

Diseño y construcción de un prototipo para la extracción continua de aceite de la semilla Sacha Inchi con un proceso de prensado en frío

(Design and construction of a prototype for the continuous extraction of Sacha Inchi seed oil with a cold pressing process)

Nelson Ramiro Gutiérrez Suquillo¹, Irene Alexandra Saá Arévalo¹, Alexy Fabián Vinueza Lozada¹

Resumen:

Este trabajo presenta el diseño de un extractor de aceite a partir de la semilla de Sacha Inchi a través de un mecanismo de tornillo extrusor, permite alcanzar un rendimiento máximo del 34% mediante un proceso continuo de extracción en frío con temperaturas de trabajo inferiores a 45 °C. La temperatura es un parámetro crítico ya que al superar los 50 °C, el aceite disminuye su valor alimenticio, por la pérdida de sus propiedades más importantes como son: el contenido de Omega 3 (48%), Omega 6 (36%), Omega 9 (8%), digestibilidad (96%), vitamina A y E. La metodología utilizada para el desarrollo de trabajo fue la de diseño concurrente y simultaneo de acuerdo con las recomendaciones de National Instruments. El prototipo implementado está compuesto por un tornillo extrusor, un dado de presión, cámara de alimentación, tamiz y filtro. La ventaja del diseño modular es su flexibilidad, por lo que, al cambiar determinados componentes es posible utilizar el prototipo para extraer aceite de diferentes tipos y tamaños de semillas. Los productos resultantes son: 33.34% de aceite y un residuo sólido conocido como Torta en un 66.66% que tiene muchas aplicaciones en el campo de la alimentación humana y de mascotas. Debido a que se está procesando un producto alimenticio se tomó en cuenta los requerimientos de la Norma ISO 22005 para el diseño y la implementación del prototipo.

Palabras clave: tornillo extrusor; temperatura crítica; rendimiento; tamiz; *Plukenetia volubilis*

Abstract:

This work presents the design of an oil extractor from the Sacha Inchi seed with an extruder screw mechanism allows a maximum yield of 34% through a continuous cold extraction process at working temperatures below 45 ° C. The temperature is a critical parameter because when it exceeds 50 ° C, the oil decreases its nutritional value by the loss of its most important properties such as: Omega 3 (48%), Omega 6 (36%), Omega 9 (8%), digestibility (96%), vitamin A and E. The methodology used for the development of the work was the concurrent and simultaneous design according to the recommendations of National Instruments. The prototype consists of the extruder screw, pressure chamber, feed chamber, sieve and filter. The advantage of modular design is the flexibility it offers, so that when changing certain components it is possible to use the prototype to extract oil of different types and sizes of seeds. The products obtained from this mechanism are: 33.34% of oil and the solid residue known as Cake in 66.66% which has many applications in the field of human food and pets. Due to the processing of a food product, the requirements of ISO 22005 were applied for the design and implementation of the prototype.

Keywords: Screw extruder; mechatronics; performance; sieve; *Plukenetia volubilis*

¹ Universidad Tecnológica Equinoccial, Quito – Ecuador ({nelson.gutierrez, saia38275, alexy.vinueza} @ute.edu.ec)

1. Introducción

La semilla de Sacha Inchi proviene de una planta nativa de rápido crecimiento de la Amazonía de Perú y Ecuador en alturas desde 100 m.s.n.m. en la selva baja hasta los 2000 m.s.n.m. y en la selva alta. Esta planta requiere de abundante agua para tener un crecimiento sostenido; es mejor si las lluvias se distribuyen en forma uniforme durante los 12 meses (850 a 1000 mm), luz, humedad y suelos con adecuado drenaje. (Hurtado, 2013) (Valenzuela A., Valenzuela R., 2014). En la *Tabla 1* se detallan las características básicas de la semilla.

Tabla 1. Características de la semilla Sacha Inchi

Nombre Científico	<i>Plukenetia volubilis</i> Linneo
Temperatura ambiente promedio	26° C
Humedad	78 %
Forma	Ovalada
Superficie	Lisa
Tamaño de la semilla	1,5 cm alto x 2 cm de diámetro
Densidad	0.82 g/cm ³
Peso de la semilla	0.8 –1.4 g

(Castaño D., Valencia M., 2012) (Gutiérrez L., Rosada L., Jiménez L., 2011)

El aceite de Sacha Inchi tiene el mayor contenido de Omega 3 (48%), Omega 6 (36%) de los aceites provenientes de semillas oleaginosas y es de alta calidad para la alimentación, salud, uso industrial, cosmético y medicinal (UNAD, 2013) (Valenzuela R., Barrera R., González-Astorga M., Sanhueza C., Valenzuela A., 2014).

Existen diferentes métodos de extracción de aceite a partir de estas semillas, el uso de estos provocan, variaciones en el rendimiento de aceite, calidad y contenido de ácidos grasos, fibras dietéticas totales y también contenido de antioxidantes. Entre los métodos más conocidos se puede mencionar: (Ali N. et al, 2012)

- a. Métodos mecánicos: prensado de la semilla
- b. Métodos químicos: a través del uso de solventes y fluidos supercríticos:

En la *Tabla 2*, se resumen las principales características de los diferentes métodos de extracción.

Tabla 2. Características de métodos de extracción de aceite

MÉTODO DE EXTRACCIÓN	TÉCNICA DE EXTRACCIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Compresión de la semilla	a. Prensado en frío y almacenamiento a baja temperatura (método discontinuo) b. Prensa de tornillo (método continuo)	Mejor conservación de los componentes antioxidantes (quercetina y miricetina)	Rendimiento bajo de extracción
Solvente	Método Soxhlet, usando como solvente el Hexano	Favorece las características funcionales del aceite, tales como la retención de agua y la estabilidad de emulsión	Pérdidas de antioxidantes, también presenta un riesgo potencial de contaminación y afectación en la salud del personal por el uso de hexano
Líquido supercrítico	Utilización del CO ₂ en estado supercrítico	Altos rendimientos de extracción y no requiere retirar los solventes del aceite ni de la torta residual	Las instalaciones y los equipos para este tipo de instalaciones resultan más complejas y costosas

(Lafont J., et al, 2011)

El proceso de extracción de aceite es óptimo cuando se obtiene la mayor producción a partir de las semillas. La temperatura es un parámetro crítico, por lo que es importante no superar los 50° C en el proceso y así conservar de este modo el equilibrio de ácidos grasos, antioxidantes propios del aceite y sus propiedades físico-químicas (Hurtado, 2013).

