

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS  
FACULTAD TÉCNICA**

**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES  
Y APLICACIONES TECNOLÓGICAS**

**ASOCIACIÓN DE ORGANIZACIONES DE  
PRODUCTORES ECOLÓGICOS DE BOLIVIA**



**“PROTOTIPO DE EXTRUSOR DE  
QUINUA REAL PARA MICRO, PEQUEÑO  
Y MEDIANO PRODUCTORES”**

“PROTOTIPO DE EXTRUSOR DE QUINUA REAL PARA MICRO, PEQUEÑO Y MEDIANO PRODUCTORES”



Universidad Mayor  
de San Andrés



Facultad Técnica



Instituto de Investigaciones  
y Aplicaciones Tecnológicas



Asociación de Organizaciones de  
Productores Ecológicos de Bolivia

Presentado por:  
**M.Sc. Arturo Reynaga**



UNIVERSIDAD MAYOR DE SÁN ANDRÉS  
FACULTAD TÉCNICA

CARRERA DE QUÍMICA INDUSTRIAL

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES Y APLICACIONES TECNOLÓGICAS (IIAT)

ASOCIACION DE ORGANIZACIONES DE  
PRODUCTORES ECOLOGICOS DE BOLIVIA

---

## PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

---

# “Prototipo de extrusor de quinua real para Micro, pequeño y mediano productores”

**Financiado por:** Impuesto Directo a los Hidrocarburos IDH 2009

**Presentado por:** M Sc. Arturo Reynaga

**Equipo Investigador:** M.Sc. Ing. José Luís Soto  
Egres. Paola Tarqui  
Egres. Eddy Quiros

“PROTOTIPO DE EXTRUSOR DE QUINUA REAL PARA  
MICRO, PEQUEÑO Y MEDIANO PRODUCTORES”

Presentado por:

Lic. Arturo Reynaga N. (Coordinador del Proyecto)

**Equipo Investigador:** M.Sc. José Luis Soto  
Egres. Paola Tarqui  
Egres. Eddy Quiroz

**FINANCIAMIENTO:** IDH – 2009

**CONTRAPARTE:** AOPEB

**EJECUCIÓN INSTITUCIONAL:** Instituto de Investigaciones y Aplicaciones Tecnológicas,  
Facultad Técnica de la Universidad Mayor de San Andrés.

**Decano:** Lic. Rafael Onofre M.

**Vice Decano:** Ing. Víctor Hugo Herrera C.

**Coordinador del Proyecto:** Lic. ARTURO EDGAR REYNAGA NAVA



**Instituto de Investigaciones y Aplicaciones Tecnológicas (IIAT)**

**Director:** Lic. Pablo Castelú Ticona

**Responsable Nacional de la Unidad de Investigaciones AOPEB:** Ing. Giovanni Mita T.

**Primera Edición.** Tiraje 300 ejemplares

**D.L.:** N° DEPOSITO LEGAL 4-1-1810-12

**ISBN:** 978-99954-2-371-1

**Diseño y diagramación:** Pedro Benjamín Vilca Antezana

**Impresión:** Anakainoo Producciones Gráficas

*Impreso en La Paz – Bolivia. Febrero 2012*

**Como citar la publicación**

Reynaga A., J. L. Soto, P. Tarqui, E. Quiroz. 2012. PROTOTIPO DE EXTRUSOR DE QUINUA REAL PARA MICRO, PEQUEÑO Y MEDIANO PRODUCTORES. IDH – 2009.

Todos los derechos reservados. Se autoriza la reproducción y difusión de material contenido en este documento informativo para fines educativos u otros fines no comerciales sin previa autorización escrita de los titulares de los derechos de autor, siempre que se especifique claramente la fuente.

# Contenido

<b>Agradecimientos</b> .....	7
<b>Asociación de Organización de Productores Ecológicos de Bolivia AOPEB</b> .....	9
<b>Presentación</b> .....	11
<b>CAPITULO UNO</b>	
<b>Aspectos generales de la Investigación</b> .....	13
1.1- SUMMARY .....	14
1.2.- Antecedentes.....	14
1.3.- Justificación.....	15
1.4.- Objetivos .....	16
1.4.1.- Objetivo general .....	16
1.4.2.- Objetivos específicos.....	16
1.5.- Instituciones Involucradas.....	16
<b>CAPITULO DOS</b>	
<b>Diseño del prototipo de extrusor de Quinua Real</b> .....	17
2.- PARTE EXPERIMENTAL .....	17
2.1.- Parámetros de referencia.....	17
2.1.1.- EXTRUSOR DE MAÍZ DE NUESTRO MEDIO.....	18
2.1.2.- REVISION BIBLIOGRAFICA.....	18
2.2.- Características de los granos de quinua real .....	19
2.2.1.- Características físicas del grano de quinua real.....	21
2.2.2.- Viscosidad .....	21
2.2.3.- Proceso de extrusión de cereales .....	21
2.3. - ANÁLISIS DEL FLUJO .....	22
2.3.1.- Calentamiento .....	24
2.3.2. Flujo de arrastre .....	25
2.3.3.- Flujo de presión .....	27

