

PROPUESTA DE UN SEPARADOR MAGNÉTICO PARA OBTENER OXÍGENO LÍQUIDO DEL AIRE CRIOGÉNICO

PROPOSAL OF A MAGNETIC SEPARATOR TO OBTAIN LIQUID OXYGEN FROM CRYOGENIC AIR

Brian Jesús Torres Briones¹, Christian André Zavala Rivera², Luis Fernando Flores Vega³, Alex Calla Lipa⁴, Nelson Díaz Leyva⁵, Lizandro Rosales Puño⁶

¹²³⁴Universidad Nacional del Callao, Facultad de Ingeniería Mecánica, Av. Juan Pablo II 306, Bellavista, Lima, Perú, brianjtorresb@gmail.com, Andrezavalarivera@gmail.com, luisfernandofloresvega98@gmail.com, alexcalla8@gmail.com

RESUMEN

La actual pandemia viene ocasionando estragos a nivel nacional e internacional, elevando la demanda y la producción de oxígeno medicinal. Por lo cual nuestro objetivo propone una nueva alternativa para la generación de oxígeno líquido. Los procesos criogénicos demandan un alto consumo de electricidad, donde una pequeña mejora de la eficiencia o los rendimientos de los procesos puede tener un impacto financiero sustancial, lo que deriva en mejorar la rentabilidad de una mayor producción de oxígeno y así cubrir la necesidad en salud. En respuesta a la necesidad social y tecnológica, se propone la siguiente técnica de generación de oxígeno usando campos electromagnéticos en una unidad separadora de aire criogénico. En la cual el aire en estado líquido entrará a una ramificación de tuberías separadoras en donde por acción del campo generado por los solenoides se desviará el oxígeno, esto con el fin de aprovechar la propiedad paramagnética del oxígeno líquido y lograr separar el oxígeno de la mezcla de gases en estado líquido. Dado que el oxígeno líquido tiene la susceptibilidad paramagnética más fuerte de los fluidos puros. Paradicho propósito desarrollaremos un cálculo y una animación en software del sistema separador.

Palabras clave: Electromagnetismo, oxígeno líquido, criogénico, paramagnetismo.

ABSTRACT

The current pandemic is wreaking havoc nationally and internationally, increasing the demand and production of medical oxygen. Therefore, our objective is to propose a new alternative for the generation of liquid oxygen. Cryogenic processes demand a high consumption of electricity, where a small improvement in the efficiency or performance of the processes can have a substantial financial impact, resulting in improving the profitability of increased oxygen production and thus meet the need in health. In response to the social and technological need, the following oxygen generation technique using electromagnetic fields in a cryogenic air separator unit is proposed. In which the liquid air will enter a branch of separator pipes where the field generated by the solenoids will divert the oxygen, in order to take advantage of the paramagnetic property of liquid oxygen and separate the oxygen from the gas mixture in liquid state. Since liquid oxygen has the strongest paramagnetic susceptibility of the pure fluids. For that purpose we will develop a calculation and software simulation of the complex.

Keywords: Electromagnetism, liquid oxygen, cryogenic, paramagnetism.

*Autor para correspondencia: brianjtorresb@gmail.com





INTRODUCCIÓN

SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

Desde que inició del año 2020, el mundo viene atravesando una situación desconcertante ocasionada por el brote del coronavirus SARS-CoV-2 que produce la tan conocida enfermedad COVID-19 (Arismendi 1990), generando consecuencias graves, donde una de las principales causas de pérdidas humanas es por falta de oxígeno, por tal motivo buscamos una solución para evitar que se incrementen las defunciones proponiendo un sistema de generación de oxígeno líquido mediante separación magnética a partir de un proceso criogénico del aire todo esto mediante un proceso de separación simplificado y económico que esté al alcance de toda la población en general (Alejos 2013).