Estudios realizados tanto en EEUU como en Perú (como principal productor de la semilla en el mundo) determinaron que este resulta ser el mejor entre los aceites vegetales utilizados para el consumo humano, debido a su composición en ácidos grasos mono y poliinsaturados (grupo de los Omega-3) (Fanall C., Dugo L., Cacciola F., 2011).

De este tipo de ácidos grasos, el linolénico o (ω -6) y el α -linolénico (ω -3) son los más importantes para la salud porque son cruciales en las funciones del cerebro y, también, en el crecimiento y desarrollo del ser humano (Adrianzén N., et al, 2011).

A esto hay que añadir que en los últimos años hay una tendencia creciente al consumo de aceites vegetales para reducir el nivel de colesterol y los riesgos de enfermedades cardiovasculares. Esto ha motivado un aumento en la producción de la semilla en el Perú, además de países como Colombia y Ecuador, aunque en la actualidad los métodos de extracción de aceite se realizan de manera artesanal siendo la producción ineficiente (Chirinos O., et al, 2009).

Se han llevado a cabo varios estudios sobre las características físico-químicas y el rendimiento del aceite a partir de estas semillas para diferentes métodos de extracción. La mayor parte de estudios se han realizado en Perú y los aceites obtenidos se evalúan mediante estas características, siguiendo la actual legislación peruana (NTP 151.400, 2009).

En el 2011 se realizó un trabajo de investigación con 14 muestras de la variedad Plukenetia huayllabambana de diferentes zonas del Perú utilizando el método de prensado en frío, obteniendo rendimientos de entre el 30 y el 43% (Chasquibol N., et al, 2011).

Se realizó una investigación acerca del efecto de la temperatura y tiempo de tratamiento térmico de las almendras trituradas de Sacha Inchi de la variedad Plukenetia volubilis obteniendo rendimientos de extracción del 23 al 26% y determinaron que la temperatura de tratamiento térmico ejerce una relación directamente proporcional sobre el rendimiento del aceite, mientras que el tiempo ejerce una relación inversa (Adrianzén N., et al, 2011).

El método de extracción con solventes constituye el más eficaz para las semillas oleaginosas con bajo contenido de aceite (Bailey A., 2010) .

El estudio realizado en la Universidad San Francisco de Quito en el año 2012 determinó que el rendimiento para la extracción con Hexano con la técnica de Soxhlet, es del 43.96%, con un porcentaje de acidez del 0.7398 y un tiempo de extracción de 6 horas (Pantoja L., et al, 2012) .

Para el caso del método mediante fluidos supercríticos, se realizó un estudio utilizando como fluido el CO₂, en condiciones de presión a 450 BAR, temperatura de 50 C y flujo de 8 ml/s con un tiempo de extracción de 4 horas, con un rendimiento promedio del 39.42%, obteniendo aceite libre de residuos de solventes y trazas de agua. (Dávila D., et al, 2013)

El proceso de extracción todavía se realiza de forma manual en la mayoría de casos, tomando en cuenta que existen tareas previas a la extracción como son: el secado, la separación de la cáscara, y la selección de la semilla (que consiste en determinar si esta cruda, normal o quemada); se debe prevenir que la temperatura generada por la fricción no supere el límite permitido con el fin de asegurar su valor nutricional. (Hurtado, 2013).

El prensado en frío es un proceso mecánico libre de químicos para extraer aceite de semillas y nueces. Este método de extracción es una alternativa viable para pequeños y medianos productores a la técnica con hexano, que es un proceso utilizado para muchos aceites convencionales y que generalmente se usa para lograr altos volúmenes de producción y productividad (Lafont J., et al, 2011).

2. Metodología

El proceso metodológico de diseño simultáneo y concurrente aplicado en este proyecto, considera como factor fundamental la reducción del tiempo de desarrollo. Se define inicialmente una estructura modular del prototipo y se dividen las tareas en subproyectos que pueden desarrollarse en paralelo, facilitando de esta manera la fabricación de los componentes y subsistemas. (National Instruments, 2016)

La metodología planteada por National Instruments, consiste en un conjunto de procesos que tienen sinergia entre ellos, de esta manera se logra integrar componentes mecánicos y electrónicos gestionados por un sistema de control lo que configura un dispositivo Mecatrónico. Los elementos de esta metodología se pueden observar en la *Figura 1*:

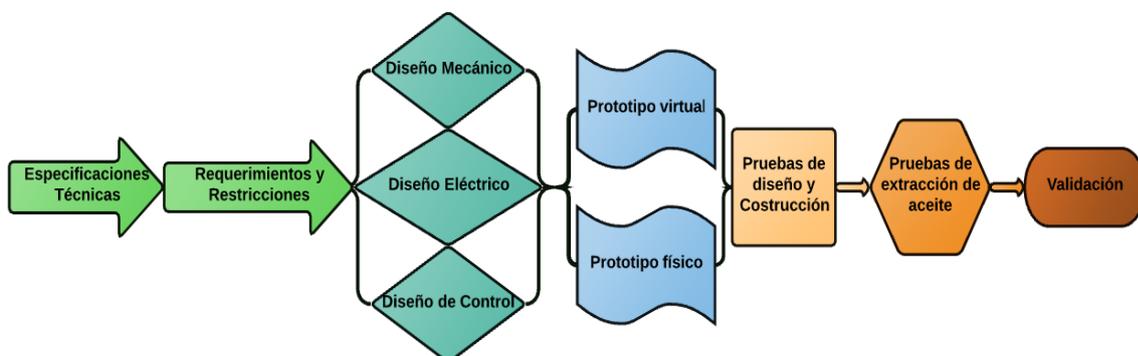


Figura 1. Metodología (National Instruments, 2016).

Para cumplir con los objetivos planteados en este trabajo se realizaron los siguientes pasos:

- Verificar especificaciones y restricciones técnicas del sistema de extracción, en base a las características de las semillas.
- Realizar el diseño mecánico, eléctrico y de control según las variables y necesidades del trabajo.
- Diseñar las partes que conformarán los diferentes subsistemas mecánicos de la máquina y modelarlos en *software* CAD.
- Dimensionar los elementos eléctricos, electrónicos y de control.
- Fabricar y ensamblar las partes del sistema.
- Realizar pruebas de funcionamiento en vacío y con semillas.

Requerimientos de la máquina

Los requerimientos se detallan en la *Tabla 3*.

