

ANÁLISIS ENERGÉTICO DE UNA PLANTA DE SEPARACIÓN DE AIRE Y CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE SEPARACION

PALMAY, Paul Gustavo ⁽¹⁾; MONTORO, José ⁽²⁾; BRUNO, Joan Carles ⁽¹⁾; CORONAS, Alberto ⁽¹⁾

juancarlos.bruno@urv.cat

⁽¹⁾Universidad Rovira i Virgili, Departamento de Ingeniería Mecánica, CREVER – Research Group on Applied Thermal Engineering, Avda. Paisos Catalans, 26, 43007 – Tarragona (España)

⁽²⁾Messer Iberica de Gases, Polígono Industrial del Morell, 43760 El Morell - Tarragona (España)

RESUMEN

La separación del aire para la producción de oxígeno, nitrógeno y argón se ha convertido en pieza clave para el proceso productivo de muchas industrias. Las Plantas de Separación de Aire (*ASU*, *Air Separation Unit*) separación requiere habitualmente del uso de procesos criogénicos que consumen una cantidad importante de energía eléctrica que siempre tiende a encarecer la operación de estas plantas y disminuir su viabilidad en países con costes energéticos elevados.

A continuación se presenta un análisis energético global y detallado básico de una planta de separación de aire para identificar y caracterizar el consumo energético necesario para el funcionamiento del proceso. Se estudiará inicialmente un proceso ideal de destilación dentro de la Cold Box (“caja fría” que contiene todos los equipos criogénicos y en la que tiene lugar la separación del aire en sus componentes); posteriormente se analizarán los factores que afectan al proceso tales como pérdidas de calor, eficiencia de los intercambiadores principales de entrada al sistema de destilación, eficiencia de la turbina (que ayuda a mantener en balance al sistema), producción de argón y oxígeno líquido, etc. Con los resultados obtenidos se establece una correspondencia entre las principales operaciones de la ASU y su afectación con el balance energético, con lo que se pueden analizar posibles mejoras para conseguir un ahorro energético en la operación de la planta. Para llevar a cabo todos estos análisis se ha empleado un simulador de procesos y el programa de modelado EES (Engineering Equation Solver).

Para las condiciones en que opera actualmente la planta unos 60000 Nm³/h de aire a tratar, el consumo del compresor principal se sitúa sobre los 4380 kW. Por lo tanto, el coste del consumo eléctrico es el principal criterio que se sigue para establecer la estrategia de operación de la planta de manera que su operación está estrechamente ligada a las variaciones del coste de la electricidad en cada periodo. El calor generado por el sistema de refrigeración del compresor principal se encuentra alrededor de los 60°C y podría utilizarse en una bomba de calor para obtener importantes cantidades de calor a utilizar en la propia planta, por ejemplo, para regenerar el material adsorbente del Molsieve o externamente, para el suministro de calor a una red de calefacción de distrito.

Los resultados obtenidos serán útiles para el diseño de futuras estrategias de ahorro energético, optimización de la operación de la planta y, en consecuencia, sus prestaciones técnicas y económicas con miras a un estudio de integración con otros procesos con la finalidad de diseñar sistemas de poligeneración de energía y productos finales.

Palabras clave: Unidad de separación de aire, modelización, ahorro energético.

1. Introducción y objetivos

La separación del aire para la producción de oxígeno, nitrógeno y argón se ha convertido en pieza clave en muchos procesos industriales debido a la importancia de sus constituyentes. Es por esto que a nivel mundial se han venido construyendo gran cantidad de plantas de separación de aire conocidas por su nombre en inglés como *ASU (Air Separation Unit)*.

El oxígeno obtenido por destilación del aire, se utiliza para muy diversos usos: en aplicaciones médicas, en la industria metalúrgica (para producción de acero y en soldadura), en la fabricación de cristales, en procesos químicos (producción de óxido de etileno, etilenglicol, etc), en el tratamiento de aguas residuales y como combustible en la industria aeroespacial. También puede emplearse en sistemas de oxy-combustión y en gasificación de diversos productos.

