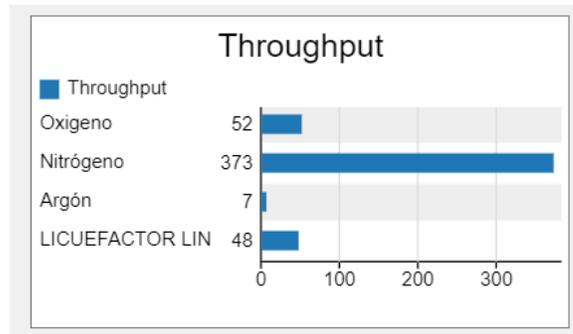


Figura 19. Gráfica de rendimiento situación proyectada

Con la simulación se visualiza líneas de procesos productivos de gases del aire de forma gráfica en FLEXSIM, como son producción de oxígeno, nitrógeno y argón, que permiten tener variables claras de líneas productivas lo cual aporta a diseñar de mejor manera los proyectos y tener datos reales de procesos aplicados, en este caso se visualiza la línea adicional de nitrógeno y como sería su aporte.

Si partimos de la situación estadística y de mercado actual y proyectado en cuanto a demanda de nitrógeno, está justificada la necesidad de incrementar la producción de nitrógeno en la planta de separación de gases del aire. La demanda de mercado hasta el año 2022 será de alrededor de 42.5 toneladas por día, y se incrementará gradualmente llegando en 2023 a 49.5 toneladas, donde se ve que inicia la necesidad del licuador para incrementar la producción, ya que el crecimiento es exponencial año tras año.

En los análisis desarrollados por ingeniería se confirma la posibilidad de instalar un equipo licuador de nitrógeno a la Planta ASU Guayaquil, principalmente por tener disponibilidad de una corriente de GAN (Nitrógeno gaseoso) que puede ser por diseño de un flujo de hasta 5400 Nm³/h en el segundo caso de diseño.

En el análisis de la corriente de GAN que se va a ocupar se verifica que actualmente en una parte de este flujo se ocupa para refrigeración del aire del proceso realizando un

subenfriamiento del aire, actualmente ese flujo es de 2700 Nm³/h, lo cual indica que aún existe una buena cantidad de flujo disponible, de todas maneras, por ese motivo se considera un nuevo equipo de refrigeración como sistema de enfriamiento.

3.1. Productividad

En todo tipo de proyecto que se ejecuta se tiene un beneficio, que puede ser de diferentes tipos, en este caso de instalación de un equipo licuefactor de nitrógeno, se tiene el beneficio de obtener mayor producción de este gas disponible para la venta y abastecimiento del mercado local, por tal motivo se calcula un beneficio económico con datos reales, ya que se dispone de la información de costos y de ventas lo cual apoya para que podamos tener un cálculo de beneficio real que nos va a traer la implementación del proyecto y lo reportamos regionalmente como productividad donde se engloba y resume la finalidad total de esta mejora o eficiencia realizada con el proyecto ejecutado.

En la Tabla 7. se calcula la cantidad de líquidos totales que se incrementa de producción en TPD (toneladas por día), el resultado es el esperado, es decir, 30 toneladas por día, ya que podemos apreciar que en el caso 3 de diseño la cantidad de producción de líquidos totales es de 80 TPD, pero en el caso actual de producción de máximo LIN es de 75 toneladas de líquidos totales, y así al optimizar con la instalación de un licuador la cantidad de líquidos totales es de 105 toneladas por día.

En la Tabla 8. se calcula también la diferencia, entre el costo de producción con el costo de venta de nitrógeno y así es como se puede obtener el beneficio económico mensual en dólares que traerá la venta de este incremento de producción que es aproximadamente \$128142 USD.

