

# **“Construcción de una máquina para producir 1/2 tonelada de hielo troceado”**

Santiago Ochoa Guamán<sup>1</sup>, Ernesto Martínez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ingeniero en Mecánica 2005

<sup>2</sup>Director de Tesis. Ingeniero en Mecánica, Escuela Superior Politécnica del Litoral,

## **RESUMEN**

El presente trabajo tiene por objeto presentar el diseño y construcción de una máquina de hielo troceado. La característica de esta máquina está en la producción continua de hielo tubular y su entrega en trozos que pueden ser utilizados en múltiples aplicaciones. Otro detalle importante ha sido el fabricar este tipo de máquinas en este país ya que usualmente suelen ser importadas, esto muestra que la industria ecuatoriana cuenta con mano de obra y tecnología disponible para la construcción de estos equipos evitando así la fuga de capital. Finalmente se puede señalar que se ha logrado obtener una máquina que cuenta con la eficacia esperada y lista para su distribución al público.

## **ABSTRACT**

The present work has for object to present the design and construction of a crushed ice machine. The characteristic of this machine is in its continue tube ice production and its harvest which can be use in several applications. Another important detail has been to make this kind of machine in this country since usually these ones used to be imported; this shows that our industry counts with people and technology able to build these equipments avoiding like that the escape of money. Finally it can point out that it has been possible to obtain a machine that counts with a expected performance and ready to be delivered in the market.

## **INTRODUCCION**

La presente tesis tiene por objeto presentar el desarrollo del diseño de una máquina para producir 1/2 tonelada de hielo en forma continua. La instalación de plantas productoras de hielo en bloques necesitan una gran infraestructura, por ende, su costo es muy elevado no solo en su etapa de montaje sino también en su mantenimiento. Existen además otras aplicaciones donde el hielo en bloque no es útil sino hielo en trozos, en estos casos es donde una producción de hielo en forma continua y en trozos es necesaria.

Existen varias formas de producción continua de hielo que se analizan en el primer capítulo mostrando las ventajas y desventajas de cada opción. En el segundo capítulo se realizan los cálculos preliminares para la fabricación de esta máquina. Para la construcción del bastidor se utilizó un programa de elementos finitos para evaluar la resistencia. El sistema de control se seleccionó de varias alternativas analizando ventajas y desventajas de cada una. La capacidad del evaporador se obtuvo con diferentes correlaciones mostradas en los manuales de ASHRAE.

El tercer capítulo presenta detalles de las partes de la máquina, organización de personal, cronograma de actividades para la construcción y muestra a la vez un manual de operación y mantenimiento del equipo.

Existen varios fabricantes en el mundo que distribuyen este equipo, así es de gran importancia ser competitivos en los costos de fabricación de este equipo para ingresar en el mercado, como lo va hacer International Refrigeration. Por tanto el cuarto capítulo analiza los costos de fabricación y con el cual se tomaran decisiones para continuar con este proyecto.

## Hielo y sus aplicaciones

Una ventaja de la refrigeración con hielo se presenta especialmente en los vegetales o en productos que tienden a perder masa (debido a la deshidratación) y llegan a ser menos atractivos en apariencia, además que es económico de producirse para algunas aplicaciones entre estas tenemos: productos marinos, aves, procesamiento de vegetales frescos, para banquetes y fiestas, el negocio de los químicos, del concreto, además de ventas y la industria de venta de alimentos

## Formas de producirlo

Básicamente existen dos formas de hacer el hielo, a saber, el hielo húmedo y el hielo seco. Hielo seco significa hielo a temperaturas bajas, lo suficiente para prevenir que las partículas se tornen en humedad; el término no se refiere a dióxido de carbono sólido. En general, el hielo subenfriado seco se produce en plantas que remueven mecánicamente el hielo de la superficie enfriadora; muchas de las plantas de hielo en escamas son de este tipo. Cuando la superficie enfriadora del evaporador es calentada por algún mecanismo de descongelamiento para desprender el hielo, la superficie del hielo se humedece y, a menos que el hielo esté subenfriado bajo cero, 0° C, permanecerá húmedo en el cuarto de almacenamiento; el hielo tubular y las planchas de hielo son de este tipo.

