



Diseño de un Equipo para Producir CO_2 Pelletizado de Alta Densidad

Jenner Christopher Moreira Carrasco ⁽¹⁾, Santiago José Coello Loor ⁽²⁾, Ernesto Martínez Lozano ⁽³⁾

Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción ⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾

Escuela Superior Politécnica del Litoral ⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾

Campus Gustavo Galindo km 30 vía Perimetral, Apartado 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador ⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾

jecmorei@espol.edu.ec ⁽¹⁾, sancoell@espol.edu.ec ⁽²⁾, emartine@gu.pro.ec

Resumen

El presente trabajo consiste en el diseño de un equipo que produce hielo seco pelletizado de 3mm de diámetro utilizando CO_2 líquido proveniente de un tanque refrigerado con capacidad de almacenamiento de 3.000 kg. El Iceblasting es un método de limpieza que emplea hielo seco más aire comprimido, para limpiar superficies, en reemplazo de los métodos tradicionales. Este método se utiliza para remover pintura, grasas, tintas en imprentas, residuos en general, entre otros. Se caracteriza especialmente por reducir el tiempo de limpieza y en reemplazar totalmente el uso de químicos tóxicos. Los autores de este artículo trabajan para una empresa que realiza éste método de limpieza. Para abastecerse de los pellets de hielo seco, la empresa utilizaba bloques de CO_2 , los cuales extruía por medio de un equipo (construido en la misma empresa), pero con la desventaja que era un proceso ineficiente y tenía inconvenientes en el abastecimiento de los bloques de hielo seco. Con este equipo se suplía la demanda de CO_2 pelletizado, se mejora la eficiencia del proceso hasta un 85%, y el costo de construcción no supera el 65% del valor de un equipo similar importado. Finalmente se presentan las conclusiones y las recomendaciones pertinentes.

Palabras Claves: Limpieza Criogénica, Dióxido de Carbono, hielo seco, Análisis Estático.

Abstract

This work involves the design of a machine that produces dry ice pelletizing 3mm diameter using liquid CO_2 from a refrigerated tank with storage capacity of 3.000 kg. The Iceblasting is a cleaning method that uses dry ice and compressed air for cleaning surfaces. This method is used to remove paint, grease, printing inks, and waste in general, among others. It is characterized especially by reducing cleaning time and completely replaces the use of toxic chemicals. The authors of this paper work for a company doing this cleaning method. To supply the dry ice pellets, the company used blocks of CO_2 , which extruded through a machine (built in the same company), but with the disadvantage that it was an inefficient process and had difficulties in providing the blocks dry ice. This equipment supplies pelletized CO_2 demand, improved process efficiency up to 85%, and the cost of construction does not exceed 65% of the value of similar imported equipment. Finally, we present the relevant conclusions and recommendations.

Key Words: Iceblasting, Carbon dioxide, Dry Ice, Static Analysis.

1. Caracterización del Proceso de Iceblasting.

La limpieza por chorro utiliza pequeñas partículas de algún material en específico, que son propulsadas por una corriente de aire, las cuales inciden sobre una superficie, eliminando así contaminantes gracias a la fuerza de impacto generada.

Entre las variedades existentes de medios de limpieza con chorro de aire a presión están los siguientes:

Sandblasting o Chorro de Arena. La limpieza con chorro de arena, es uno de los métodos más empleados, debido a la disponibilidad de la arena y su costo. Se lo utiliza en limpieza de cascos de barcos, estructuras metálicas, tuberías, taques, entre otros.

Sodablasting o Chorro de Bicarbonato. El método por chorro de bicarbonato de sodio, se lo aplica en remoción de pintura, en limpieza de cascos de barcos de fibra de vidrio, desengrase de motores y maquinaria, entre otros.

Granallado. El granallado consiste en la proyección de un chorro de granallas más aire comprimido. Asimismo existe granallado con turbina centrífuga.