Se desea brindar una nueva tecnología de separación para obtener oxígeno usando campos magnéticos en el aire criogénico, como una alternativa nueva frente a la separación por absorción y destilación, las cuales llegan a usar mucha energía para su cometido de separación, frente a nuestro diseño el cual aprovecha un mínimo caudal de funcionamiento, proveniente de un complejo criogénico por lo que no existe gasto energético (Gonzalez 2012).

Además, este trabajo de investigación nos permite asumir retos de creatividad, análisis, experiencias investigativas bajo argumentos hipotéticos y dimensionalmente correctos para lograr los

objetivos en nuestro trabajo de investigación, con el fin de que los resultados obtenidos en cada una de sus etapas y a través de su sistematización impacten y sean base de nuevos estudios o desarrollos, lo que lograra contribuir con más contenido científico y/o tecnológico que nos permitan avanzar en bienestar de la sociedad y del país (Shames 2012).

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

PROBLEMA GENERAL

- ¿Cómo realizar el diseño de un sistema separador de oxígeno a partir de aire líquido usando campos magnéticos?

PROBLEMAS ESPECÍFICOS

- ¿Qué caudal se obtiene del sistema separador de oxígeno?
- ¿Cuál es la caída de presión que se genera en el sistema separador de oxígeno?
- ¿Qué tipo de régimen de flujo será necesario para el correcto funcionamiento del sistema separador de oxígeno?

OBJETIVOS OBJETIVO GENERAL

- Realizar el diseño de un sistema separador de oxígeno a partir de aire líquido usando campos magnéticos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar el caudal que se obtiene del sistema separador de oxígeno.

- Determinar la caída de presión que se produce en el sistema separador de oxígeno.
- Determinar el tipo de régimen de flujo que será necesario para el correcto funcionamiento del sistema separador de oxígeno.

MÉTODOS

El separador empleará campos magnéticos y las geométricas necesarias, tanto en forma como dimensiones, para formar las dos fases inmiscibles; una de oxígeno y la otra del resto de moléculas y lograr la separación del oxígeno de la mezcla del aire en la sección de separación.

Para el desarrollo de nuestro separador magnético, se considera que el aire criogénico será un fluido newtoniano el cual este sujeto a las leyes y ecuaciones de la mecánica de fluidos clásica.

Entonces, considerando que el fluido circula en régimen laminar con el fin de evitar que las turbulencias deformen las fases ya logradas dentro de la sección cuadrada.

Usaremos aire criogénico, con las siguientes propiedades físicas.

$$T = -194^{\circ}\text{C}; P = 1.01 \text{ bar}$$

$$\mu = 15 \cdot 10^{-5} \text{ Pa.s}; \rho = 876.2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Tenemos el número de Reynolds el cual se define como la relación entre las fuerzas inerciales y

fuerzas viscosas. El número máximo de Reynolds es de 2100, el cual usaremos para definir el diámetro hidráulico en nuestro caso sección cuadrada y velocidad de flujo, priorizando un valor entero para el lado de la sección.

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \dots (1)$$

Área de sección de separación será definida, considerando extraer el 20% de oxígeno de la mezcla de aire, si bien es cierto el porcentaje es del 21% se desea asegurar la máxima pureza en el volumen de extracción de oxígeno. Como se va a extraer 20% de la mezcla líquida entonces definiremos el espesor b de la lámina de oxígeno líquido, manteniendo fijo el lado de L , de la siguiente manera:

$$\text{Area separación} = A_{sO_2} = 20\% A_s \dots (2)$$

Para determinar el campo magnético necesario, se usará la siguiente expresión de manera general:

$$B_T = B_1 + B_2 \dots (3)$$

El primer campo B_1 , lo determinaremos en relación el esfuerzo de corte generada por la viscosidad del oxígeno líquido y densidad de energía magnética.