Otra clasificación más común es de acuerdo al tipo que la planta produce, de ahí que tenemos:

- Hielo en Bloque
- Bloque de hielo rápido
- Hielo en escamas
- Hielo tubular
- Hielo en placas
- Hielo troceado

## DISEÑO Y SELECCIÓN DEL SISTEMA PARA PRODUCIR EL HIELO TROCEADO

### Cálculo de la capacidad frigorífica de la maquina

Primeramente se calcula la demanda de hielo por segundo:

$$\dot{m} = \frac{M}{t} = \frac{1000 \text{ } _{lbs}}{18 \text{ } _{h}} = \frac{453.59 \text{ } _{kg}}{64800 \text{ } _{s}} = 0.007 \text{ } _{kg / s}$$

Ec. 1

## Carga de Transmisión

Esta carga esta dada por la transmisión de calor a través de las paredes desde el exterior y la ganancia debido a la exposición al sol.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{f_i} + \frac{x}{k} + \frac{1}{f_o}}$$

Ec. 2

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T$$

Ec. 3

Obtenemos una carga de transmisión de 41 W ó 0.041 Kw.

## Carga del producto

La carga de congelación necesaria para producir hielo a  $-10^{\circ}\text{C}$  de agua a temperatura ambiente a  $30^{\circ}\text{C}$ , se obtiene de la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{TEORICO} = \dot{m} \cdot (Cp_{agua} \cdot \Delta T_{>0^{\circ}\text{C}} + C_{Latente} + Cp_{hielo} \cdot \Delta T_{<0^{\circ}\text{C}}) =$$

Ec. 4

$$\dot{Q}_{TEORICO} = (0.007 \text{ kg/s}) \cdot [(4.2 \text{ kJ/}^{\circ}\text{C/kg}) \cdot (30 \text{ }^{\circ}\text{C}) + 33361 \text{ kJ/kg} + (2 \text{ kJ/}^{\circ}\text{C/kg}) \cdot (10 \text{ }^{\circ}\text{C})] =$$

$$\dot{Q}_{TEORICO} = (0.007 \text{ kg/s}) \cdot (47961 \text{ kJ/kg}) = 3.36 \text{ kJ/s} = 3.36 \text{ kW}$$

## Carga interna

Esta se debe a los motores o partes eléctricas que disipan calor en el interior de la cámara. En esta máquina no existen tales cargas internas.

## Carga por infiltración de Aire

El intercambio de aire nos da una ganancia de calor que se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$\dot{Q} = \dot{q} \cdot Dt \cdot Df$$

Ec. 5

$$\dot{q} = 0.577 \cdot W \cdot H^{1.5} \cdot \left(\frac{T_s}{A}\right) \cdot \left(\frac{1}{R_s}\right)$$

Ec. 6

$$Dt = \frac{(P \cdot \theta_p + 60 \cdot \theta_o)}{3600 \cdot \theta d}$$

Ec. 7

Se obtiene así el calor por infiltración = 0.813 Kw.

## Carga del Equipo

Esta carga de calor suele ser alrededor del 5%<sup>1</sup> de las cuatro cargas anteriores a temperaturas ambiente por encima de  $-1^{\circ}\text{C}$ . Así tenemos:

$$\dot{Q}_{carga\_equipo} = 0.05 \cdot \left( \dot{Q}_{transmision} + \dot{Q}_{producto} + \dot{Q}_{interior} + \dot{Q}_{infiltracion} \right) = 0.211 \text{ Kw}$$

Ec. 8

<sup>1</sup> Obtenido de ASHRAE Handbook 1990, REFRIGERATION System and Application, Spanish version Capitulo 27, pagina 364