El Iceblasting es un método para limpieza de superficies que no es abrasivo con el material base. Utiliza aire comprimido como agente transportador y CO₂ sólido (hielo seco) como agente agresor. Es importante conocer que existen dos tipos de limpieza criogénica; una utiliza pellets de hielo seco de 3mm. de diámetro y la otra, hielo seco granizado que sirve para aplicaciones más delicadas, pero el principio físico es el mismo en ambos casos.

En la Figura 1 se muestran los componentes necesarios para poder aplicar el Iceblasting, lo cual incluye; un compresor de aire, un contenedor térmico para almacenar el hielo seco, el equipo de limpieza criogénica, mangueras de caucho, boquilla y equipo de protección personal.



Figura 1. Instalación Típica de Iceblasting.

Aplicaciones.

Se pueden remover pinturas, lacas, adhesivos, depósitos de carbono y aceite, cera, residuos de

productos alimenticios, productos bituminosos, sedimentos plásticos, espuma, finas capas de óxido, entre otros.

Del mismo modo, objetos delicados como paneles de control u otros componentes eléctricos se pueden limpiar sin implicar daño alguno, siempre y cuando sea realizado por un técnico especializado y siguiendo las recomendaciones del caso.

Dado que el procedimiento no es abrasivo, se recomienda especialmente para la limpieza de todo tipo de moldes, cajas de machos, moldes de inyección, moldes de colada a presión, moldes de panadería, ornatos municipales, restauración de la madera y partes afectadas por el humo de un incendio, entre otros.

Entre las industrias que utilizan el método de limpieza Iceblasting están las: alimenticias y de bebidas, plásticas, gráficas, maderera, farmacéutica, eléctrica, metalúrgica, automotriz, aeroespacial, naviera, petrolera, entre otras.

En la Figura 2, se muestra un motor eléctrico de 100 hp, antes y después de aplicar la limpieza criogénica.



Figura 2. Aplicación de Iceblasting a un Motor Eléctrico.

En la Tabla 1 se puede apreciar que en la mayoría de los elementos, con el Iceblasting, el tiempo de duración de la limpieza es reducido en más de un 80% en comparación con los métodos tradicionales utilizados.

Tabla 1. Comparación de Sistemas de Limpieza en Diferentes Aplicaciones.

ELEMENTO	LIMPIEZA TRADICIONAL	ICEBLASTING
Motor Eléctrico 100 HP		
Horas de limpieza	8	1.5
Personas	1	1
Uso de tóxicos	Si	No
Nivel de limpieza	90%	95%
Costo Aproximado	\$50.00	\$180.00
Imprenta		
Horas de limpieza	14	4
Personas	2	1
Uso de tóxicos	Si	No
Nivel de limpieza	75%	90%
Costo Aproximado	\$60.00	\$700.00
Turbo Motor Diesel		
Horas de limpieza	5	0.25
Personas	1	1
Uso de tóxicos	Si	No
Nivel de limpieza	85%	95%
Costo Aproximado	\$20.00	\$45.00
Turbina a Gas		
Horas de limpieza	32	8
Personas	2	1
Uso de tóxicos	No	No
Nivel de limpieza	60%	90%
Costo Aproximado	\$250.00	\$1,200.00

Los pellets de CO₂ son similares a granos de arroz de 3 mm. de diámetro y se utilizan principalmente para la limpieza criogénica. Se ha vuelto común que los procesadores de alimentos usen los pellets para congelar la comida, a causa de su velocidad de sublimación. Su tamaño es de 3 mm y su densidad está próxima a 1560 kg/m³.

En la Figura 3 se puede observar que el hielo seco cuando es extruido, forma cilindros largos de hielo seco, los cuales se fracturan fácilmente para así formar los pellets.



Figura 3. Pellets de CO₂ de 3mm.