Tabla 7: Productividad por instalación de un licuador de nitrógeno de 30 TPD (toneladas por día) en Planta ASU

	Diseño caso 3	Operación sin licuador a máximo LIN	Optimización con Licuador
TPD Líquidos Totales	80	75	105
LOX (TPD)	37	21	50
LIN (TPD)	39	50	51
LAR (TPD)	4	4	4
Power KW/hr	3400	3390	4329

Tabla 8: Beneficio económico mensual por productividad.

	$\Lambda(+)$TPD	Costo de venta LIN USD/TON	Costo de producción LIN USD/TON	Beneficio mensual
LIN	30	\$246.45	\$104.07	\$128142

4. Conclusiones

En las Plantas ASU existe corrientes o flujos de diferentes elementos que pueden ser aprovechadas para otros procesos de planta sean propios del sistema instalado, como también podrían ser utilizados como energía en otros sistemas en este modelo de planta como se apreció en la Tabla 6. el caso 1 de diseño dispone de una corriente de GAN (nitrógeno gaseoso) de 4900 Nm³/h, en el caso 2 hasta 5400 Nm³/h y en el caso 3 o la menor disponibilidad de GAN es de 2700 Nm³/h.

En este estudio propuesto con las corrientes de nitrógeno gaseoso disponible que se pueden utilizar, se confirma en simulación que se logra un incremento de nitrógeno de 30 toneladas por día, sin afectar a las demás producciones de gases y de esta manera satisfaciendo la demanda que se proyecta a futuro que es un crecimiento del 5.3 % en el mercado de LIN (nitrógeno líquido), todo esto apoyado también en el análisis estadístico como se presentó en la Figura 8.

Con las herramientas de simulación como el software FLEXSIM, los modelados o estadísticos digitales, se puede visualizar y manejar de manera técnica y eficiente las proyecciones o diseños propuestos porque confirma resultados y en el proceso aporta a cumplir los objetivos planteados como se muestra en la Figura 18. donde se aprecia el equipo licuefactor que realizaría el incremento de producción de nitrógeno en 30 toneladas por día, y en la Figura 19. se aprecia que el rendimiento se ve mejorado en el nitrógeno con la implementación del licuefactor ya que todos los productos están en rendimiento aceptable y se aprecia el aporte de los equipos, inclusive el Nitrógeno en este modo de producción muestra un valor de 373 unidades de producción y el licuefactor presenta 48 unidades de producción.

Si instalamos un sistema licuefactor de nitrógeno para aumentar la producción de este elemento, no afectamos a la producción de oxígeno en su caso de diseño como se aprecia en

la Tabla 6., ya que el diseño original de esta planta fue para oxígeno con una producción de 1500 Nm³/h de LOX y una pureza ≥ 99.5 %, dejando disponible una gran corriente de GAN de 4900 Nm³/h con una pureza de 1 ppm O₂, lo cual se aprovecha, para por licuefacción obtener mayor cantidad de LIN y así cumplir con el propósito de incremento de esta propuesta.

Incrementar la producción de nitrógeno para las aplicaciones demandantes proyectadas, aporta a la rentabilidad de la compañía ya que el crecimiento de los próximos años es de 2.4 % en oxígeno y 5.3 % en nitrógeno como se apreció en la Figura 8., al disponer de mayor cantidad de producto disponible para la venta, se aporta en la consolidación del negocio local.

Cuando se diseñan plantas o sistemas criogénicos como el caso de esta propuesta para 30 toneladas, se debe tener muy presente los temas de seguridad industrial y salud ocupacional, como son temperaturas, presiones, etc., a manejar, adicional de locaciones donde serán instaladas, regulaciones locales y todos los riesgos inmersos para un correcto manejo de seguridad en general.

La productividad también es un resultado muy acertado del éxito de un proyecto como se apreció en la Tabla 7. el incremento de líquidos totales producidos es de aproximadamente 75 a 105 Toneladas por día, lo cual nos resulta en 30 toneladas de incremento de nitrógeno y el precio de venta menos el de producción nos dan un beneficio económico mensual estimado en \$128142 USD, como se apreció en la Tabla 8.