Tabla 3. Requerimientos de la máquina

PARÁMETRO	INFORMACIÓN
Capacidad de alimentación.	20 kg.
Materiales	Anticorrosivos.
Estructura	Factor de seguridad de mínimo de 3.0
Seguridad	Protecciones eléctricas y mecánicas
Velocidad de extracción	Variable entre 0 y 100 RPM
Mantenimiento	Que brinde facilidades en el proceso de limpieza.
Operación	Fácil e intuitiva
Ensamble	Piezas desmontables.

(Organización Internacional de Normalización, (ISO), 2016)

Restricciones del sistema

Las limitaciones que se consideran en la elaboración del estudio se detallan en la *Tabla 4*.

Tabla 4. Restricciones del sistema.

RESTRICCIONES	ANÁLISIS
Temperatura de extracción de la semilla.	45° C
Tiempo de trabajo diario.	Funcionamiento continuo
Proceso de extracción.	Verificar una velocidad adecuada para su extracción.

Fuerza de ruptura ¹

Fuerza de 62
[KgF].



¹ Fuerza obtenida por método experimental en la Universidad Tecnológica Equinoccial – Laboratorio de la Facultad de Alimentos. Equipo: Penetro metro digital de frutas, Marca: TURONI Modelo: 53205 Digital fruit firmness tester

Protocolo de pruebas de funcionamiento

Para realizar un análisis de seguridad en un diseño de máquina, un estudio de peligrosidad o bien la elaboración de normas e instrucciones de uso, se han de tener presentes todos y cada uno de

los peligros susceptibles de ser generados por las máquinas basados en la Norma NTP 235: Medidas de seguridad en máquinas: criterios de selección para análisis de peligro en el campo mecánico, eléctrico y térmico (INSHT, 1989).

2.1 Diseño

De acuerdo con el estudio realizado sobre los diferentes métodos de extracción, se concluye que el sistema más adecuado para la realización de este trabajo es la implementación del prototipo con un mecanismo de tornillo extrusor. Se requiere entonces, dimensionar el dispositivo en función de la fuerza necesaria para la ruptura de la semilla.

Fuerza mínima para la ruptura de semilla.

Para el cálculo de la fuerza se deberá conocer la cantidad de semilla que se pretende extraer y la fuerza necesaria para romperla, que se define en la ecuación 1. (Hibbeler R., 2010)

$$(Cantidad\ de\ grano)(F_{grano}) = F_{total} \quad (1)$$

$$(cant)(62) = 62 [Kgf]$$

$$F = (cant * 62) * (9,8) = 607,6 * cap [N]$$

dónde:

Cap: Capacidad de producción del extractor de aceite [kg/hora]

El cálculo del torque de un tornillo extrusor, se detalla en la ecuación 2. (Mott, 2006)

$$T = \frac{F dm(1+\pi \mu dm)}{2(\pi dm-\mu L)} \quad (2)$$

dónde:

T = par torsional [Nm]

F = fuerza [N]

dm = diámetro medio [m]

μ = coeficiente de rozamiento

L = longitud [m]

En la *Tabla 5* se presentan los coeficientes de rozamiento de acuerdo con la superficie de contacto.

Tabla 5. Coeficiente de rozamiento

VALORES DEL COEFICIENTE DE ROZAMIENTO		
Superficie de contacto	Estático	Cinético
Metal sobre metal (secos)	0,2	0,1
Metal sobre metal (engrasados)	0,1	0,05

(Mott, 2006)

En este caso se escoge metal sobre metal (engrasado), cinético cuyo valor es:

$\mu = 0,05$; $L = 0,197\ m.$; $dm = 0,04\ m.$

Remplazando en la ecuación 2, se obtiene el torque en función de la capacidad extractora (*cap*):

$$T = \frac{F dm(1+\pi \mu dm)}{2(\pi dm-\mu L)} = 105,59 (cap) [N m]$$

A partir del torque se obtiene la potencia para el motor dada en la ecuación 3. (Hibbeler, 2011)

$$P = \frac{T \cdot n}{63000} \text{ [HP]} \quad (3)$$

La potencia requerida para una capacidad de extracción de 4 [kg/h], y con una variación de la velocidad de trabajo viene descrita en la *Tabla 6*.

Tabla 6. Potencia versus velocidad

Velocidad de extracción	Potencia
Rpm	HP
20	0,29
40	0,58
60	0,87
80	1,17
100	1,45

Cuando el tornillo está sometido a compresión generalmente hay que realizar el estudio del comportamiento de este como columna y verificar el efecto correspondiente, además de identificar efectos adicionales de flexión cuando exista carga excéntrica (Shigley, 2006).

Dimensionamiento del tornillo extrusor

Material

Las propiedades del acero inoxidable para el tornillo son mostrados en la *Tabla 7*.

Tabla 7. Propiedades mecánicas del acero AISI 304

AISI 304	Unidad [MPa]
Resistencia a la tensión (S_{ut})	568
Resistencia a la fluencia (S_y)	276
Módulo de elasticidad (E)	187500

(Shigley, 2006)

Relación de esbeltez

Se empleará esta relación para seleccionar el método de análisis del tornillo asemejándola a una columna corta o larga, donde K es una constante que depende del empotramiento. Se analiza con la ecuación 4. (Mott, 2006)

$$Re = Le/r_{min} = KL/r_{min} \quad (4)$$

dónde:

Re = Relación de esbeltez

$L = 0.197 \text{ m}$ (Dato de longitud para el análisis)

$K = 2.1$ Valor práctico para empotramiento libre. (Mott, 2006)

Le = Longitud efectiva [m]

$Le = KL = 0.414 \text{ m}$

Para determinar el tipo de columna, es necesario tener en cuenta los criterios de EULER para columna larga y JOHNSON para columna corta, que se detallan a continuación: (Shigley, 2006)

Si $Re > Cc \rightarrow$ Columna larga

Si $Re < Cc \rightarrow$ Columna corta

Constante de la columna

Se calcula mediante ecuación 5: (Mott, 2006)

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{S_y}} \quad (5)$$

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 187500 \text{ Mpa}}{276 \text{ Mpa}}} = 115$$

Se asume columna corta, según ecuación 6: (Mott, 2006)

$$P_{cr} = A S_y \left[1 - \frac{S_y (KL/r)^2}{4\pi^2 E} \right] \quad (6)$$

Entonces, el esfuerzo se calcula mediante la ecuación 7: (Hibbeler, 2011)