El nitrógeno se emplea en la industria química y petroquímica, y por su carácter inerte también en electrónica, industria metalúrgica y en aplicaciones médicas, y también como espumante (poliuretano). Como nitrógeno líquido se aplica también en medicina para conservación criogénica, y en la industria agroalimentaria para congelación rápida en diversos procesos. El Argón en la actualidad es un elemento muy utilizado en procesos de soldadura para crear atmósferas protectoras del metal, en industrias de aluminio y fundición en la desgasificación del aluminio fundido, para el desarrollo y crecimiento de cristales semiconductores en la industria electrónica y en iluminación (bombillas).

La industria de separación de los componentes del aire es una industria madura que fue estudiada y desarrollada inicialmente por Linde y Claude [1]. Existen varios tipos de plantas de separación de aire. El proceso de separación más importante es por destilación criogénica, aunque existen otros procesos no-criogénicos, como son la destilación con presión oscilante y la separación por membranas a diferentes temperaturas. Estos procesos son de aplicación en aquellos casos en que no se requieren grandes cantidades de gases y donde la pureza de estos no es un requisito primordial.

El proceso criogénico de separación de aire requiere un elevado consumo de energía destinado principalmente a la compresión del aire atmosférico de entrada a la planta. Se han propuesto diversas modificaciones en este proceso para reducir su consumo energético [2]. Todos estos estudios se han realizado siempre sobre condiciones nominales de operación.

El objetivo de este artículo es presentar el análisis energético de este tipo de procesos criogénicos para separación de aire en distintas condiciones de operación que permitan poder evaluar técnicas de reducción del consumo energético en base a condiciones reales de operación y no únicamente sobre las condiciones de diseño de la planta. Se han analizado varios escenarios de operación de la planta para poder obtener datos donde se pueda implementar planes de ahorro de energía.

2. Descripción de la unidad de separación de aire

Los componentes del aire y su complejidad hace necesaria su separación mediante una destilación fraccionada, en la que se toma como principal ventaja los diferentes puntos de ebullición del nitrógeno, oxígeno y argón (Tabla 1). En esta sección se hace una breve descripción del funcionamiento de la planta ASU analizada siguiendo el diagrama de bloques mostrado en la figura 1.

Tabla 1. Composición del aire y puntos de ebullición de sus componentes a presión atmosférica