2.3.4.- Flujo de fuga.....	30
2.3.5.- Flujo total.....	31
2.3.6.- Descarga libre.....	32
2.3.7.- Análisis del dado.....	32
2.3.8.- Punto de operación.....	33
2.3.9.- Eficiencia volumétrica del extrusor.....	35
2.3.10.- Potencia requerida.....	36
2.3.11.- Conclusión.....	36
<b>2.4.- DISEÑO DEL TORNILLO EXTRUSOR.....</b>	<b>38</b>
2.4.1.- Características del tornillo.....	38
<b>2.4.2.- Características del acero.....</b>	<b>38</b>
2.4.3.- Análisis por flexión.....	39
<b>2.4.4.- Análisis por torsión.....</b>	<b>41</b>
2.4.5.- Análisis por fatiga.....	44
<b>2.4.6.- Diseño del barril.....</b>	<b>48</b>
2.4.7.- Camisas del tornillo de extrusión.....	49
2.4.8.- Sistema de transmisión.....	50
2.4.10.- Rodamientos.....	52
2.4.10.1.- Rodamiento rígido de bolas.....	52
2.4.10.2.- Rodamiento de rodillos cónicos.....	52
2.4.11.- Tolva de alimentación.....	54
2.4.12.- Sistema eléctrico.....	55
<b>CAPITULO TRES</b>	
<b>Pruebas de funcionamiento del extrusor.....</b>	<b>57</b>
<b>3.- CARACTERISTICAS TECNICAS DEL PROTOTIPO.....</b>	<b>57</b>
<b>3.1.- PRUEBAS DE CALIBRACIÓN EN VACÍO.....</b>	<b>60</b>
3.1.2.- Equipo armado completamente sin matriz.....	60
3.1.3.- Equipo armado complemente más su matriz.....	61
<b>3.2.- PRUEBAS DE CALIBRACIÓN CON CARGA.....</b>	<b>61</b>
3.2.1.- Pruebas de extrusión con los tornillos de amasado, cocción de hilo simple y sin matriz....	61

3.2.2.- Prueba de extrusión con los tornillos de amasado, cocción de hilo simple con matriz de tres salidas de 3 mm cada una.....	62
3.2.3.- Determinación del caudal más adecuado para los tornillos de amasado, cocción de hilo simple.....	63
<b>3.2.4.- Prueba de extrusión con los tornillos de amasado y cocción de doble hilo.....</b>	<b>64</b>
<b>3.2.5.- Prueba de extrusión con los tornillos de amasado (hilo simple) y sin mezclador.....</b>	<b>65</b>
3.2.6.- Prueba de extrusión con la combinación de tornillos de amasado (doble hilo) y de cocción (hilo simple).....	66
3.2.7.- Prueba de extrusión con la combinación de tornillos de amasado (hilo simple) y de cocción (doble hilo).....	67
3.2.8.- Determinación del tamaño de grano más adecuado.....	68
3.2.13.- Registro de la temperatura de extrusión del equipo.....	68
3.2.14.- Determinación de la humedad más adecuada.....	69
3.2.15.- Influencia de la fibra en el extruido.....	69
<b>3.3.- EVALUACION DE LA MATERIA Y ENERGÍA EN LA EXTRUSIÓN.....</b>	<b>70</b>
3.3.1.- Balance de materia.....	70
3.3.3.- Cálculos del balance de energía.....	70
<b>CAPITULO CUATRO.....</b>	<b>73</b>
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>73</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>75</b>
<b>BIBLIOGRAFICAS.....</b>	<b>75</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>79</b>

# Agradecimientos

A la Universidad Mayor de San Andrés por apoyar y promocionar investigaciones que aporten con el desarrollo del país. A las autoridades de la Facultad Técnica representada por sus autoridades Lic. Rafael Onofre M.(DECANO), Ing. Víctor Hugo Herrera C. (VICEDECANO)

Al Instituto de Investigaciones y Aplicaciones Tecnológicas IIAT, a los Laboratorios de la carrera de Química Industrial (Facultad Técnica) donde se desarrollo los análisis de muestras y también se recibió el permanente apoyo de sus profesionales para cristalizar la ejecución del trabajo.