2. Caracterización del Problema y Alternativas de Solución.

Este proceso utiliza grandes cantidades de CO₂ sólido pelletizado, lo cual hace necesaria la existencia de una fuente estable para suplir la demanda y el oportuno despacho al menor costo posible.

La empresa que da el servicio de Iceblasting, actualmente compra el CO₂ en bloques de 5 y 25 kg; estos son cortados e ingresados en un molde de acero inoxidable, que con la ayuda de un cilindro hidráulica, lo extruye a través de una matriz con agujeros de 3 mm. de diámetro.

Actualmente se tiene dos proveedores de CO₂ en estado sólido, a los cuales se los llamará A y B: El proveedor A entrega el producto en bloques de 5 kg. a un precio conveniente, pero tiene muchos problemas operativos durante el año, por lo tanto el abastecimiento los 365 días del año no es confiable. El proveedor B entrega el producto en bloques de 25 kg., su costo es 20% mayor al del proveedor A pero tiene buena confiabilidad de abastecimiento durante todo el año.

El producir el hielo seco y extruirlo en un mismo proceso es la opción más indicada para resolver los inconvenientes actuales. Para esto se tienen dos alternativas:

(a) Importar un equipo que transforme el CO₂ líquido en CO₂ pelletizado, con capacidad de

producción aproximada de 100 kg. por hora, con un precio FOB cercano a los \$ 40.000 dólares.

(b) Diseñar y Construir un equipo que transforme el CO₂ líquido en CO₂ pelletizado, con capacidad de producción aproximada de 100 kg por hora.

En la Tabla 2 se puede observar los puntajes referentes a las alternativas de solución propuestas.

Tabla 2. Alternativas de Solución.

Atributo	FP	Alternativa a: Importar un equipo de producción de CO ₂ pelletizado		Alternativa b: Diseñar un equipo de producción de CO ₂ pelletizado	
		Calificación	Puntos	Calificación	Puntos
Costo de la inversión	60%	6	3.6	9	5.4
Eficiencia del equipo	15%	7	1.05	6	0.9
Problemas inherentes a la producción	15%	8	1.2	6	0.9
Calidad del producto	10%	9	0.9	8	0.8
Total	100%		6.75		8

3. Diseño de Equipo para Producir CO₂ Pelletizado.

El equipo a diseñar, es un productor y extrusor de hielo seco, con capacidad para producir 100 kg/hr. de pellets de 3 mm. de diámetro.

3.1. Diseño de Forma.

El equipo pelletizador se diseñará para que sea compacto, de tal forma que ocupe lo mínimo de espacio y que su forma, tamaño y diseño lo hagan fácil de transportar. Estará conformado por los siguientes elementos:

- Cámara de formación; que es donde se va a inyectar y a extruir el hielo seco.
- Conjunto matriz de extrusión; que son los moldes y dados de extrusión.
- Cilindro o pistón de compresión de nieve carbónica.
- Sistema hidráulico; el cual incluye una central hidráulica con un sistema de refrigeración de aceite enfriado por aire, un cilindro hidráulico y válvulas de control.
- Tensores; que son los que soportan las fuerzas de reacción generadas por el cilindro hidráulico.
- Válvula de estrangulación; que es quien estrangula el paso de CO₂ líquido para que se forme nieve carbónica en la cámara de formación.
- Sistema de control y PLC.

La Figura 4 muestra el diseño de forma.

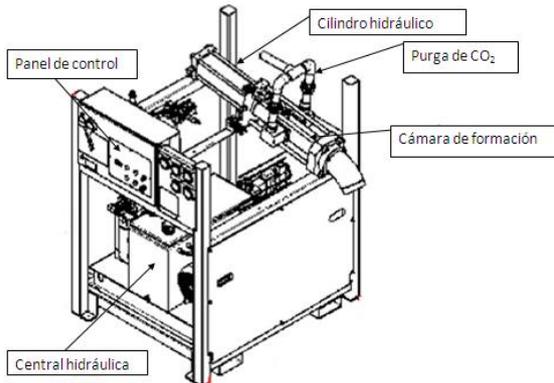


Figura 4. Diseño de Forma.