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (7)$$

Y, el área del tornillo se calcula utilizando la ecuación 8: (Hibbeler, 2011)

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (8)$$

$$A = \frac{(\pi(0.04\text{m})^2)}{4} = 1.26 \times 10^{-3} \text{ m}^2 = 1260 \text{ mm}^2$$

Remplazando en la ecuación 8, se obtiene el siguiente esfuerzo:

$$\sigma = \frac{607,7 \text{ (cap)} [N]}{1260 \text{ mm}^2}$$

$$\sigma = 0,482301 \text{ (cap) MPa}$$

Como criterio de seguridad se debe cumplir que el esfuerzo de trabajo (σ) sea inferior al límite elástico (σ_e) del material del tornillo ($\sigma < \sigma_e$). (Shigley, 2006)

Es habitual trabajar con cierto margen de seguridad, por lo que se recomienda que se cumpla la siguiente condición de factor de seguridad, mediante la ecuación 9 (Shigley, 2006).

$$\frac{\sigma_e}{\sigma} > 3 \quad (9)$$

$$\frac{\sigma_e}{\sigma} = \frac{568 \text{ MPa}}{0,4823 \text{ (cap) MPa}}$$

$$1177 \text{ (cap)}^{-1} > 3$$

Se considera aceptable el diseño cuando se tenga un factor de seguridad con un valor mayor a 3.

Se selecciona la constante K para el cálculo de la carga crítica (P_{cr}):

$K = 2.1$ es el valor práctico para empotramiento libre. (Mott, 2006)

Entonces, para calcular la inercia se utiliza la ecuación 10: (Hibbeler, 2011)

$$I = r^2 A \quad (10)$$

$$r = D/2$$

$$r = 0.02 \text{ m}$$

Remplazando en la ecuación 10:

$$I = (0.01 \text{ m})^2 (1.26 \times 10^{-3} \text{ m}^2)$$

$$I = 5.04 \times 10^{-7} \text{ m}^4$$

Con la ecuación 7 se obtiene:

$$P_{cr} = 324.4 \text{ KN}$$

La relación de esbeltez con la ecuación 5 es:

$$Re = \frac{0.414}{0,02} = 20.7$$

Si $Re < Cc \rightarrow$ Columna corta

$20.7 < 115 \rightarrow$ si cumple condición

Datos entrada para el tipo de tornillo de una sola entrada mostrada en la *Figura 2*.

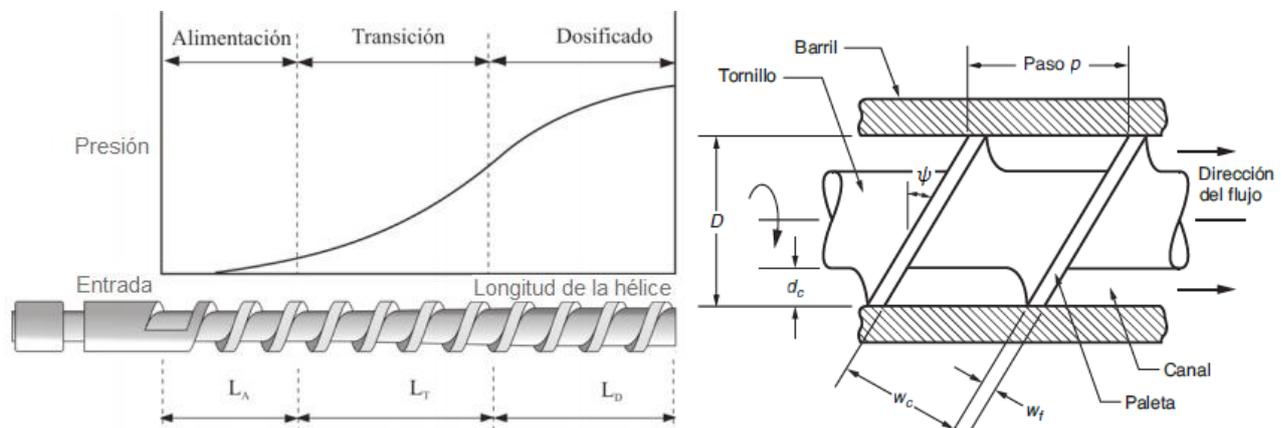


Figura 2. Tornillo extrusor de una sola entrada (Groover, 2010).

$\theta_n = 20^\circ$ (ángulo normal de presión) (Shigley, 2006)

$\psi = 16^\circ$ (ángulo de la hélice) (Shigley, 2006)

$L = 197 \text{ mm}$ (longitud de la hélice)

$D = 60 \text{ mm}$ (diámetro del tornillo)

$d_c =$ profundidad del canal

$w_c =$ ancho del canal

$w_f =$ ancho de la cuerda

Se define el factor L/D (relación entre longitud y diámetro del tornillo). Las relaciones pueden variar entre 3 a 30 (Groover, 2010).

Con la ecuación 11 se encuentra el paso (p) del tornillo: (Groover, 2010)

$$\tan \psi = \frac{p}{\pi D} \quad (11)$$

$$p = 54 \text{ mm}$$

Generalmente el tornillo tiene un paso cuyo valor por lo general se acerca al del diámetro D (Groover, 2010).

Para el cálculo de la profundidad del canal (d_c) se utiliza la ecuación 12: (Groover, 2010)

$$d_c = \frac{0.6866p}{2} \quad (12)$$

$$d_c = 18 \text{ mm}$$

En la *Figura 3* se puede observar el proceso de maquinado del tornillo extrusor.



Figura 3. Maquinado del tornillo extrusor

Para el cálculo de los soportes horizontales de la estructura se lo considera como viga, como se observa en la *Figura 4*.

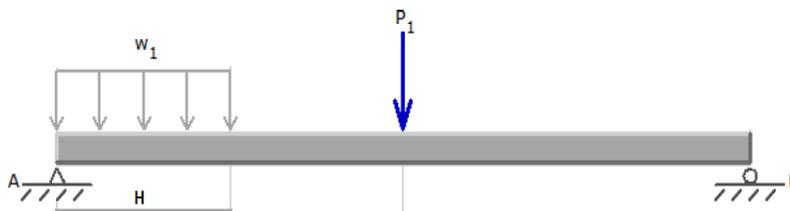


Figura 4. Datos de la viga

Según catálogo los datos del material son: (IPAC, 2016)

Recubrimiento:	Negro o Galvanizado
Norma de calidad:	ASTM A 500 Gr. A, B ó C
Norma de Fabricación:	NTE INEN 2415
Espesores:	Desde 1,50 a 6,00 mm
Inercia:	0.58 cm ⁴
Peso por longitud:	0.83 Kg/m

La longitud del soporte es de 1.24 m, $W_1 = 65 \text{ Kg/m}$, $H = 0.62 \text{ m}$

Con estos datos se obtienen los diagramas de fuerza cortante y momento flector de la viga como se muestra en la *Figura 5*.