## Carga frigorífica Total

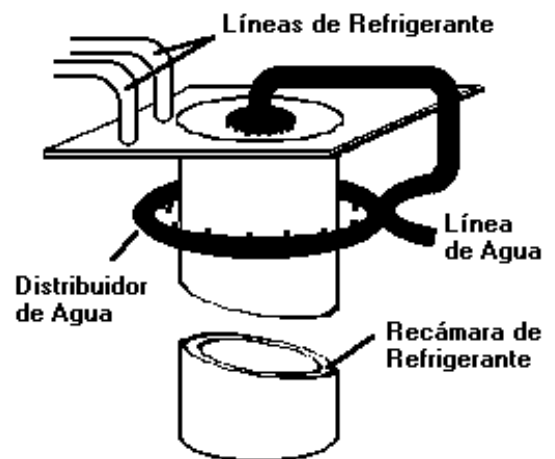
Para el cálculo total de la carga frigorífica se utiliza factor de seguridad del 10% en las cuatro primeras cargas sin afectar la carga de equipo, este valor utilizado es para tener en cuenta las posibles discrepancias entre los criterios de diseño y el funcionamiento real.

$$\dot{Q}_{carga\_equipo} = 0.10 \cdot \left( \dot{Q}_{transmision} + \dot{Q}_{producto} + \dot{Q}_{interior} + \dot{Q}_{infiltracion} \right) + \dot{Q}_{equipo} = 4.85 Kw \quad \text{Ec. 9}$$

El valor obtenido es 4.844 KW.

## Modo de operación del evaporador

El evaporador consta de dos tubos concéntricos de hierro galvanizado dispuestos en forma vertical, en medio de los cuales, pasa el refrigerante para la obtención de calor. En las paredes del evaporador expuestas al ambiente se rocía agua. En estas paredes se forma hielo hasta el espesor que se desea obtener, en este caso 8 mm, para ser luego recogido por un sistema de desescarche por gas caliente. A continuación se muestra un esquema de lo mencionado anteriormente.



Para el diseño del evaporador se debe hallar la resistencia total que encuentra el refrigerante para extraer calor del agua para la obtención del hielo, así:

$$\dot{Q}_{Evaporador} = \frac{\Delta T}{R_{Evaporador}} \quad \text{Ec. 10}$$

## Coefficiente de convección del agua

El análisis de su coeficiente de transferencia de calor se da asumiendo una película descendente o flujo por gravedad de capa de líquido<sup>2</sup>.

$$\text{Para } Re = \frac{4 \cdot \Gamma}{\mu_f} < 1800 \quad h = 1.11 \cdot F \cdot \left( \frac{1}{\Gamma} \right)^{1/3} \quad \text{Ec. 11}$$

$$\text{Y para } Re = \frac{4 \cdot \Gamma}{\mu_f} > 1800 \quad h = 0.0077 \cdot F \cdot (Re)^{0.4} \cdot \left( \frac{1}{\mu_f} \right)^{1/3} \quad \text{Ec. 12}$$

$$\text{Donde: } \Gamma = \frac{\dot{m}_P}{\pi \cdot D} \quad \text{Ec. 13}$$

<sup>2</sup> Las ecuaciones 5, 6 y 7 se obtienen de: 1997 ASHRAE Fundamentals Handbook, Cap. 4, Pág. 4.9, tabla 3, ecuaciones 2 y 4. Cada parámetro deben tener las unidades en sistema ingles, puesto que las constantes están en este sistema de unidades.

El valor del coeficiente de calor para las paredes tanto interior como exterior es el mismo y es igual a 4625 W/(m<sup>2</sup>\*K). La resistencia del agua se obtiene de:

$$R_{\text{agua}} = \frac{1}{h_{\text{agua}} * A} \quad \text{Ec. 14}$$

La resistencia que pone el agua a la transferencia de calor varía de acuerdo aumenta la capa de hielo.

## Coeficiente de convección del refrigerante 22

Con las correlaciones de Kandlikar se modifican para su mejor ajuste.

H1 = 104.013 btu/lbm	P = 34.821 psia	T = -5° F (- 20.56° C)
H2 = 124 btu/lbm	P = 241.14 psia	
H3 = 42.717 btu/lbm	P = 241.14 psia	T = 110° F (43.33° C)
H4 = 42.717 btu/lbm	P = 34.821 psia	T = -5° F (- 20.56° C)