Tenemos la ley de viscosidad de newton

$$\tau = \mu \left(\frac{dv}{dy} \right) = \mu \frac{\Delta v}{\Delta y} = \mu \frac{v}{e} \dots (4)$$

Donde

$r = \text{esfuerzo de corte}$

$\mu = \text{viscosidad dinamica}$

$v = \text{velocidad de flujo}$

$e = \text{espesor de capa de oxigeno}$

Luego tenemos la presión magnetostática que

ejercen el campo magnético y la permeabilidad magnética del oxígeno sobre el flujo de oxígeno

la cual la relacionaremos con la densidad de energía magnética.

$$\rho_{mg} = \frac{B^2}{2\mu_0} \dots (5)$$

Donde

$\rho_{mg} = \text{densidad de energia magnetica}$

$B = \text{campo magnetico}$

$\mu_0 = \text{permeabilidad magnetica}$

Permeabilidad es la capacidad de los materiales a ser afectados por los campos magnéticos y la susceptibilidad magnética es una constante, para nuestro caso el del oxígeno líquido es adimensional y el cual nos indica el grado de sensibilidad a la magnetización.

$$\mu_0 = 1.26 * 10^{-6}$$

El segundo campo B_2 lo determinaremos equilibrando la reacción que genera el flujo de oxígeno en la curvatura de la sección circular del separador magnético y la fuerza magnética que genera los campos hacia el flujo de oxígeno líquido, ya que este es el único flujo

paramagnético, en este nivel usaremos la ecuación de la fuerza magnética que es igual a la intensidad de corriente, la velocidad de flujo y el campo magnético. En donde hallaremos una corriente equivalente que genera el transporte de oxígeno líquido para lograr aprovechar el magnetón de Bohr, en dicha equivalencia.

$$R = I_{eq} L B_2 \dots (6)$$

El magnetón de Bohr

$$\mu_B = 9.27 * 10^{-24} \frac{J}{T} \approx A * m^2$$

Entonces la corriente equivalente la definimos de la siguiente forma

$$I_{eq} = \mu_B \frac{\# \text{moleculas de oxigeno}}{ASO_2}$$

$$\# \text{ moles} = \frac{mt}{PM}; \rho = \frac{mt}{V};$$

$$mt = \rho * V; V = ASO_2 * L$$

$$ASO_2 = l * b; L = \pi * R$$

Obtenemos la siguiente expresión, para la corriente equivalente:

$$I_{eq} = \mu_B \frac{\left(\frac{\rho_{O_2} L b \pi R}{PM_{O_2}} \right) \text{Navogrado}}{ASO_2} \dots (7)$$

Determinamos la reacción por conservación de la masa y cantidad de movimiento

Para la componente horizontal

$$\sum F_X = \int V_X * (\rho * V * A) dA$$

$$\text{Obtenemos } R_X = \rho_{O_2} * V^2 * A * \sin(\theta)$$

Para la componente vertical

$$\sum F_y = \oint V_y (\rho V A) dA$$

Obtenemos $R_y = \rho_0 2 * V^2 * A * (\cos(\theta) - 1)$

Finalmente, la resultante de la reacción

$$R = \rho_{02} * v^2 * A * \sqrt{2 - 2\cos(\theta)} \dots (8)$$

La reacción viene a ser igual a la fuerza centrífuga que experimental el oxígeno líquido en la curvatura del separador magnético.

Para el dimensionamiento de radio del separador magnético usaremos la siguiente expresión.

$$c = \frac{1}{R} \dots (9)$$

La cual relaciona la curvatura de una ecuación cuadrática con el radio de la circunferencia en un punto de tangencia, sabemos que los flujos laminares se rigen bajo perfiles parabólicos, por lo que determinaremos el perfil de velocidades a fin de relacionarlo con la circunferencia del separador y determinar su radio.