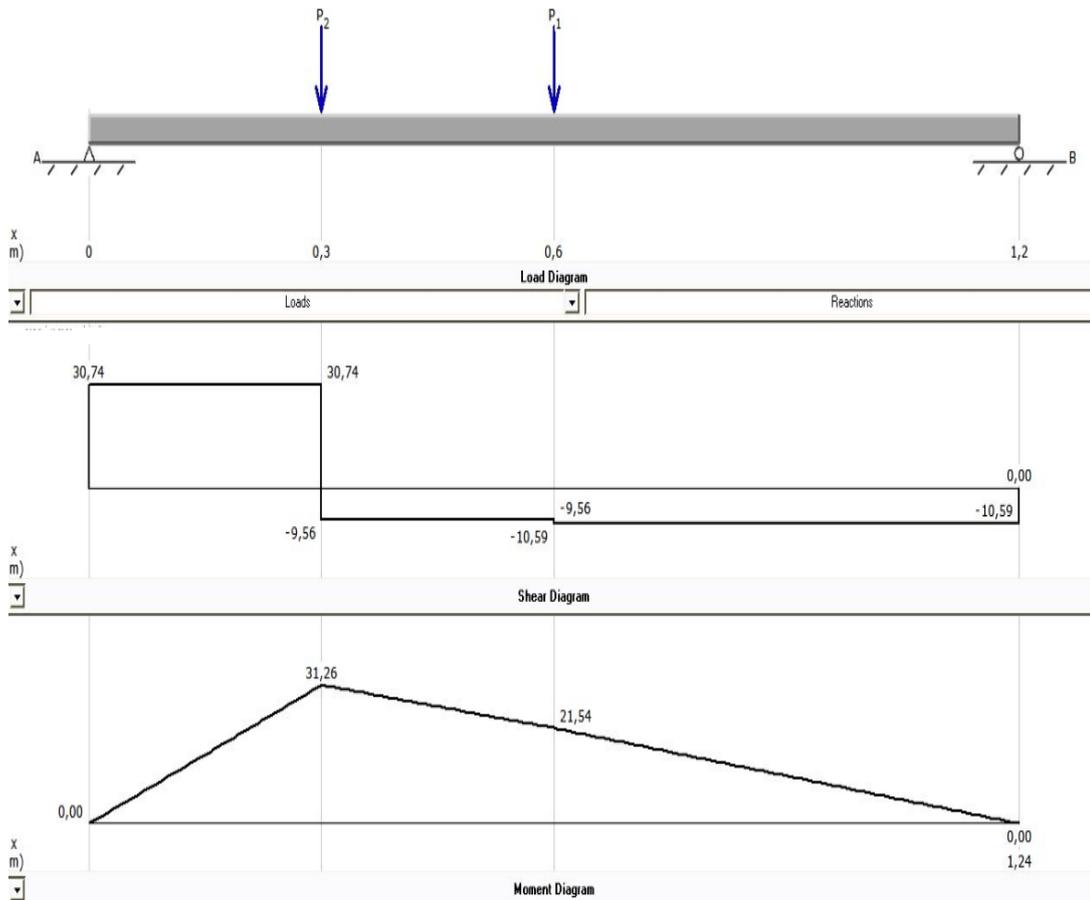


Figura 5. Diagrama de fuerza cortante y momento flector.

Se obtienen así los esfuerzos máximos en los puntos A y B de:

$$\sigma_A = 30 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_B = 10 \text{ Mpa}$$

Debido a que la potencia para el motor es de 1.45 Hp dado en la Tabla 5, es necesario para el funcionamiento adaptar un motor con la siguiente característica: (Drivesystems, 2015)

SK 30 - 90L/4 (4 polos)

Potencia: 1.5 Hp

Velocidad husillo: 75 rpm

Torque: 191 Nm

En la *Figura 6* se muestra el tornillo, la cámara de extracción (tipo tamiz) y el prototipo completo del extractor de aceite con todos sus componentes:

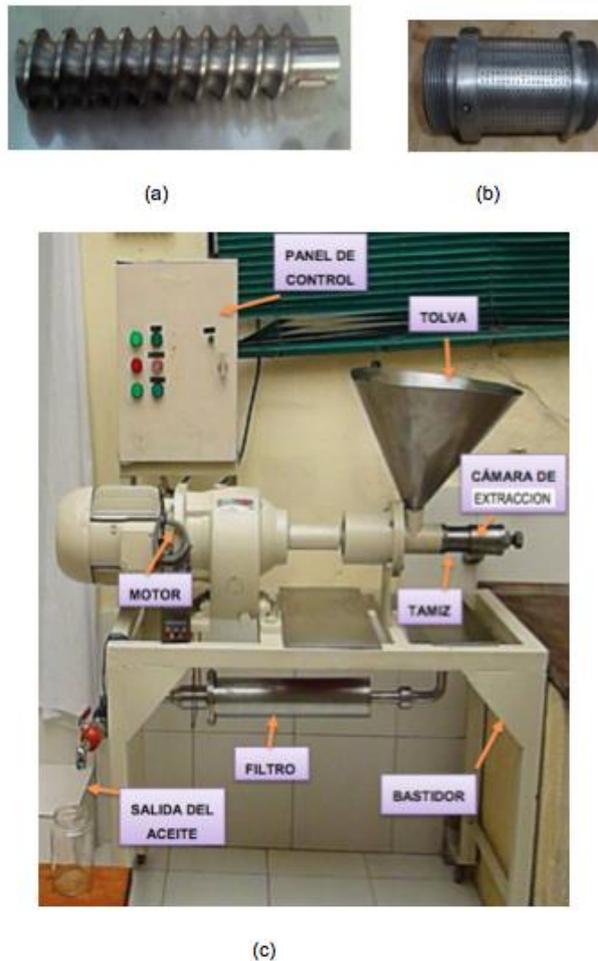


Figura 6. Prototipo del extractor de aceite, a. Tornillo extrusor, b. Tamiz, c. Mecanismo completo

3. Resultados

Pruebas de funcionamiento del prototipo

Bajo la Norma NTP 235: Medidas de seguridad en máquinas: criterios de selección (INSHT, 1989). Se realiza el análisis del funcionamiento en vacío y con carga de semilla para la extracción de aceite en el campo mecánico, eléctrico y térmico descrito en la *Tabla 8*.