5. Referencias

- [1] B. Bulfin, L. Buttsworth, A. Lidor, and A. Steinfeld, “High-purity nitrogen production from air by pressure swing adsorption combined with SrFeO₃ redox chemical looping,” *Chem. Eng. J.*, vol. 421, p. 127734, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127734>.
- [2] H. Yu, J. Yang, X. Ding, H. Wang, and S. Wang, “Six sigma robust optimization method based on a pseudo single-loop strategy and RFR-DBN with insufficient samples,” *Comput. Struct.*, vol. 257, p. 106653, Dec. 2021, doi: [10.1016/J.COMPSTRUC.2021.106653](https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUC.2021.106653).
- [3] B. Kim, D. kwon, and S. Jeong, “Temperature distribution of long-length high temperature superconducting cable cooled by slush-nitrogen,” *Cryogenics (Guildf.)*, p. 103369, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2021.103369>.
- [4] K. Karimi and S. Fatemi, “Methane capture and nitrogen purification from a nitrogen rich reservoir by pressure swing adsorption; experimental and simulation study,” *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 9, no. 5, p. 106210, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106210>.
- [5] Y. Liu *et al.*, “An improved ASU distillation process and DIM-LPB method for variable product ratio demand,” *Sep. Purif. Technol.*, vol. 277, p. 119499, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119499>.
- [6] R. Kender, B. Wunderlich, I. Thomas, A. Peschel, S. Rehfeldt, and H. Klein, “Pressure-driven dynamic simulation of start up and shutdown procedures of distillation columns in air separation units,” *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 147, pp. 98–112, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.04.031>.
- [7] C. Wang, N. Akkurt, X. Zhang, Y. Luo, and X. She, “Techno-economic analyses of multi-functional liquid air energy storage for power generation, oxygen production and heating,” *Appl. Energy*, vol. 275, p. 115392, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applenergy.2020.115392>.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115392>.

- [8] K. Wang, J. Sun, and P. Song, “Experimental study of cryogenic liquid turbine expander with closed-loop liquefied nitrogen system,” *Cryogenics (Guildf)*, vol. 67, pp. 4–14, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2015.01.004>.
- [9] T. Cummings, R. Adamson, A. Sugden, and M. J. Willis, “Retrospective and predictive optimal scheduling of nitrogen liquefier units and the effect of renewable generation,” *Appl. Energy*, vol. 208, pp. 158–170, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.055>.
- [10] T. He and Y. Ju, “A novel conceptual design of parallel nitrogen expansion liquefaction process for small-scale LNG (liquefied natural gas) plant in skid-mount packages,” *Energy*, vol. 75, pp. 349–359, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.07.084>.
- [11] M. Guo *et al.*, “Inactivation of natural microflora and inoculated *Listeria innocua* on whole raw shrimp by ozonated water, antimicrobial coatings, and cryogenic freezing,” *Food Control*, vol. 34, no. 1, pp. 24–30, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2013.04.009>.
- [12] Adrian Rodríguez Gutiérrez, “Desarrollo de herramientas lean mediante simulación con Witness.,” Universidad de Valladolid, 2016.
- [13] A. C. CHIRINOS and T. Z. MEZA, “OBTENCIÓN DE METANO, ETANO Y PROPANO A PARTIR DEL GAS NATURAL, EMPLEANDO COLUMNAS ABSORBEDORAS, DESTILADORAS Y CONDENSADORAS Y UTILIZANDO UN SIMULADOR COMERCIAL,” UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA, 2014.
- [14] F. E. J. Diego and P. O. R. Ronald, “Propuestas de mejora del proceso productivo en la empresa Press Forja SA utilizando el software Flexsim Manufacturing como herramienta para la toma de decisiones,” Universidad Politécnica Salesiana, 2010.
- [15] L. A. L. E. Division, *Operating manual Air Separation Plant Guayaquil*. Munich, Germany, 2013.