Luego, tenemos la expresión general del perfil de velocidades

$$U_y = ky^2 \dots (10)$$

Por geometría analítica sabemos

Forma general de la parábola

$$y^2 = 2px \dots (11)$$

La excentricidad de la parábola

$$e = \frac{c}{a} = \frac{p/2}{p/2} = 1$$

$$c = \frac{p}{2} \dots (12)$$

La relación entre el radio de la circunferencia y la curvatura de la parábola, viene dada por:

$$K = \frac{y''}{y'^3} = \frac{(1 + \frac{u \cdot y}{a \cdot x})^3}{\frac{a \cdot y'}{dx^2}}; \tan \alpha = \frac{dy}{dx}$$

Se relaciona el radio de la circunferencia con la curvatura de la parábola y obtenemos el radio de la circunferencia del separador

Para hallar el ángulo de tangencia partimos de la ecuación general de la parábola que se forma en la trayectoria del fluido, igualamos la ecuación de la circunferencia que se corta en el mismo punto para obtener el ángulo de tangencia, tenemos el siguiente sistema:

$$\begin{cases} y^2 = 2px \\ x^2 + y^2 = R^2 \end{cases}$$

De donde

$$\theta = \tan^{-1}(dx/dy) \dots (13)$$

Por último, para determinar de la diferencia de presiones y asegurar la entrada y salida del caudal, considerando como un fluido newtoniano. El aire líquido y el oxígeno líquido. Usaremos la ecuación general de Poiseuille, de donde deduciremos para una sección cuadrada.

De la forma general de la ecuación general,

reemplazamos de $\pi * R^2$ de la sección circular por l^2 para nuestra sección cuadrada

Luego:

$$Pl^2 - (P + \frac{\delta P}{\delta x} dx) l^2 - r 4l * dx = 0$$

Obtenemos

$$r = -\frac{\delta P}{\delta x} l$$

Sabemos que:

$$-\mu \frac{dv}{dx} = -\frac{\delta P}{\delta x} l \rightarrow l dP = \mu dv$$

Integramos de considerando posición inicial 1 y posición final 2

$$\int_1^2 dv = \int_1^2 \frac{l dP}{\mu}$$

Luego

$$v = -\frac{1}{2\mu} \frac{dP}{dx} (l^2 - l_0^2)$$

Ahora la parte para el caudal Q

$$Q = Vm * l_0^2 = \int_0^{l_0} v 4l dl$$

desarrollamos

$$Q = Vm * l_0^2 = \int_0^{l_0} -\frac{1}{2\mu} \frac{dP}{dx} (l_0^2 - l^2) 4l dl$$

$$Q = Vm * l_0^2 = -\frac{2}{\mu} \frac{dP}{dx} \left(\frac{l_0^4}{4} + \frac{l_0^4}{2} \right)$$

Obtenemos:

$$Q = -\frac{3}{\mu} \frac{dP}{dx} \left(\frac{l_0^4}{2} \right); \frac{dP}{dx} < \frac{\Delta P}{\Delta x}$$

Finalmente, nuestra ecuación de POISEUILLE para sección cuadrada:

$$Q = \frac{3\Delta P}{\mu \Delta x} l_0^4 \dots (14)$$

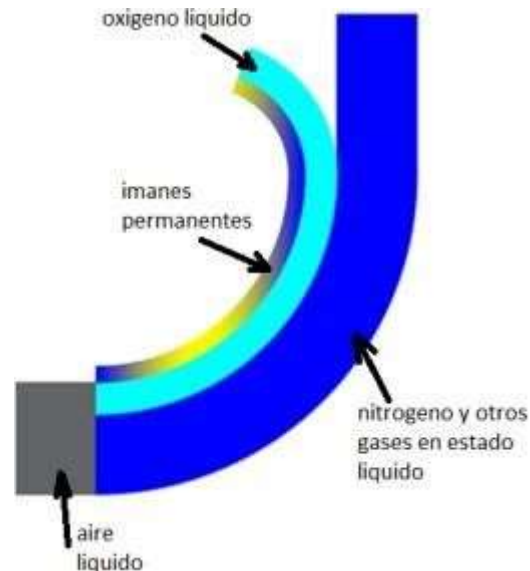
La cual usaremos para determinar la caída de presión entre la entrada al separador magnético y la salida o en el área de separación para el flujo de oxígeno.