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}}{\Delta h} = \frac{16528 \text{ Btu} / h}{61.296 \text{ Btu} / lb} = 269.65 \text{ lb} / h = 0.0339 \text{ kg} / s \quad \text{Ec. 15}$$

$$G = \frac{\dot{m}}{A_{\text{pipe}}} = \frac{(0.0339 \text{ kg} / s)}{\pi * (D_o^2 - D_i^2) / 4} = \frac{(0.0339 \text{ kg} / s)}{\pi * ((0.1 \text{ m})^2 - (0.07 \text{ m})^2) / 4} = 8.482 \text{ kg} / \text{m}^2 * s \quad \text{Ec. 16}$$

$$Re = \frac{G * D_h}{\mu_f} = \frac{(8.482 \text{ kg} / \text{m}^2 * s) * (0.1 \text{ m} - 0.07 \text{ m})}{2.29 * 10^{-5} \text{ N} * s / \text{m}^2} = 11096 \quad \text{Ec. 17}$$

$$\overline{Nu}_D = 1.86 \left( \frac{Re_D * Pr}{L / D_h} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0.14} = 1.86 \left( \frac{11096 * 4}{0.72 / 0.03} \right)^{1/3} \left( \frac{2.29 * 10^{-5}}{1.92 * 10^{-5}} \right)^{0.14} = 23.41 \quad \text{4Ec. 18}$$

$$h_{\text{liq}} = \frac{\overline{Nu} * k}{D_h} = \frac{(23.41) * (0.10255 \text{ W} / \text{m} * \text{K})}{0.03 \text{ m}} = 80.03 \text{ W} / \text{m}^2 * \text{K} \quad \text{Ec. 19}$$

$$Co = \left( \frac{1-x}{x} \right)^{0.8} \left( \frac{\rho g}{\rho f} \right)^{0.5} \quad \text{Ec. 20} \quad Bo = \frac{q_w}{G * h_{fg}} \quad \text{Ec. 21}$$

$$\left. \frac{h_{fb}}{h_{liq}} \right|_{nbd} = (1-x)^{0.8} [0.6683 * Co^{-0.2} * f_o + 1058 * Bo^{0.7} * F]$$

$$\left. \frac{h_{fb}}{h_{liq}} \right|_{cbd} = (1-x)^{0.8} [1.136 * Co^{-0.9} * f_o + 667.2 * Bo^{0.7} * F] \quad \text{5 Ec. 22}$$

hpromedio = 381.43 w/m2/K del refrigerante

<sup>3</sup> D<sub>h</sub>: D<sub>o</sub>-D<sub>i</sub> aparece ya que el evaporador consiste en anillos de tubo concéntricos. Ec. 8.72 "Fundamentos de Transferencia de Calor" de Incropera cuarta edición.

<sup>4</sup> Ec. 8.57 "Fundamentos de Transferencia de Calor" de Incropera cuarta edición.

<sup>5</sup> Ec. 9.5, Cap. 9 del libro "A heat transfer Textbook" por Leinhard

$$R_{\text{refrigerante}} = \frac{1}{h_{\text{refrigerante}} * A} \quad \text{Ec. 23}$$

Existen dos valores de resistencia del refrigerante, tanto para el lado exterior como para el interior del evaporador:

$$R1 = 0.01233 \text{ K/W} \quad R2 = 0.01656 \text{ K/W}$$

### Resistencia del hielo

El hielo al formarse sobre la superficie del evaporador constituye una parte importante para la determinación del coeficiente convectivo del equipo, su coeficiente de transferencia de calor por conducción es  $K = 1.96 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$ . La resistencia dada por el hielo es entonces:

$$R_{\text{hielo}} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 * \pi * k_{\text{hielo}} * L} \quad \text{Ec. 24}$$

### Resistencia del material del evaporador

El material del cual esta fabricado el evaporador es hierro galvanizado. Su coeficiente de transferencia de calor por conducción es  $K = 63.9 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$

La resistencia dada por la pared del evaporador se calcula con la ecuación:

$$R_{\text{pared}} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 * \pi * k_{\text{pared}} * L} \quad \text{Ec. 25}$$

A continuación se muestra el análisis del evaporador para la obtención de su coeficiente global de transferencia de calor.

$$R_{\text{Total}} = \frac{1}{\frac{1}{R1_{\text{agua}} + R1_{\text{pared}} + R1_{\text{refrigerante}}} + \frac{1}{R2_{\text{agua}} + R2_{\text{pared}} + R2_{\text{refrigerante}}}} \quad \text{Ec. 26}$$