3.2. Diseño de la Matriz de Extrusión.

La matriz de extrusión será de forma circular, y constará básicamente de tres partes:

- Matriz primaria.
- Matriz secundaria.
- Placa soporte.

La matriz primaria tiene la función de cortar el hielo seco en diámetros de 3mm. y formar los pellets, mientras que la matriz secundaria le sirve a la matriz primaria de soporte y a la vez de guía para los pellets. La placa soporte sirve de tope y sujeción a la matriz secundaria.

La Figura 5 muestra las partes de la matriz de extrusión.

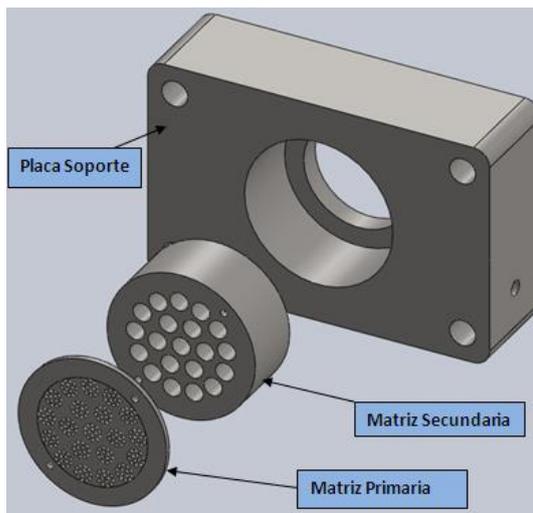


Figura 5. Matriz Primaria, Matriz Secundaria, Placa-Soporte.

El diseño del conjunto matriz de extrusión se lo realizó con la ayuda de la herramienta de simulación del programa SOLIDWORKS®. Se realizó un análisis estático del cual se obtuvo el esfuerzo de von Mises

máximo, como se muestra en la Figura 6. Con este esfuerzo se pudo hacer un análisis a fatiga, para así demostrar que este conjunto si resistía una presión de 49 MPa.

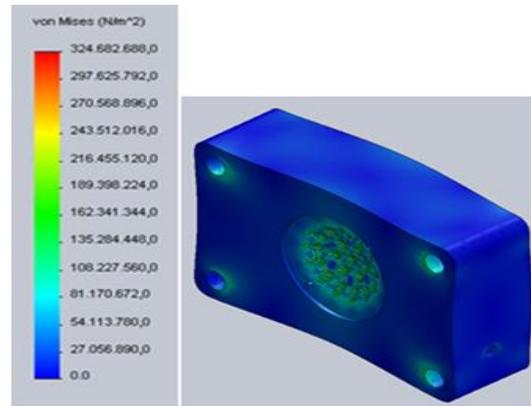


Figura 6. Representación del Esfuerzo de von Mises en el Conjunto de Extrusión, con una Escala de Deformación de 450x veces la Deformación Real.

3.3. Diseño de la Cámara de Formación.

La cámara de formación es donde se forma y se compacta la nieve carbónica, para luego ser extruida a través de la matriz de extrusión. Por lo general su forma es la de un cilindro y su fabricación es en acero inoxidable.

La cámara de formación tiene un orificio roscado por donde ingresa nieve carbónica. También consta de ventanas de desfogue, las cuales sirven para evacuar los vapores de CO₂, producto de la estrangulación y evitan que la presión en el interior de la cámara se incremente. En estas ventanas se encuentran unos filtros de malla, los cuales impiden que escape nieve carbónica de la cámara y permiten únicamente el paso de vapor de CO₂, como muestra la Figura 7.