ELEMENTO	COMPOSICION EN AIRE SECO (%)	PUNTO DE EBULLICION (°C)
NITROGENO	78,125	-196
OXIGENO	20,95	-183
ARGON	0,925	-186

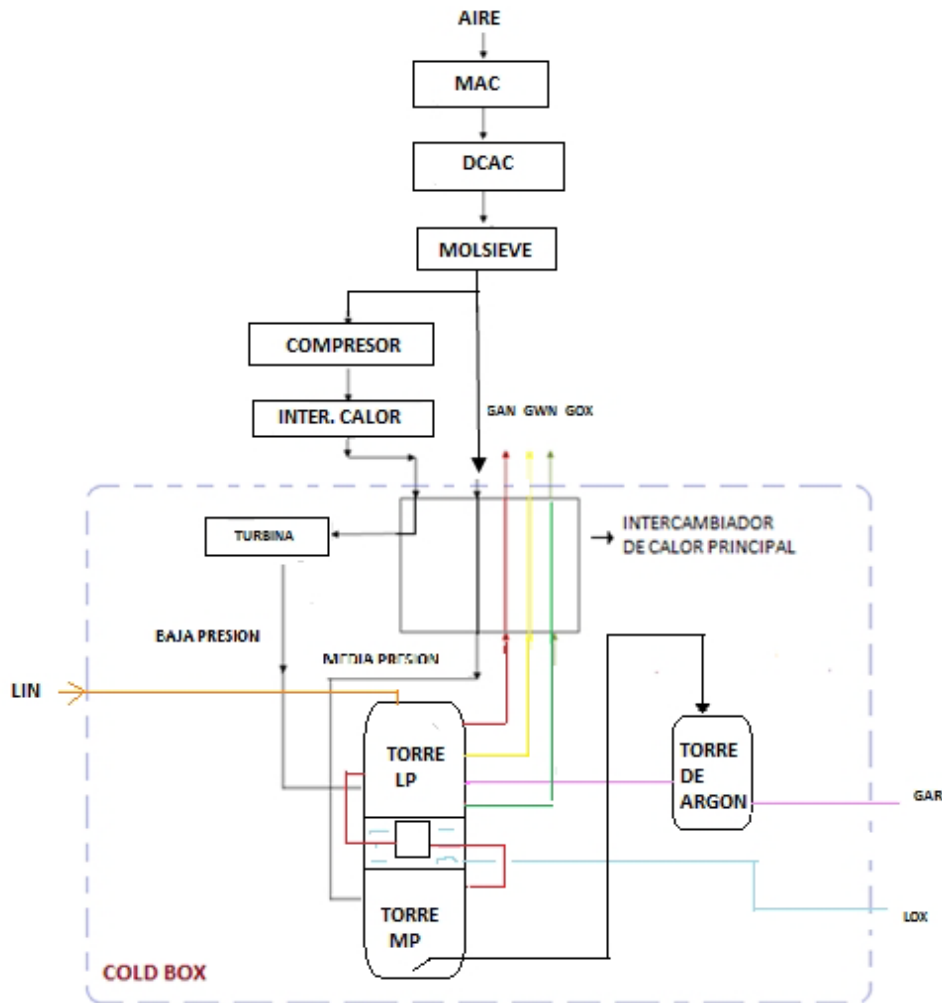


Figura 1. Diagrama de bloques de la ASU.

El flujo de alimentación a condiciones atmosféricas entra a la planta a través de un filtro en el cual se eliminan todas las impurezas presentes a fin de proteger a las unidades de compresión y en general, a todos los dispositivos dentro del sistema. A continuación el aire se comprime en un turbocompresor (*MAC*, Main Air Compressor) de cuatro etapas con refrigeración intermedia entre cada una de ellas. A la salida del *MAC*, el aire se encuentra a una presión cercana a los 5 bares, una temperatura de unos 70°C y una humedad relativa muy alta. Seguidamente el flujo de aire entra en un enfriador con agua, denominado *DCAC* (Direct Contact After Cooler) en el cual mediante aspersión de agua el aire se enfría para salir a una temperatura cercana a los 10°C y prácticamente saturado. En este sistema de enfriamiento aire/agua se aprovecha además la baja temperatura de la corriente de nitrógeno residual (*GWN*) para preenfriar el agua de enfriamiento que se utiliza en el *DCAC*.

Con el objetivo de eliminar la humedad del aire y al mismo tiempo eliminar cualquier traza de CO₂ e hidrocarburos presentes en el aire, se emplea un tamiz molecular (Molecular Sieve), que consiste en un material adsorbente, que por su porosidad retendrá en su totalidad la humedad presente y las trazas de compuestos como CO₂ e hidrocarburos. Existen dos unidades de tamiz molecular de manera que una de ellas se encuentra en servicio mientras la otra se regenera. Esta regeneración se consigue disminuyendo la presión y aprovechando nitrógeno residual (*GWN*) que se hace fluir en contracorriente. A la salida de este dispositivo el aire sale prácticamente a la misma presión y una temperatura de unos 20 °C.

Posteriormente el aire seco entra a un intercambiador de tipo multiflujo ("Brazeed Aluminium") en el cual se consigue llegar a temperaturas criogénicas gracias al intercambio de calor con los productos de salida de las columnas de destilación. A su vez, los gases de salida del proceso de destilación se calientan hasta casi temperatura ambiente y mediante compresores, que servirán para alcanzar presiones adecuadas, ser enviados a los clientes a través de gaseoductos instalados para este fin.

Posteriormente, la corriente de aire se divide en dos corrientes, una de ellas (un 10% del caudal total) pasa por un compresor donde aumenta su presión hasta unos 9 bares y posteriormente, una vez enfriada, pasa por una turbina que permite accionar el compresor anterior montado en el mismo eje. Este flujo de aire correspondiente al 10% del caudal total será la alimentación de la columna de baja presión (LP, 0,31 barg), mientras que la otra línea (90%) será el flujo de entrada de la columna de media presión (MP, 4,11 barg).