La transferencia de calor del agua desde la temperatura ambiente hasta  $0^\circ \text{C}$  (punto antes de la congelación, es decir, sin resistencia del hielo) se obtiene a partir de la ecuación:

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T_{lm}}{R_{\text{Total}}} \quad \text{Ec. 27} \quad \text{Donde:} \quad \Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad \text{Ec. 28}$$

Cuando se forma la capa de hielo, se asume que el agua tiene una temperatura constante de  $0^\circ \text{C}$  y se obtiene la transferencia de calor como sigue:

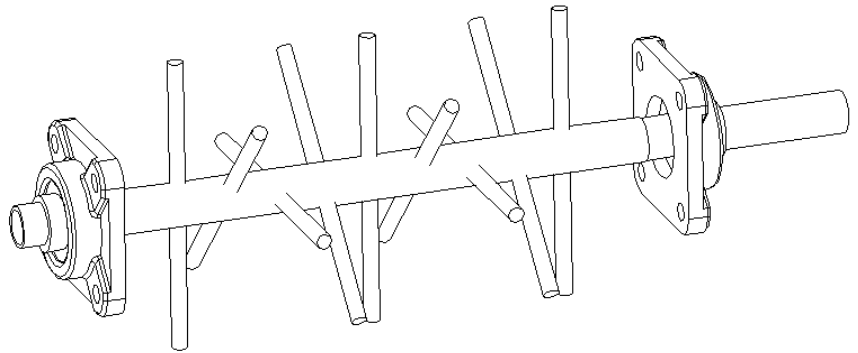
$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_{\text{Total}}} \quad \text{Ec. 29}$$

Como se puede apreciar, el evaporador tienen una capacidad teórica de 2.7 kW. Esta capacidad es mucho menor que la de diseño. La construcción de la maquina se dará con los materiales que disponemos de bodega. Como en esta maquina deben de realizarse pruebas, utilizaremos de todas maneras este evaporador.

### Diseño del triturador

El triturador esta compuesto por un árbol porta martillos en posición horizontal, los cuales en conjunto giran apoyados en las dos chumaceras a una velocidad entre 30 y 45 m/s.<sup>6</sup>

La gravedad especifica del hielo se asume es 2.64 y el índice de Trabajo es  $W_i = 12.77 \text{ kWh/ton}$



Se Asume que se emplea un tamiz de  $d_{s1} = 3 \text{ pulg (76.2 mm)}$  y el hielo debe pasar por un tamiz de  $d_{s2} = \frac{1}{2} \text{ plg (12.7 mm)}$ . Así  $d = d_s/12$ . La potencia necesaria se obtiene de

$$hp = 1.46 \cdot t_m \cdot W_i \cdot \left( \frac{1}{d_2^{0.5}} - \frac{1}{d_1^{0.5}} \right)$$

Ec. 30

Así la potencia requerida por el triturador es 0.45 hp (0.34 Kw). Suponiendo una eficiencia en el triturador de 85% la potencia requerida en el motor es 0.53 hp (0.40 kw). Seleccionamos entonces una potencia del motor que se encuentre en la tabla de potencias estándar, así el motor debe tener una potencia de 0.75 hp (0.56 Kw).

### Selección de los equipos de refrigeración y su refrigerante

Para el completo funcionamiento del sistema de refrigeración existen otros componentes con varios objetivos concretos, los cuales serán mencionados, junto con los datos para su selección.

#### Refrigerante

Con la información obtenida anteriormente se aprecia que los refrigerantes que pueden manejar con mayor facilidad la temperatura de  $-15^\circ\text{C (5}^\circ\text{F)}$  son: R22 y R502

Otro factor determinante en la selección del refrigerante es su aplicación, por lo tanto el refrigerante recomendado para el proyecto es el R22.