A los Laboratorios del Instituto de Investigaciones Mecánicas (Faculta de ingeniería), donde se desarrollo los análisis de muestras

A la Asociación de Organizaciones de Productores Ecológicos de Bolivia por todo el apoyo recibido en investigación.

Al Ing. Agroindustrial Giovanni Mita Ticona, responsable de transformación (AOPEB) por el apoyo incondicional al proyecto.

Al Técnico Tornero Carlos Layme por el apoyo, constancia, paciencia por los cambios, modificaciones, rectificaciones realizadas a las piezas del equipo.

A los directivos Cooperativa Agropecuaria "IRPA CHICO JALSURI Ltda" Altiplano Centro por todo el apoyo brindado especialmente en proporcionar la materia prima.

Al Ing. Marco Ruiz Gutiérrez, por el apoyo recibido en toda la investigación.

Al Lic. Edmundo Ovando, encargado de los Laboratorios de la Carrera de Química Industrial, por apoyo decidido y cooperación dentro el proyecto.

Al Lic. Pablo Castelú Ticona Director del Instituto de Investigaciones y Aplicación Tecnológicas.

A Griselda Andrade, secretaria del IIAT por su apoyo al proyecto.

A mi Familia por el apoyo, comprensión y su tiempo.

**Arturo Edgar Reynaga Nava**

## Asociación de Organización de Productores Ecológicos de Bolivia **AOPEB**

Se fundó en 1991 con la participación de EL CEIBO, ANAPQUI, CORACA IRUPANA, AGROPLAN, ACCOPCA, y MINGA. Su finalidad es llegar a mejorar el nivel de autoabastecimiento de los agricultores ecológicos a través de una agricultura ecológicamente sostenible. AOPEB presta todos los servicios requeridos por sus miembros.

La Asociación de Organizaciones de Productores Ecológicos de Bolivia, es una asociación civil nacional sin fines de lucro, que agrupa a productores ecológicos, pequeñas empresas y ONG's, cuyo objetivo institucional es la producción, transformación, comercialización y consumo de productos ecológicos bolivianos, de alta calidad y la mejora de las condiciones de vida de los productores Agropecuarios. En la actualidad agrupa a 82 organizaciones, abarcando a más de 60.000 productores ecológicos y en transición, distribuidos a nivel nacional.

### **VISIÓN DE AOPEB.**

Desarrollar un movimiento ecológico en la sociedad liderizado por AOPEB, que influya y participe cada vez más, en la toma de decisiones del Estado y la Sociedad. La visión, entendida como el horizonte que orienta su trabajo y como el “Objetivo de desarrollo al que aporta la existencia de la Asociación, es una sociedad sostenible, impulsada por la formación, fortalecimiento y desarrollo de un movimiento ecológico en la sociedad, liderizado por AOPEB, que influye y participa de forma cada vez más decisiva en la toma de decisiones en el Estado y la sociedad”.

## OBJETIVO INSTITUCIONAL.

La producción, transformación, comercialización y consumo masivo, de productos ecológicos bolivianos, de alta calidad para mejorar las condiciones de vida de los productores. Para su logro, lleva adelante las estrategias de fortalecimiento institucional, de normas y certificación, de mercadeo, de comunicación social y de relacionamiento. a través de actividades de asesoramiento, capacitación, elaboración de estudios y campañas, representación y gestión política

## DIRECTORIO AOPEB 2012

PRESIDENTE	Luís Viadez Taquicha
SECRETARIA GENERAL	Mary Carmen De La Cruz
TESORERO	Moisés Maquera
SECRETARIA DE GÉNERO	Ana Maria Condori
VOCAL	Santiago Fernández
GERENTE GENERAL AOPEB	Ing. Carmen Sotomayor Landa

## Responsable Nacional de la Unidad de Investigación AOPEB

Ing. Giovanni Mita Ticona

## MENSAJE:

“Los productos ecológicos son cultivadas mediante la agricultura ecológica, que es un sistema productivo sostenible, basado en el respeto con el medio ambiente, no utilizando agroquímicos y siguiendo las buenas practicas de agricultura, con el fin de precautelar la salud de los consumidores finales”.

# Presentación

Bolivia, país subdesarrollado exportador de materia prima y no así productos terminados con valor agregado, un claro ejemplo es el grano de quinua. Bolivia cuenta con más de 3000 accesiones de quinua, esto nos da una pauta de la riqueza natural de nuestro país pero debido a la falta de implementación de tecnologías más eficientes como la extrusión en los procesos de producción de alimentos pre cocidos andinos como la quinua, se ve limitado por diferentes factores como: la insuficiente información bibliográfica, investigación de extrusores en nuestro medio

Esta investigación tiene por objetivo el diseño y construcción de un prototipo de extrusor para quinua, debido a la falta de equipos diseñados y construidos para granos de quinua que existe en Bolivia.