Las dos columnas están conectadas a través de un condensador/reboiler. El reboiler de la columna LP actúa como condensador de la columna MP. Como el nitrógeno es más volátil que el oxígeno (Tabla 1), el vapor ascendente cada vez se va enriqueciendo más en nitrógeno mientras que el líquido descendente adquiere mayor pureza de oxígeno. El líquido rico en oxígeno almacenado en el fondo de la MP alimenta a la LP tras expandirse en una válvula (JT). El destilado obtenido en la cabeza de la columna MP es GAN (Nitrógeno gaseoso) de gran pureza que sirve como reflujo en el fondo de la columna LP, lugar donde el LOX (Oxígeno líquido) en ebullición, hace que el nitrógeno licúe y, a su vez, el oxígeno pase a estado gaseoso. Por la cabeza de la columna LP se alimenta LIN (Nitrógeno líquido) procedente del tanque de almacenaje. Esto permite obtener el frío necesario para licuar el oxígeno del aire. De la columna LP se obtienen tres productos como flujos gaseosos. El flujo de cabeza de columna es GAN de gran pureza, mientras que en el fondo de columna se obtiene GOX (Oxígeno gaseoso) de alta pureza. El tercer flujo se extrae a mitad de la columna LP, y se trata de una corriente rica en oxígeno de donde, posteriormente se separa el argón. Del fondo de la columna LP también se obtiene LOX.

De la columna de baja presión se extrae una corriente formada por Nitrógeno/Oxígeno/Argón (mayoritariamente argón) que se envía hacia un sistema de columnas de separación y purificación destinadas a la obtención de argón líquido (LAR) de alta pureza. El proceso se inicia con la separación del oxígeno en una primera columna donde se obtiene Argón con una concentración de oxígeno de ± 15 ppm O_2 y cierta concentración de nitrógeno residual (GAN), el mismo que se separa en una segunda columna, en la cual el nitrógeno se eliminara al vaporizarlo, eliminándolo por cabeza de columna.

A todo este conjunto de operaciones que trabajan a temperaturas criogénicas se lo conoce como *Cold Box* de la cual se obtienen como productos los componentes del aire GAN, GOX, LAR, LOX y GWN. Como puede verse, en este proceso el nitrógeno solo se obtiene en estado gaseoso. Para obtener nitrógeno líquido es necesario bajar su temperatura mediante un proceso llamado licuefacción. Para ello se utilizan dos turbocompresores de 2 y 4 etapas, hasta alcanzar una presión de 28 bares. La refrigeración requerida se genera a dos niveles, expandiendo el nitrógeno de alta presión por debajo de la presión del compresor de reciclo y con un intercambiador de calor donde se aprovecha por un lado el frío criogénico y por otro lado se calienta cierta cantidad de gas. Se dispone de dos compresores asociados a sus correspondientes turbinas. La corriente resultante de los compresores, es el punto donde se alcanza mayor presión en la planta, unos 54 bar-a. El intercambiador acaba de enfriar el nitrógeno hasta una temperatura de $-192^{\circ}C$ para licuarlo y poder almacenarlo en el tanque.

3. Condiciones de operación

Para analizar el comportamiento de la planta en condiciones de operación rutinarias o normales, se registraron datos de operación en estado estacionario durante periodos de tiempo significativos. La planta se ha analizado para un caudal de entrada de $62000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ de aire ambiente. Sin embargo, hay que tener en cuenta también que la variación del consumo energético dependerá no solo de los niveles de carga de la planta sino también de condiciones ambientales como son la temperatura ambiente y la humedad relativa del aire que dependerá directamente de la estacionalidad a la cual nos encontremos o las condiciones meteorológicas du muestreo.

Las condiciones de operación para este estudio para el pretratamiento del aire se muestran en la tabla 2, y en la tabla 3, se indican las condiciones de operación consideradas para el análisis de la *Cold Box* que incluye las columnas de destilación, el intercambiador de calor multicorriente y un sistema de recuperación de energía mecánica mediante una turbina. En esta tabla solamente se indican las condiciones de entrada y salida de la Cold Box no las corrientes internas que no se requieren si no se desea realizar un análisis de la eficiencia de las columnas de destilación en la separación de los distintos componentes. En la tabla 4 se indican las condiciones de operación del compresor principal de entrada a la planta.

Tabla 2. Condiciones de Operación entrada a la ASU.

OPERACIÓN			Flujo de entrada (Nm ³ /h)
COMPRESOR	Entrada	Temperatura (°C)	9,9
		Presión (bar)	0,99
	Salida	Temperatura (°C)	62,1
		Presión (bar)	4,48
DCAC	Entrada	Temperatura (°C)	62,1
		Presión (bar)	4,48
	Salida	Temperatura (°C)	10
		Presión (bar)	4,5
MOLSIEVE	Entrada	Temperatura (°C)	10
		Presión (bar)	4,5
	Salida	Temperatura (°C)	15
		Presión (bar)	4,3

Tabla 3. Condiciones de operación en la *Cold Box*.