#### Unidad Condensadora

Esta es la unidad responsable del enfriamiento del refrigerante con un flujo de aire. Una tabla con diversos valores con los que trabaja a diferentes condiciones se presenta a continuación:

<sup>6</sup> Velocidades recomendadas para el triturado de hielo

Para su selección se necesita el tipo de refrigerante R-22, la temperatura de evaporación de  $-15^{\circ}\text{C}$  ( $5^{\circ}\text{F}$ ) y la capacidad frigorífica de 2.71 kW (0.77 Tr ó 9224.65 Btu/h)

### Válvula de Expansión Termostática

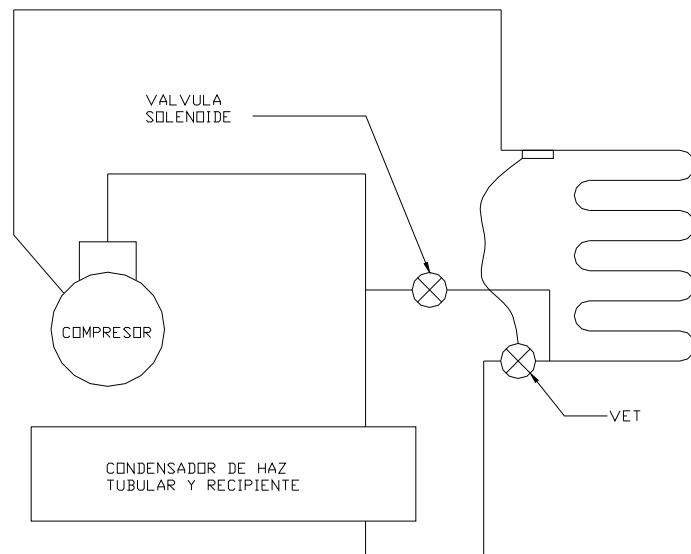
Este dispositivo es el encargado del estrangulamiento o dosificación con un actuador de diafragma. La válvula controla el flujo de refrigerante para mantener la presión de ajuste del evaporador.

Se selecciona una válvula de expansión termostática que manejará 4.844 kW (1.38 Tr), 200 psi de caída de presión a través de la válvula, con  $5^{\circ}\text{F}$  de temperatura de evaporación y temperatura de líquido de  $90^{\circ}\text{F}$ :

Se utiliza un factor de corrección de refrigerante líquido de 1.06, puesto que el catalogo presenta capacidades para líquido a  $86^{\circ}\text{F}$ . Así el tonelaje es de 1.46 Tr.

### Derivación de gas caliente

La derivación de gas caliente posibilita un control de la capacidad de un sistema hasta un estado de carga del 0% sin parar el compresor y permite realizar el descongelamiento del hielo para su cosecha.



### Selección de las tuberías del sistema del refrigerante

De la tabla que se muestra en los anexos se obtienen los diámetros para las líneas de líquido, succión y descarga. Estos valores se presentan solo si la longitud equivalente de las líneas es inferior a 100 ft.

Línea de líquido	109.5 ft	3/8"
Línea de succión	51.4 ft	3/8"
Línea de descarga	23 ft	7/8"

### Selección del sistema de control para la producción del hielo

La acción de control requerida será de dos posiciones o encendido y apagado (on/off), ya que la precisión requerida en la calidad del hielo y su cantidad por cosecha no es una condición imperante. Es común en estos controladores de dos posiciones utilizar dispositivos eléctricos donde se usan válvulas solenoides.

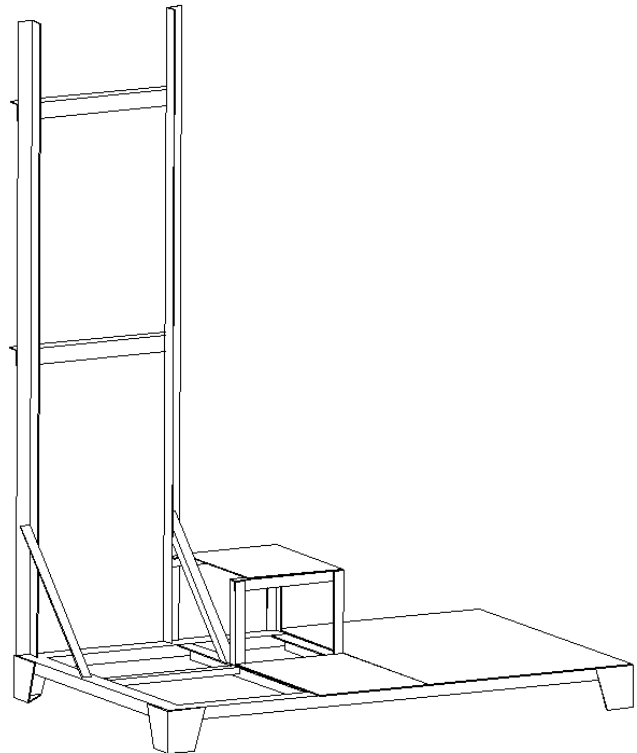


## Selección de la estructura con elementos finitos

El evaporador de este equipo necesita apoyarse sobre un bastidor, el cual se construye como viga en voladizo de forma vertical, como se aprecia en la siguiente figura