Donde:

$$\Delta x = \pi * R \dots (15)$$

$$l_0 = \frac{2 * L * b}{L + b} \dots (16)$$

Entonces para lograr aprovechar todos los parámetros lo anterior y el paramagnetismo del oxígeno líquido usaremos como principio de diseño una bifurcación de la sección transversal a fin de separar las fases con un diseño final.



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para iniciar el dimensionamiento de nuestro separador magnético debemos definir la sección transversal cuadrada a trabajar tal como se definió en régimen laminar.

Reemplazando en la ecuación (1)

$$Re = \frac{876.2 * 0.01027 * 0.035}{15 * 10^{-5}} = 2099.96$$

< 2100

priorizando un valor entero para el lado de la sección cuadrada de la tubería del separador:

Obtenemos:

$$Lado\ de\ la\ seccion\ cuadrada\ (L) = 35\ mm$$

$$Velocidad\ de\ flujo\ (v) = 10.27\ \frac{mm}{s}$$

Luego, en reemplazando en (2)

$$Area\ de\ la\ bifurcación = 2 = 20\% \text{ As}$$

$$l * b = 0.2 * l * l$$

$$b = 0.2 * 0.035 = 0.007\ m \text{ } <> \text{ } 7\ mm$$

Por lo que estos 7 mm es el espesor de la capa de oxígeno que se generara por acción de campos magnéticos de los imanes permanentes. Y esta capa generara un esfuerzo de corte debido a la viscosidad del oxígeno líquido y la cual igualaremos a la densidad de energía magnética ya que son dimensionalmente iguales.

Determinamos el primer campo

Reemplazando, en la ecuación (4)

$$r = \frac{15 * 10^{-5} * 0.01027}{0.007} = 2.2 * 10^{-4}\ Pa$$

Igualando a la densidad de energía magnética, donde la permeabilidad para el oxígeno líquido es

$$\mu_{O2} = 1.26 * 10^{-6},$$

Luego, igualando (4) y (5)

$$2.2 * 10^{-4} = 2(1.26 * 10^{-6})$$

De donde obtenemos nuestro primer campo

$$B_1 = 2.35 * 10^{-5}\ T$$

Determinamos el segundo campo

De los datos obtenidos de velocidad e flujo y a una distancia de 4.9 mm con respecto a los imanes donde está el centroide de la parábola donde se desarrolla la velocidad promedio.

Obtenemos el perfil de velocidades, de la ecuación (10):

$$(y) = k * y^2$$

$$Vm = 10.27\ \frac{mm}{s}, y = 4.9\ mm$$

Reemplazamos

$$10.27 = k * 4.9^2 \rightarrow k = 0.427$$

Luego, nuestra función de perfil de velocidades:

$$U(y) = 0.427 * y^2$$

La ecuación hallada, la expresamos en forma de parábola, usando la ecuación (11)

$$y^2 = 2.342x$$

Despejamos

$$2p = 2.342 \rightarrow p = 1.171$$

En la curvatura, ecuación (12)

$$c = \frac{1.171}{\frac{0.58552}{2}}$$

Se relaciona el radio de la circunferencia con la curvatura de la parábola y obtenemos el radio de la circunferencia del separador, ecuación (9)

$$R = \frac{1}{c} = \frac{1}{0.5855} = 1.71 \text{ m}$$

Ahora hallamos el ángulo de tangencia

Sabiendo:

$$R = 1.71 \text{ m}$$

Despejando en la ecuación (13)

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{dx}{dy}\right)$$

$$\theta = \tan^{-1}(1.204) = 50.29^\circ$$

Ahora reemplazando, en la ecuación para el segundo campo, usando la ecuación (7) e igualando a la reacción del flujo:

$$\mu_B \frac{\left(\frac{\rho_{O_2} L b \pi R}{PM_{O_2} \text{ Navogrado}} \right) * L * B_2}{As_{O_2}} = \rho_{O_2} * v^2 * A * \sqrt{2 - 2\cos(\theta)}$$