La información será documentada y explicada a detalle en los siguientes capítulos, así como los resultados obtenidos en las pruebas mostrarán las fallas y los aciertos en el diseño y construcción del prototipo, de ahí se sacaran conclusiones y recomendaciones que podrán ser utilizadas a futuro.

La Paz, Diciembre 2011

*Arturo Edgar Reynaga Nava*

---

## CAPITULO UNO

# Aspectos generales de la Investigación

La implementación de tecnologías más eficientes como la extrusión, en la producción de alimentos pre cocidos andinos como la quinua, se ve limitado por diferentes factores como: la insuficiente información bibliográfica e investigación de extrusores en nuestro medio, las pocas empresas fabricantes de estos equipos restringen su acceso a esta tecnología por los costos altos de fabricación de estos equipos, peor aún el elevado costo que significa importar un equipo de extrusión y, en su mayoría de los equipos de extrusión son construidos para chisitos de maíz.

Todos estos factores inciden en nuestro aparato productivo de micro, medianos y pequeños productores de quinua, que se dedican a vender y exportar la quinua como materia prima, por la falta de adaptaciones tecnológicas de equipo y maquinaria requerida por nuestro sector industrial.

Con esta investigación, se pretende aportar al conocimiento científico técnico de la tecnología de la extrusión del milenario grano de quinua, para la generación e innovación de nuevos productos de quinua o a base de este.



## SUMMARY

The introduction of efficient technologies like the extrusion in the processing of Andean pre cooked meals such as the quinoa is limited by following different cause:

- not enough biographical information
- lack of national investigation of extruder
- few producer of extruder limit the access to this machines because of its higher cost of fabrication
- High cost of import of extruder
- The construction of extruder only for maize to obtain the “chisitos (snacks).
- This lacks of adapted technologies for this kind equipment and machines oblige all the quinoa producers to sell and export the quinoa as raw material.
- The aim of this investigation is to help with this technological and scientist knowledge to get more new and innovated products from this millenarian grain quinoa, based on this extrusion.

### 1.2.- Antecedentes

La extrusión es un proceso que combina diversas operaciones unitarias como el mezclado, la cocción, el amasado y el moldeado, viene del verbo extruir y se define como: el moldeado de un material por forzamiento, a través de una o muchas aberturas de diseño especial, después de haberlo sometido a un previo calentamiento. Por esto la extrusión en primer término se orientó hacia el moldeado de materiales plásticos blandos que pasan a través de un molde o dado de salida (Riaz, 2004).

El extrusor de alimentos es un aparato que facilita el proceso de moldeado y reestructuración para los ingredientes alimentarios. La extrusión es una operación unitaria altamente versátil que se puede aplicar a una variedad de procesos alimentarios. Los extrusores se pueden utilizar para cocer, moldear, mezclar, texturizar y formatear productos alimentarios bajo condiciones que favorecen la retención de la calidad, una alta productividad y un bajo costo. (Riaz, 2004)

Hoy en día, sus funciones de procesamiento pueden incluir transporte, mezcla, cizallado, separación, calentamiento o enfriamiento, formateado, co-extrusión, aireado de volátiles a humedad, generación de aroma, encapsulación y esterilización.

Las tecnologías de cocción por extrusión se utilizan en el procesamiento de cereales y proteínas en los sectores de alimentación y sectores relacionados estrechamente con alimentos extruidos, que incluyen el arrollamiento de fideos y las pastas de corteza de pastel, rollitos de carne picada dentro de envolturas naturales, el giro de la manivela de trituradoras de carne accionadas manualmente, alimentación para animales domésticos y piensos para peces.

La elección de la adecuada configuración del extrusor es crítica para el éxito de la extrusión. El fabricante del equipo de extrusión deberá ser capaz de atender las configuraciones hechas a medida para el procesamiento de un producto específico. Existen muchos tipos de extrusores, y cada uno tiene una gama específica de aplicaciones. Una elección inadecuada del extrusor para la aplicación específica muy raramente da como resultado un proceso operando de forma uniforme. (Guy, 2002)

Por los altos costos de esta tecnología y la baja disponibilidad de estos equipos en el medio, no se tiene productos elaborados de quinoa o a base de este, elaborados con esta tecnología en el mercado local ni nacional.