Pruebas de extracción

Las pruebas de funcionamiento del prototipo se realizaron en la ciudad de Quito en condiciones ambientales promedio de temperatura 15°C y humedad relativa del 50%. Se utilizaron muestras de 20 Kg de semillas de diferente procedencia a velocidades de 20 y 80 rpm. En la *Tabla 9* se pueden observar los parámetros más relevantes para la ejecución de los ensayos.

Como resultado de las pruebas se obtuvo la temperatura en el interior del mecanismo para cada una de las muestras que alimentaron el dispositivo a velocidades del tornillo de 20 y 80 rpm. Los datos se pueden observar en la *Figura 7*.

Tabla 8. Estudio de peligrosidad en el prototipo

Campo de Análisis	Tipos de peligro	*Probabilidad que produzca daño	**Gravedad	Medidas de seguridad	Observaciones
MECÁNICO	Aplastamiento	SÍ	Alto	<1>	+ Prevención intrínseca
	Cizallamiento	NO	Medio	<2>	++ Protección
	Corte	SÍ	Medio	<2>	++ Protección
	Enganche	SÍ	Bajo	<3>	+++ Advertencias
	Atrapamiento	NO	Bajo	<3>	+ Prevención intrínseca
	Impacto	SÍ	Medio	<2>	++ Protección
	Fricción-Abrasión	SÍ	Bajo	<3>	+++ Advertencias
ELÉCTRICO	Proyección de fluido	SÍ	Bajo	<3>	+ Prevención intrínseca
	Cortocircuitos	SÍ	Alto	<1>	++ Protección
TÉRMICO	Choque eléctrico	SÍ	Alto	<1>	+++ Advertencias
	Quemaduras	NO	Bajo	<3>	+++ Advertencias
	Incendios	SÍ	Alto	<1>	+++ Advertencias

* La probabilidad de producirse un daño está relacionada con la exposición al peligro (frecuencia de acceso y permanencia en la zona peligrosa), así como con la facilidad de desencadenarse un fallo.

**La gravedad de los daños puede variar en función de numerosos factores que se debe intentar prever. Se considerará siempre el daño más grave previsible.

+ Evitar el mayor número posible de peligros o bien reducir los riesgos, eliminando convenientemente ciertos factores determinantes, en el diseño de la máquina.

++ Resguardos y defensas (encierran, o evitan el acceso a los puntos peligrosos). Dispositivos de protección (protegen puntos peligrosos descubiertos totalmente, o de muy fácil acceso (apertura y cierre).

+++ Instrucciones técnicas. Libro de instrucciones. Indicaciones de implantación. Mantenimiento y métodos. Planos y esquemas. Marcas y signos -Indicando puntos peligrosos o advertencias.

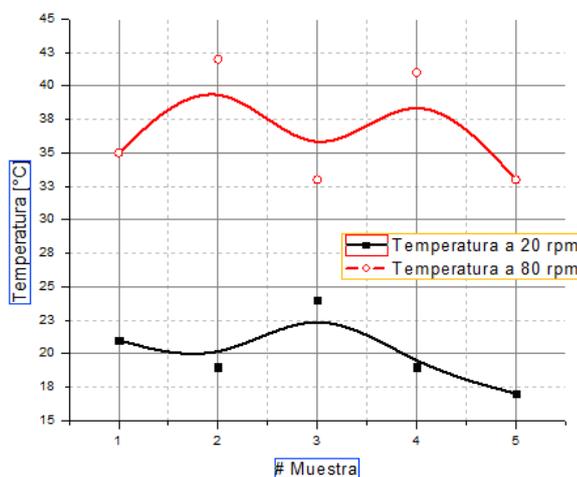
<1> Evitan o reducen al máximo el peligro, fundamentalmente por diseño.

<2> Protegen contra los peligros que no es posible evitar o reducir por diseño.

<3> Advierten e informan a los usuarios de los peligros, complementariamente a las anteriores, cuando no cabe protección total.

Tabla 9. Datos y condiciones de las pruebas

Datos	Condiciones de las pruebas
Horario de pruebas	De 8h00 a 11h00
Temperatura ambiente	Promedio de 15 ° C
Humedad ambiente	Promedio de 50%
Tamaño de la semilla	Promedio entre 1,5 cm de alto x 2 cm de diámetro
Origen de la semilla	La Maná, San Miguel de los Bancos, Santo Domingo y Amazonía ecuatoriana
Proceso de secado	No se realiza
Ambiente de almacenamiento de la semilla	Seco
Medición de temperatura en el tornillo	Sensor Termopar TIPO K ($\pm 1^{\circ}\text{C}$)

**Figura 7.** Temperatura en el interior del dispositivo en función de la velocidad del tornillo.

Durante los ensayos realizados se efectuaron mediciones de la masa del aceite extraída así como la de la torta que es el residuo sólido granulado del proceso. Los datos se organizaron para velocidades determinadas en los requerimientos como se muestra en la *Figura 8* y *Figura 9*.