ENTRADAS			
AIRE DE ENTRADA	AIRE 1	Temperatura (°C)	15
		Presión (bar)	4,3
		Flujo volumétrico (Nm ³ /h)	54821
		Flujo másico (kg/s)	19,66
	AIRE 2	Temperatura (°C)	14
		Presión (bar)	7,68
		Flujo volumétrico (Nm ³ /h)	6936
		Flujo másico (kg/s)	2,487
SALIDAS			
NITROGENO	GASEOSO (GAN)	Temperatura (°C)	15
		Presión (bar)	0,14
		Flujo volumétrico (Nm ³ /h)	25392
		Flujo másico (kg/s)	8,817
	IMPURO (GWN)	Temperatura (°C)	13
		Presión (bar)	0,16
		Flujo volumétrico (Nm ³ /h)	24975
		Flujo másico (kg/s)	8,671
OXIGENO	GASEOSO (GOX)	Temperatura (°C)	11
		Presión (bar)	0,18
		Flujo volumétrico (Nm ³ /h)	25392
		Flujo másico (kg/s)	8,817
	LIQUIDO (LOX)	Temperatura (°C)	-182
		Presión (bar)	5,1
		Flujo volumétrico (Nm ³ /h)	1890
		Flujo másico (kg/s)	0,7503
ARGON	LIQUIDO (LAR)	Temperatura (°C)	-180
		Presión (bar)	1
		Flujo volumétrico (Nm ³ /h)	456
		Flujo másico (kg/s)	0,2261

Tabla 4. Condiciones de operación en el turbocompresor principal de entrada a la planta.

Etapas de compresión			
Primera	Entrada	Temperatura (°C)	9,9
		Presión (bar)	0,99
	Salida	Temperatura (°C)	64,4
		Presión (bar)	1,29
Segunda	Entrada	Temperatura (°C)	18,3
		Presión (bar)	1,29
	Salida	Temperatura (°C)	66,9
		Presión (bar)	2,14
Tercera	Entrada	Temperatura (°C)	18,4
		Presión (bar)	2,14
	Salida	Temperatura (°C)	67,5
		Presión (bar)	3,64
Cuarta	Entrada	Temperatura (°C)	17,8
		Presión (bar)	3,64
	Salida	Temperatura (°C)	62,1
		Presión (bar)	4,48

4. Resultados

Para calcular el balance general de energía de la ASU se ha utilizado el programa de modelado EES (Engineering Equation Solver) [3]. La potencia necesaria en el compresor principal para cada etapa, así como el calor a disipar entre etapas se muestra en las tablas 5 y 6, respectivamente. Por lo tanto, para las condiciones de carga analizadas el consumo de energía en el compresor es de 0,0706 kW/Nm³ de aire.

En la figura 2 se muestra el efecto de la temperatura ambiente sobre la potencia consumida por el compresor. Al aumentar la temperatura el caudal másico a través del compresor disminuye, disminuyendo también la potencia requerida a expensas de una menor producción en la planta.

También se ha realizado un balance general de energía en la *Cold Box* para determinar las pérdidas de energía de este sistema que son de unos 39 kW (Tabla 7). Aunque cabe señalar que esta cantidad incluye la propia incertidumbre en las mediciones realizadas. La turbina de recuperación de potencia del interior de la *Cold Box* produce 152 kW que se emplean para accionar un compresor que alimenta a la columna de baja presión. El rendimiento global de este sistema de turbocompresión es de un 79% (Tabla 6).

Tabla 5. Consumo de potencia por etapa en el compresor MAC.

ETAPAS COMPRESION	
Primera	1214 kW
Segunda	1083 kW
Tercera	1096 kW
Cuarta	987 kW

Tabla 6. Calor cedido por etapa de interenfriamiento (MAC).