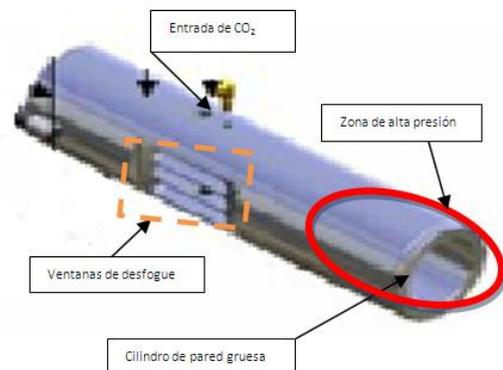


Figura 7. Cámara de Formación.

3.4. Diseño de cilindro de compresión de Nieve Carbónica.

El cilindro de compresión es el encargado de compactar y extruir la nieve carbónica. Es un pistón roscado al vástago del cilindro hidráulico que soporta una presión de hasta 49 MPa en su superficie frontal. Este cilindro tiene dos canales, tal como muestra la Figura 8 donde van colocados los sellos que se encargan de impedir el paso de nieve carbónica y de vapor de CO₂ a la parte posterior del cilindro.

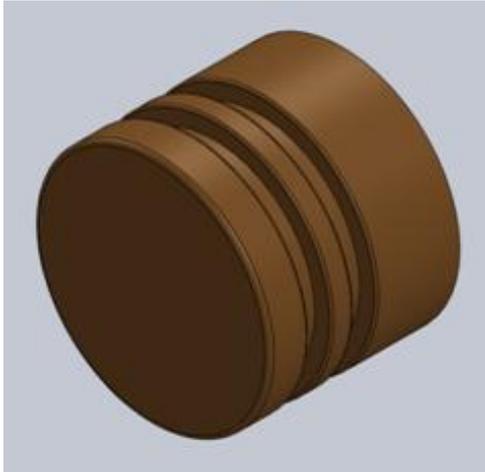


Figura 8. Cilindro de Compresión de Nieve Carbónica.

Se realizó un análisis estático utilizando SOLIDWORKS®, como muestra la Figura 9, de donde se obtuvo el esfuerzo de von Mises. Con dicho esfuerzo se hizo un análisis a fatiga, donde se demostró que esta pieza si resiste.

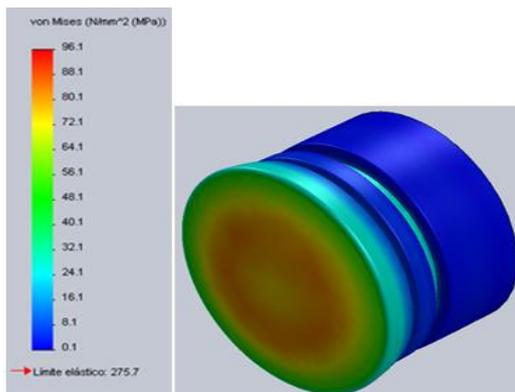


Figura 9. Representación del Esfuerzo de von Mises en el Cilindro de Compresión de Nieve Carbónica, con una Escala de Deformación de 430x

3.5. Selección del Sistema Hidráulico.

El sistema hidráulico tiene la función de generar la fuerza hidráulica necesaria para realizar toda la carrera del cilindro hidráulico, y tener control sobre éste mediante las válvulas direccionales.

Parámetros.

- La fuerza necesaria para extruir el hielo seco es de por lo menos 32000 kgf.
- Se selecciona un cilindro hidráulico de diámetro 150 mm. o 6 pulg. y carrera 500 mm.
- El cilindro hidráulico debe operar a presiones de trabajo de 206.84 Bar (3000 Psi) y presiones máximas de hasta 344.74Bar (5000 Psi).
- La carrera del cilindro se realizará en un tiempo de 27 segundos.
- La electroválvula hidráulica permitirá que el cilindro pueda ser detenido a mitad de carrera y que cambie la dirección del movimiento sin ningún problema.

3.6. Selección del Tanque de Almacenamiento.

El tanque debe tener una capacidad de almacenamiento de 3000 kg de CO₂ líquido. El tanque debe tener un sistema de refrigeración que le permita mantener las condiciones de presión y temperatura apropiadas.