Hallamos el segundo campo necesario

$$\begin{aligned} & 9.27 \cdot 10^{-24} * \\ & \left(\frac{1141 * 0.035 * 0.007 * \pi * 1.71}{0.032} * 6.022 * 10^{24} \right) \\ & * \pi * 1.71 * B_2 \\ & = 1141 * 0.01027^2 * 0.035 * 0.007 \\ & * \sqrt{2 - 2\cos(50.29)} \end{aligned}$$

Obteniendo el segundo campo

$$B_2 = 4.36 * 10^{-13} \text{ T}$$

Finalmente, el campo total mínimo necesario, ecuación (3)

$$\begin{aligned} B_t &= B_1 + B_2 = 2.35 * 10^{-5} \text{ T} + 4.36 * 10^{-13} \text{ T} \\ &= 0.0235 \text{ mT} \end{aligned}$$

Por último, determinamos la diferencia de presión entre la entrada y la salida en la semicircunferencia hasta el área de separación, usando la ecuación (15) y (16) en la ecuación (14)

$$I_o = \frac{2 * 0.035 * 0.007}{0.035 + 0.007} = 0.01167$$

reemplazando

$$\begin{aligned} & \frac{0.01027 * 0.035 * 0.007}{3 * \Delta P} = 0.01167^4 \\ & \Delta P = 0.036 \text{ Pa} \end{aligned}$$

Es la mínima presión para asegurar la entrada y salida del caudal, considerando al oxígeno líquido como un fluido newtoniano. Donde, según los resultados obtenidos del campo magnético, la diferencia de presiones y las dimensiones geométricas del separador magnético el modelo es factible.

La metodología científica aplicada o metodología para el desarrollo del estudio del caso, se basa en un enfoque cuantitativo, no experimental y dimensionalmente correcto a nivel descriptivo.

Finalmente mostramos las vistas del separador
Figura N°1 – Área de sección cuadrada

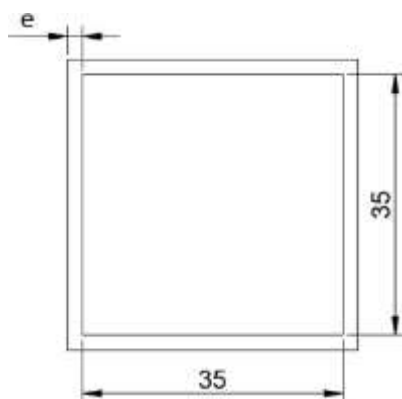


Figura 1. Área de sección cuadrada.

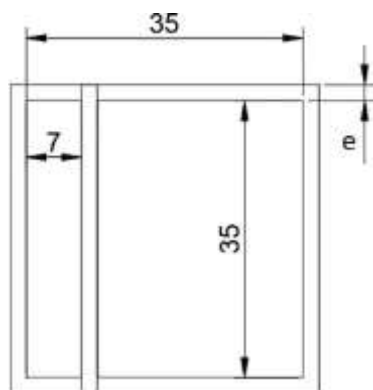


Figura 2. área de sección de separación.

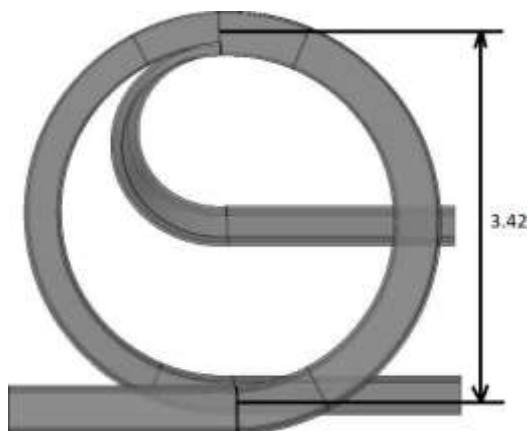


Figura 3. vista superior del separador.