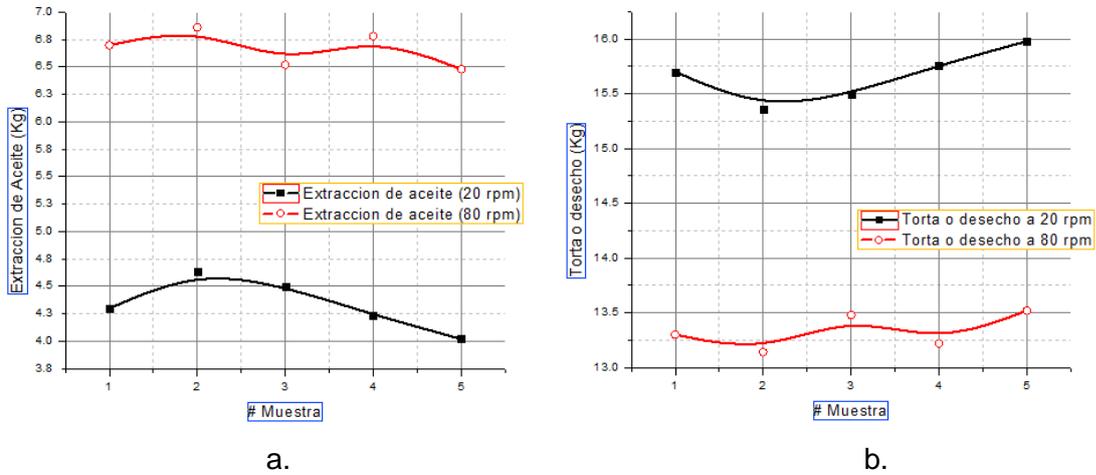


Figura 8. a) Masa de aceite extraído, b) Torta residual para diferentes muestras

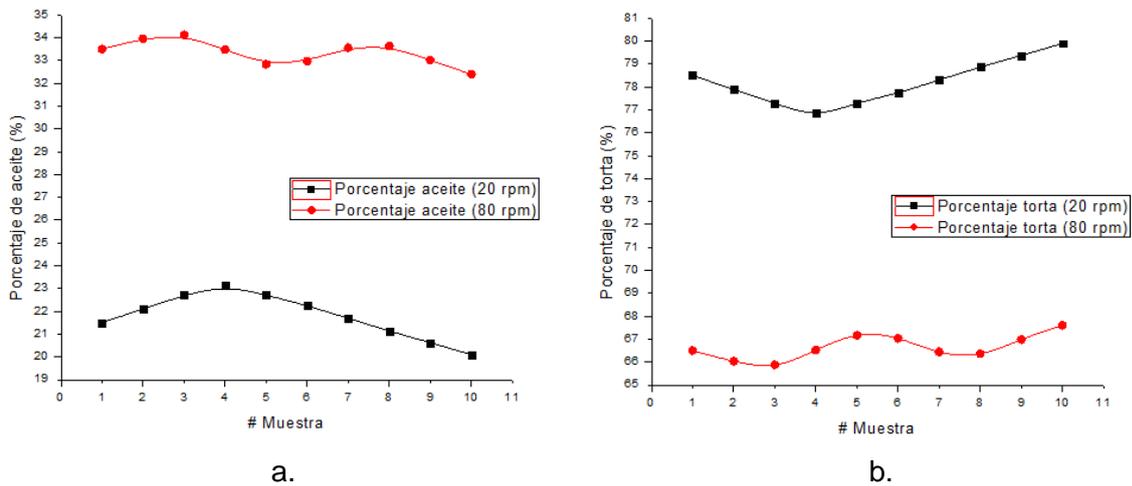


Figura 9. a) Porcentaje de aceite extraído, b) Torta residual para diferentes velocidades

4. Discusión

En la *Figura 7* se puede observar que al aumentar la velocidad de rotación del tornillo, aumenta la temperatura dentro de la cámara de extracción en un 70%. Esto se debe a que se produce mayor fricción entre la semilla y el tornillo. Lo cual valida experimentalmente el modelo matemático de la fuerza de fricción descrito en el efecto Stribeck que está representado en la ecuación 13.

$$f_f = b\dot{q} + fc \operatorname{sign}(\dot{q}) + fe \tag{13}$$

dónde:

b: coeficiente de fricción viscosa

fc: coeficiente de fricción de Coulomb

fe: coeficiente de fricción estática

\dot{q} : velocidad

Con respecto a la masa de aceite extraído con el dispositivo, se puede apreciar en la Figura 8, que esta aumenta en función de la velocidad del tornillo. Esto se puede justificar ya que la temperatura se incrementa de acuerdo con este parámetro, lo cual provoca la disminución de la viscosidad del fluido.

La viscosidad es un efecto del movimiento molecular en el interior del aceite, algunos fluidos tienen una alta dependencia de su viscosidad con la temperatura, de tal manera que un pequeño incremento puede dar como efecto un gran cambio. La dependencia es exponencial y se puede llegar a variaciones de hasta el 10% por cada grado centígrado modificado; la expresión más común es la de Arrhenius en la ecuación 14.

$$\eta = A e^{B/T} \quad (14) \quad (\text{IUPAC, 2014})$$

Dónde:

η : viscosidad

A y B: constantes del material de estudio

T: temperatura absoluta

Entonces, al disminuir la viscosidad del aceite, este fluye de mejor manera, lo cual permite que se mueva con mayor facilidad en la superficie inferior de la cámara de extracción lo que da como resultado que aumente la cantidad de fluido extraído.

Como subproducto del proceso de extracción se obtiene la llamada Torta, en la *Figura 8* se puede observar la masa de este residuo como resultado del proceso de extracción. Esta Torta constituye un residuo sólido granulado de la semilla que también puede ser aprovechado en el ámbito alimenticio para humanos y animales. Debido a que tanto el aceite como la torta provienen de la semilla, se puede apreciar que al aumentar la extracción de aceite disminuye la cantidad de torta y viceversa. Por lo cual la relación entre estos dos productos permite cuantificar el rendimiento del prototipo como se puede observar en la *Figura 9*. Hay que indicar que el promedio de extracción de aceite a 20 rpm es de 21.7% y a una velocidad de 80 rpm es de 33.4%, lo cual lleva nuevamente a apreciar la importancia de la temperatura en el proceso de extracción.

Otro factor de importancia en el rendimiento del proceso de extracción, es la procedencia de la semilla; el mayor rendimiento se observa con semillas provenientes de La Maná, con un valor de 23.2% para 20 rpm y 34.3% para 80 rpm.

5. Conclusiones y Recomendaciones

El prototipo implementado cumple con los requerimientos de la Norma ISO 22005 "Trazabilidad en la producción y la cadena de alimentos. Principios generales y guía para el diseño y desarrollo del sistema". (ISO, 2016).

El diseño de la máquina se realizó en función de la capacidad de producción, de tal manera que una mayor capacidad implica un tornillo de mayor diámetro.

El trabajo del prototipo a velocidades de 20 y 80 rpm, no superó en ninguna prueba la temperatura crítica de $45\pm 1^\circ\text{C}$, por lo cual 80 rpm es la velocidad recomendable para la extracción, y permite obtener el mayor rendimiento dentro de los rangos de temperatura para mantener intactas las características y propiedades físico-químicas del aceite.

Debido a que el diseño del prototipo es modular, es posible construir dados de presión con diferentes diámetros para poder realizar extracción de aceite con diversos tipos y tamaños de semilla.

La Torta residual del proceso de extracción puede tener aplicaciones en el sector alimenticio como masa para galletas o alimento de mascotas entre otras, por lo que es importante removerla del prototipo con cuidado para evitar que se contamine.