La presión del CO₂ debe estar cercana a los 20 Bar (290 Psig.) con una variación máxima de +/- 10 Psig. (+/- 0.69 Bar). La temperatura debe estar cercana a 0 ° F (-17 y -18 ° C).

El tanque será de forma vertical como se muestra en la Figura 10.



Figura 10. Tanque Vertical de Almacenamiento de CO₂.

3.6. Sistema de Control.

El sistema de control está encargado de controlar la parte eléctrica y electrónica; es quien recibe las señales y comanda el funcionamiento de los diferentes dispositivos de control del equipo.

Se divide en dos partes; una para el arranque, protección y correcto funcionamiento del motor eléctrico, y la otra para controlar las electroválvulas de CO₂, la electroválvula hidráulica y recibir señales de los detectores de proximidad y del presostato.

La marca SIEMENS tiene un gabinete con un dispositivo de control llamado LOGO! modelo 230RC.

La Figura 11, muestra un modelo común de LOGO!. Éste es un módulo de lógica inteligente que se utiliza para la automatización de tareas. Que trabaja con señales de entrada y salida digitales.



Figura 11. Logo de Siemens.

Este dispositivo será quien controlará las electroválvulas (señal digital de salida), la electroválvula hidráulica (señal digital de salida), los detectores de proximidad (señal digital de entrada), y presostato (señal digital de entrada).

En la tabla 3 se muestran los componentes que conforman el sistema de control.

Tabla 3. Componentes del Sistema de Control.

SISTEMA DE CONTROL	
Descripción	Cant.
Actuador Neumático de 1/2" 8 Bar	3
Electroválvula Neumática 5/2 110 VAC	3
Placa agrupable	1
Sensores de Posición	2
Tubo Plástico de PVC de 10mm	5
Presostato para 40-100 Psi	2
Racores	20
Electroválvula Neumática 2/2 110 VAC	1
Presostato	2
Logo PLC	1
Cableado	1
Arrancador Directo Incluye Gabinete	1
Reles y Borneras	1
Gabinete	1
Conduletas	10
Botoneras	8
Plancha de Acero Inox	1

4. Análisis de Costos.

En la Tabla 4 se muestra el Diagrama de Gantt de construcción, el cual sirve para estimar el tiempo de fabricación del equipo.

Tabla 4. Diagrama de Gantt de Construcción del Equipo.

DÍAS	ACTIVIDAD	SEMANA 1	SEMANA 2	SEMANA 3	SEMANA 4	SEMANA 5
	Descripción					
7	Adquisición y Recepción de Materiales	L	M	J	V	S
1	Fabricación de Matriz Primaria con agujeros de 3 mm		L			
1	Fabricación de Matriz Secundaria con agujeros de 17 mm			L		
2	Fabricación de Placa Soporte				L	
3	Fabricación de Cámara de Formación de 4" de diámetro interior X +630 mm de largo X +12mm espesor					L
1	Cilindro de compresión de nieve carbónica y anillos de selle					L
1	Tensores, tuercas y arandelas					L
3	Central Hidráulica. Incluye sistema de refrigeración por aire					L
4	Fabricación de Estructura de Soporte					L
2	Montaje de Conjunto de Extrusión					L
2	Montaje Sistema Hidráulico					L
4	Montaje de Tubería, Elementos Neumáticos y Accesorios					L
1	Adquisición de Sistema de Control					L
3	Montaje y Programación del Sistema de Control					L
4	Puesta en Marcha y Calibración					L

En la Tabla 5 están los costos de todo los componentes principales del equipo pelletizador, incluida la mano de obra.

Tabla 5. Costos Totales del Equipo Pelletizador.