La parte inferior del bastidor se asume como empotramiento. El material que se utiliza para esta estructura es AISI 1020 con ángulos de 3 mm de espesor y alas de 38 mm en L. Se asume una carga lateral de 147 N con la cual se calcula el desplazamiento y esfuerzos máximos de la estructura. Para determinar si este arreglo de ángulos soportaría las cargas externas se utilizó el método de elementos finitos con el cual se obtuvo los siguientes resultados:

Desplazamiento máximo: 33 mm  
 Esfuerzos máximos: 207 MPa  
 Esfuerzo de fluencia del AISI 1020: 351 Mpa  
 Factor de seguridad: 1.70



Se aprecia también por los datos anteriores que la estructura soportara sin problema alguno las cargas debidas al evaporador.

También se utilizó este método para el análisis de esfuerzos en el triturador. La polea de 6" de diámetro está construida de aluminio, el eje es de AISI 1020 con capa de galvanizado y martillos de acero inoxidable AISI 304, las chumaceras son fabricados en hierro fundido.

Primeramente se obtienen los esfuerzos debido a fuerzas inerciales, ya que la trituradora gira a 567 rpm, a continuación se muestra la figura 14 con la distribución de esfuerzos:

Máximo esfuerzo: 0.14 MPa  
 Máximo esfuerzo de fluencia AISI 1020: 351 MPa  
 Coeficiente de seguridad: 2542

Como se menciona anteriormente el coeficiente de seguridad es muy alto, por tanto el riesgo a falla por esfuerzos de inercia es muy pequeño.

Es necesario realizar un análisis debido a la frecuencia de vibración que sufre el triturador, a las rpm ya mencionadas.

Se recomienda que la vibración de cualquier equipo no supere el 65% de la frecuencia natural, así tenemos que el triturador tiene una vibración del 16.29%, valor muy por debajo de lo requerido razón por la cual se trabaja con este arreglo de triturador.

La deformación en su primera frecuencia natural de vibración a 3480 rpm se presenta en la siguiente figura:

## Conclusiones

- Según las normas de las agencias oficiales norteamericanas, FDA (administración de Alimentos y Drogas), todos los materiales utilizados en sistemas que tienen relación directa con el procesamiento de productos alimenticios tienen que ser de grado alimenticio, razón por la cual el material utilizado para la construcción del evaporador será acero AISI 304.
- La construcción de este tipo de equipos en el país es factible ya que contamos con la tecnología y la mano de obra adecuada para realizarlo.
- Los costos en comparación a los precios de fabricantes internacionales son competitivos, esto indica que pueden existir empresas dedicadas a la fabricación de maquinas para hacer hielo sin temor
- La manufactura del evaporador es el paso crítico del proceso, deben de desarrollarse métodos de construcción rápidos y eficaces para una fabricación en serie.
- El costo beneficio de estos equipos disminuye inversamente a la capacidad de la maquina, es decir mientras mayor es tu tonelaje por día la utilidad será mayor

## BIBLIOGRAFIA

- ALTHOUSE Andrew, Modern Refrigeration and Air Conditioning, The Goodheart-Willcox Company Inc, Illinois, 1968
- ASHRAE, Refrigeration – Sistemas y Aplicaciones, Edición Española, Roure 6, España, 1990
- ALCO Controls, Thermo Expansion Valves, St Louis, 1993
- Manual para el mejoramiento del manejo poscosecha de frutas y hortalizas, <http://www.fao.org/inpho/vlibrary/x0056s/X0056S04.htm>
- PERRY, Chemical Engineers' Handbook, Fifth Edition, McGraw-Hill, Tokio, 1973