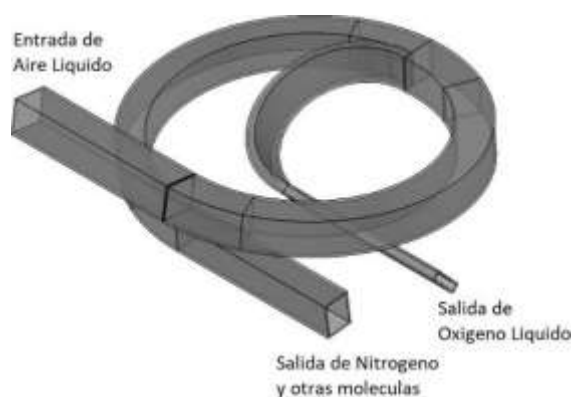


Figura 4. Vista Isométrica.

CONCLUSIONES

En la determinación del campo total se lograron hallar ambos campos el primer campo obtenido de la relación entre el esfuerzo de corte por la viscosidad dinámica y la densidad de energía magnética 2.35 mT y el segundo por equilibrio de la fuerza centrífuga con la fuerza magnética que genera el transporte de oxígeno es de $4.36 \cdot 10^{-13} \text{ T}$ por lo que concluimos que basta el primer campo para el funcionamiento del separador magnético. Esta técnica innovadora nos permite obtener un caudal $258 \times 10^{-2} \text{ L/s}$ que usado en una matriz con secciones en paralelo permite obtener mayores cantidades de oxígeno líquido de alta pureza según requerimiento de producción. La caída de presión obtenida es insignificante y que no representa pérdidas de carga significativa lo que asegura el flujo laminar en todo el recorrido del flujo de oxígeno. Finalmente se concluye que el flujo laminar es suficiente para asegurar el correcto funcionamiento del separador magnético.

RECOMENDACIONES

En el ámbito de la criogenia, toda instalación y equipos debe estar protegida con aislamientos térmicos que envuelvan el fluido frío. Podría usarse la perlita expandida o el papel de fibra de vidrio como aislamientos a emplear en la superficie del separador. Se deja aún la posibilidad de optimizar el flujo magnético con el método del arreglamiento de Halbach, la configuración de imanes permite obtener diferentes arreglos que aumenten la intensidad en dirección más conveniente, dicho método requiere una verificación mediante simulación con algoritmo numérico. Debido a la baja intensidad de campo magnético a necesitarse, se recomienda la implementación de prácticamente cualquier imán, haciendo un proyecto económicamente factible. Se recomienda utilizar

el cobre como elemento estructural para el separador ya que es muy utilizado en el campo de la criogenia y baja permeabilidad magnética y usando sus propiedades mecánicas se puede dimensionar el espesor que requiere el tubo de sección cuadrada del separador magnético de aire criogénico. Para elevar la productividad del separador magnético se puede sugerir apilar de manera vertical con el fin de obtener mayores caudales a obtenido por un solo separador. Finalmente, los experimentos de laboratorio deben verificar las predicciones teóricas sobre el comportamiento magneto hidrodinámico del oxígeno líquido.

CONFLICTO DE INTERÉS

El autor no tiene conflicto de interés de ninguna índole.

REFERENCIAS

- Alejos Z., Jorge L. 2013. “Texto: aplicaciones prácticas de la mecánica de fluidos incompresible”, Informe Final Resolución Rectoral N° 1081-2011- R <http://spanish.cryogenic-engineering.com/sale-11625743-equipos-criog-nico-criog-nico-de-la-planta-73000nm3-h-de-la-separaci-n-del-aire-del-separador-de-aire.html>
- Gonzalez P., Rogelio S. 2012. “Criogenia. Cálculo de equipos recipientes a presión” https://es.made-in-china.com/co_cyenergy/product_Air-Separation-Plant-Asu-Cryogenic-Tank-Container-Gas-Generator-Oxygen-Nitrogen-Generator_egigsyrog.html
- Shames H., Irving G. 2010. “Mecánica de Fluidos” <http://ck-gasequipment.com/1-cryogenic-air-separation-unit/166509/>
- Arismendi P. 1990. Bomba de oxígeno líquido <https://www.barber-nichols.com/products/pumps/cryogenic-pumps/liquid-oxygen-pumps/>