ETAPAS COMPRESION	
Primera	1027 kW
Segunda	1080 kW
Tercera	1109 kW

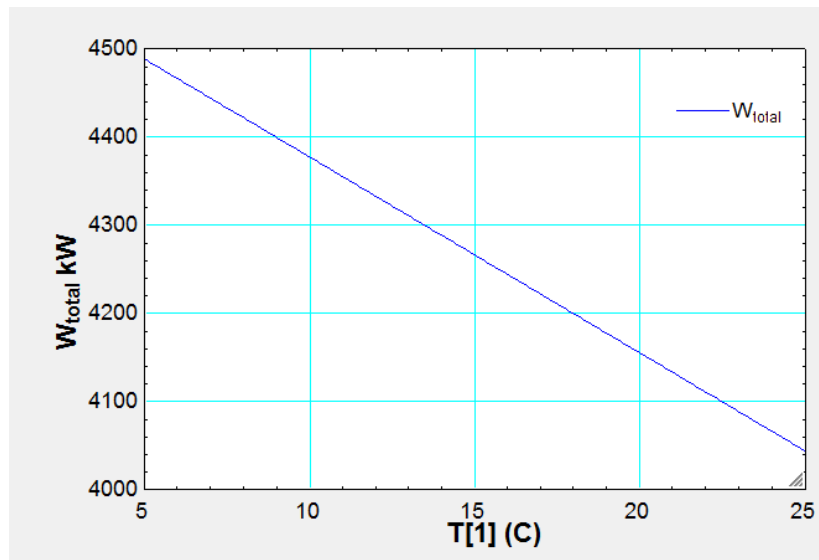


Figura 2. Variación del trabajo consumido en el MAC en función de la temperatura de entrada.

Tabla 7. Balance de energía en la *Cold Box*.

Energía de Flujo de entrada (kW)	4855
Energía de flujo de salida (kW)	4816
Diferencia (kW)	39
Ratio de flujo a la Turbina (%)	11
Potencia de la turbina (kW)	152
Potencia del compresor (kW)	120

Los resultados obtenidos permiten tener una idea clara de los consumos y prestaciones de la planta y también identificar algunas opciones tecnológicas para mejorar la eficiencia energética de la planta. Las principales fuentes de calor que pueden aprovecharse para generar energía eléctrica o térmica en la planta es el sistema de refrigeración del compresor principal (MAC) y el enfriamiento del propio aire antes de entrar en la “Cold box”. Este calor se podría aprovechar en distintos sistemas para generar energía eléctrica o calor para sustituir a las resistencias eléctricas utilizadas para regenerar el Molsieve en el que se requiere calentar nitrógeno a unos 100°C. Las tecnologías que pueden utilizarse para este segundo caso pueden ser una bomba de calor por compresión o un transformador de calor por absorción. La generación de energía eléctrica es mucho menos interesante debido a la baja temperatura del calor disponible. Otra posible opción energética a estudiar consiste en la integración de una planta de cogeneración que suministre la energía mecánica necesaria en el MAC y a la vez el calor necesario para la regeneración del Molsieve.

5. Conclusiones

Con este trabajo se ha iniciado el estudio de una planta de separación de aire para determinar la influencia del nivel de carga y de las condiciones ambientales sobre el consumo energético de la planta. Para las condiciones en que opera actualmente la planta unos 60000 Nm³/h de aire a tratar, el consumo del compresor principal se sitúa sobre los 4380 kW. Por lo tanto, el coste del consumo eléctrico es el principal criterio que se sigue para establecer la estrategia de operación de la planta de manera que su operación está estrechamente ligada a las variaciones del coste de la electricidad en cada periodo. El calor generado por el sistema de refrigeración del compresor principal se encuentra alrededor de los 60°C y podría utilizarse en una bomba de calor para obtener importantes cantidades de calor a utilizar en la propia planta, por ejemplo, para regenerar el material adsorbente del Molsieve o externamente, para el suministro de calor a una red de calefacción de distrito.

Los resultados obtenidos en este proyecto serán útiles para el diseño de futuras estrategias de ahorro energético, optimización de la operación de la planta y, en consecuencia, sus prestaciones técnicas y económicas y el estudio de procesos de integración con otros procesos (poligeneración).

6. Agradecimientos

Los autores agradecen a Messer Iberica de Gases la ayuda facilitada sin la que no habría sido posible la realización del presente trabajo.

7. Referencias

- [1] KERRY, F. *Industrial Gas Handbook: Gas Separation and Purification*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2007.
- [2] ANEKE M., WANG, M. *Potential for Improving the Energy Efficiency of Cryogenic Air Separation Unit (ASU) using Binary Heat Recovery Cycles*, Applied Thermal Engineering, 81, 223-231, 2015.
- [3] Engineering Equation Solver: <http://www.fchart.com/ees>