Es recomendable realizar la limpieza de la cámara de extracción después de cada carga, con el fin de evitar que se obstruyan los agujeros del tamiz por la solidificación de la torta residual.

Es importante tomar en cuenta la humedad de la semilla, para garantizar una buena calidad de aceite. Por lo que se recomienda implementar un secador de semillas para realizar un proceso de preparación que garantice la uniformidad y el valor adecuado de este parámetro de cada carga.

Bibliografía

- Adrianzén N., et al. (6 de 9 de 2011). Efecto de la temperatura y tiempo de tratamiento térmico de las almendras. *Agroindustrial Science*, 46-55.
- Ali N. et al. (31 de 10 de 2012). The Promising Future of Chia, Salvia hispánica L. *Journal of Biomedicine and Biotechnology*, 2012, 9. doi:10.1155/2012/171956
- Bailey A. (2010). *Aceites y grasas industriales*. Barcelona: Reverte S.A.
- Castaño D., Valencia M. (2012). Composición de ácidos grasos de sacha inchi (*plukenetia volúbilis* linneo) y su relación con la bioactividad del vegetal. *Revista Chilena de Nutrición*, 39(1), 45-52.
- Chasquibol N., et al. (2011). Estudios preliminares sobre la caracterización de aceites de semilla de Sacha Inchi (*Lukenetia Huayllabambana*), cultivados en la provincia de Roidriguez de Mendoza, departamento de amazonas Perú. *En CESIC (Ed.), 20th International Symposium on plant lipids/ISPL 2012* (pág. 166). Sevilla: Instituto de la grasa.
- Chirinos O., et al. (2009). Exportación de Sacha Inchi al mercado de EEUU. Lima: *Esan Ediciones*.

- Dávila D., et al. (2013). Extracción de aceites de las semillas de *Plukenetia Volubilis* L. "Sacha Inchi" rico en ácidos linolénico, linoléico y oléico por fluidos súper críticos (FSC). *Segundo encuentro de investigadores ambientales* (págs. 1-6). Arequipa: Ministerio de Ambiente del Perú.
- Drivesystems, N. (20 de 12 de 2015). NORD DRIVESYSTEMS. Obtenido de NORD DRIVESYSTEMS:
https://www.nord.com/cms/media/documents/catalogues_1/G2000_DE_EN_FR_2805.pdf
- Fanall C., Dugo L., Cacciola F. (2011). Chemical Characterization of Sacha Inchi (*Plukenetia volubilis* L.) Oil. *Journal Agricultural and food chemistry*, 59(24), 13043-9. doi:10.1021/jf203184y
- Groover, M. (2010). *FUNDAMENTOS DE MANUFACTURA MODERNA, Materiales, Procesos y Sistemas*. Estados Unidos: Prentice John Wiley & Sons, INC.
- Gutiérrez L., Rosada L., Jiménez L. (2011). Chemical composition of Sacha Inchi (*Plukenetia volubilis* L.) seeds and characteristics of their lipid fraction. *Grasas y Aceites*, 62(1), 76-83.
- Hibbeler R. (2010). *INGENIERÍA MECÁNICA, ESTÁTICA*. México: Prentice Hall, INC.
- Hibbeler, R. (2011). *MECÁNICA DE MATERIALES*. México: Prentice hall, INC.
- Hurtado, Z. (2013). ANÁLISIS COMPOSICIONAL DE LA TORTA Y ACEITE DE SEMILLAS DE SACHA INCHI (*Plukenetia volubilis*) CULTIVADA EN COLOMBIA. Palmira, Colombia: UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA.
- INSHT. (22 de 5 de 1989). Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. NTP 235: Medidas de seguridad en máquinas: criterios de selección. (P. B. Gonzálbez, Ed.) Madrid, Madrid, España: NIPO: 211 -90-011-7 . Obtenido de http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/201a300/ntp_235.pdf
- IPAC. (19 de 12 de 2016). IPAC.COM. Obtenido de IPAC.COM: <http://www.ipac-acero.com/producto-detalle.php?id=9>
- IUPAC. (10 de 02 de 2014). Compendium of Chemical Terminology Version 2.3.3. Carolina del Norte, Carolina del Norte, Estados Unidos. doi:10.1351/goldbook.A00446
- Lafont J., et al. (2011). Extracción y caracterización físico-química del aceite de la semilla del marañón (*Anacardium Occidentale*). Scielo, 51-58. doi:10.4067/s0718-07642011000100007
- Mott, R. (2006). *DISEÑO DE ELEMENTOS DE MÁQUINAS*. México: Pearson Educación.

National Instruments. (2 de 12 de 2016). Visualizar la Mecatrónica con la Plataforma de NI. Obtenido de National Instruments web site: <http://www.ni.com/white-paper/53253/es/>

NTP 151.400. (25 de 01 de 2009). Aceite de Sacha Inchi. NTP 151.400:2009. Lima, Perú: INDECOPI.

Organización Internacional de Normalización, (ISO). (2016). Trazabilidad en la cadena de alimentos para alimentación humana y animal — Principios generales y requisitos básicos para el diseño e implementación del sistema. Norma ISO22005:2007.

Pantoja L., et al. (16 de 11 de 2012). Caracterización del contenido de aceite de dos oleaginosas: Sacha Inchi (*Lukenetia Volubilis* L.) y Canola (*Brassica Napus* y *Brassica Rapa*). Tesis de pregrado. Quito, Pichincha, Ecuador: Universidad San Francisco de Quito.

Shigley, M. (2006). *DISEÑO DE INGENIERÍA MECÁNICA*. Estados Unidos: Mc Graw Hill.

UNAD. (2013). Universidad Nacional abierta y a distancia. Recuperado el 18 de 08 de 2016, de http://datateca.unad.edu.co/contenidos/211615/Modulo_exe/211615_Mexe/leccin_37_equipos_de_extraccin.html

Valenzuela A., Valenzuela R. (2014). Ácidos grasos omega-3 en la nutrición, cómo aportarlos? *SciELO*, 41(2), 205-211.

Valenzuela R., Barrera R., González-Astorga M., Sanhueza C., Valenzuela A. (2014). Alpha linolenic acid (ALA) from Rosa canina, sachá inchi and chia oils may increase ALA accretion and its conversion into n-3 LCPUFA in diverse tissues of the rat. *Food Function*(7), 1564-72. doi:10.1039/C3FO60688K