COSTO TOTAL DEL EQUIPO	CANTIDAD	COSTO (USD)
CONJUNTO DE EXTRUSIÓN	1	\$2,734.32
SISTEMA HIDRAULICO	1	\$7,165.09
TUBERIAS Y ACCESORIOS	1	\$2,048.00
SISTEMA DE CONTROL	1	\$3,016.39
ESTRUCTURA DE SOPORTE	1	\$300.00
MANO DE OBRA	1	\$8,172.00
	SUBTOTAL	\$23,435.80
	IVA 12 %	\$2,812.30
	TOTAL	\$26,248.10

En la Figura 12 se puede observar que el mayor porcentaje de los costos, lo tiene la mano de obra siendo esta del 35 %, seguido del sistema hidráulico con un 30%.

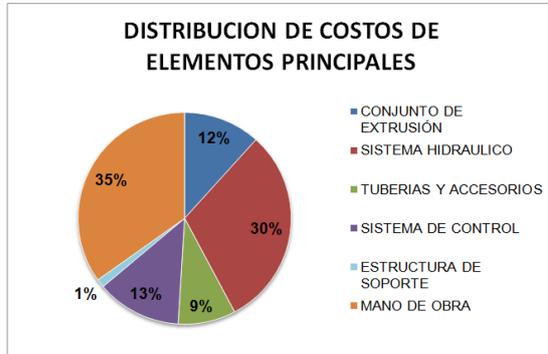


Figura 12. Porcentajes de Costos del Equipo.

5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones.

- El realizar el diseño y construcción del equipo, con mano de obra calificada y no calificada, genera fuentes de trabajo, se evita fuga de divisas y es más económica, debido a que representa el 65% del costo de un equipo importado de similares características.
- El equipo tiene una capacidad de producción de 110 Kg/hora. Es de fácil mantenimiento y la reposición de las partes es sencilla. Todas las piezas, elementos y repuestos del equipo se disponen localmente.
- La inversión inicial de capital para construir el equipo pelletizador y toda la infraestructura que ésta implica, es alta, pero el mercado disponible para el desarrollo de la tecnología del Iceblasting es amplio y no existe mayor competencia. Éste tiene una infinidad de aplicaciones en la industria nacional con ventajas cuantificables, ya que significa una opción ecológica a los métodos tradicionales y una oportunidad para que las industrias locales incrementen la productividad de sus plantas, al reducir significativamente el tiempo de inactividad debido a las limpiezas de equipos y elementos. El costo del servicio se puede llegar a pagar solo. Un buen plan de mercadeo y promoción es importante inicialmente.

5.2. Recomendaciones.

- Es necesario que junto al equipo pelletizador se incorpore un sistema de recuperación de CO₂ (véase Apéndice G2), para que así la eficiencia de transformación del CO₂ líquido en pellets sea del 85%, y no del 35% que sería el caso sin el sistema de recuperación, lo cual elevaría considerablemente el costo de producción del hielo seco.
- Con una bomba de dos piñones, de engranajes dobles, con capacidad total de 22 cc/rev, dividida en 2 bombas de engranajes duales de 11 cc/rev cada una, se podría incrementar hasta en un 30% la capacidad de producción del equipo.
- El hielo seco se sublima a una tasa de un 3% a 8% diario, por lo cual el aislamiento de las cajas térmicas de almacenamiento es muy importante.
- Otra opción con la que se dispone con este equipo, es la de fabricar nuggets de hielo seco, los cuales se utilizan para conservación de alimentos, transporte de medicinas, entre otros. Esto como una opción adicional para abarcar otro mercado con el mismo equipo.
- Es importante tener muy en cuenta las recomendaciones de seguridad en el manejo del CO₂. El contacto directo con el hielo seco o el CO₂ líquido podrían ocasionar quemaduras graves. El límite de exposición para los seres humanos es de 5.000 PPM, por eso es necesaria una buena ventilación en las instalaciones de los equipos.

 Ing. Ernesto Martínez

 Jenner Moreira C.

 Santiago Coello L.