### 1.3.- Justificación

Bolivia, país exportador de materia prima y no así productos terminados con valor agregado, un claro ejemplo es el grano de quinoa. Bolivia cuenta con más de 3000 accesiones de quinoa, esto nos da una pauta de la riqueza natural de nuestro país pero debido a la falta de tecnología continuamos exportando como grano.

Los costos de importación de equipos de extrusión para todo tipo de productos y procesos no son nada accesibles para los pequeños y micro productores de quinoa, estos factores inciden en el desarrollo económico, peor aún si no somos capaces de desarrollar y construir equipos que requiere la industria nacional.

Los granos andinos como la quinoa constituyen una alternativa promisoría para cubrir las deficiencias nutricionales, especialmente, para la población infantil, ancianos, madres gestantes y lactantes, por cuya razón el uso de la quinoa instantánea es una opción para diversificar e innovar nuevos productos de este o a base de él, el extruido mejora significativamente la digestibilidad de los nutrientes e incrementa su vida útil.

El proceso de extrusión posee cualidades como: funcionalidad, versatilidad, alta productividad, bajos costos de operación procesamiento, productos de alta calidad, ahorro de energía, innovación en la producción de nuevos alimentos y menor superficie para instalación de infraestructura industrial.

La quinua boliviana se consume actualmente en 22 países de tres continentes, la demanda sigue en aumento a tal punto que en breve plazo podría superar las exportaciones de soya en ventas e ingresos. (Bolivianutrinet, 2008)

Esta tecnología por las características del proceso de alta temperatura y corto tiempo, la pérdida de nutrientes es mínima (Guy, 2002), el uso de esta tecnología mejoraría la calidad del producto conservando sus cualidades nutricionales, más aún se incrementaría las posibilidades de innovar nuevos productos de quinua, para ingresar a mercados de consumo masivo como son los alimentos instantáneos.

#### **1.4.- Objetivos**

##### **1.4.1.- Objetivo general**

- Diseñar y construir un prototipo de extrusor para quinua.

##### **1.4.2.- Objetivos específicos**

- Diseño del prototipo de extrusor adiabático.
- Cálculo de resistencia de materiales.
- Pruebas de extrusión con el grano de quinua.
- Balance de energía y materia.

#### **1.5.- Instituciones Involucradas**

La Facultad Técnica mediante su Instituto de Investigaciones y Aplicaciones Tecnológicas y la Asociación de Productores Ecológicos de Bolivia AOPEB.

## CAPITULO DOS

# Diseño del prototipo de extrusor de Quinua Real

## **2.- PARTE EXPERIMENTAL**

### **2.1.- Parámetros de referencia**

La insuficiente información bibliográfica e investigación de extrusores, en nuestro medio así como las pocas empresas fabricantes de estos equipos, dificultan el acceso a esta tecnología, peor aún el elevado costo que significa importar un equipo de extrusión. Todos estos factores inciden para el bajo desarrollo, adaptación tecnológica y construcción de extrusores en nuestro medio.

Los equipos de extrusión de construcción nacional son diseñados para la producción de chisitos de maíz. Para los parámetros de referencia del diseño del prototipo de extrusor se recurre al diseño de estos así como a la información bibliográfica.

### 2.1.1.- EXTRUSOR DE MAÍZ DE NUESTRO MEDIO

**Tabla 2.1. Parámetros del extrusor de maíz de nuestro medio**

Parámetro	Unidades	
Diámetro del tornillo	mm.	54,1
Paso de la zona de alimentación del tornillo	mm.	25
Paso de la zona de amasado y cocción del tornillo	mm.	13,5
Ancho del filete de la rosca del tornillo	mm.	5
Profundidad del canal del tornillo	mm.	3
Longitud del tornillo	mm.	349
Juego entre el tornillo y camisa	mm.	0,1-0,2

Fuente: propia

### 2.1.2.- REVISION BIBLIOGRAFICA

De la información bibliográfica tenemos los siguientes datos:

**Tabla 2.2. Condiciones típicas de procesado para productos de esfuerzo cortante alto**

Parámetros	Unidades	Valor
Extrusor	rpm	300-400
Temperatura del cilindro del extrusor	°C	120-160
Presión del cilindro del extrusor	Atm.	70-150
Caudal de alimentación de la harina de maíz seca	Kg/h	450
Humedad añadida dentro del extrusor	Kg/h	13
Humedad del producto extruido CHBH	%	8-10
Densidad aparente del producto extruido	g/l	48-64

Fuente: RIAZ, 2000. Extrusores en las aplicaciones de alimentos.

**Tabla 2.3. Clasificación de extrusores de tornillo único.**

Parámetros	Cizallamiento más bajo	Cizallamiento medio	Cizallamiento alto
Humedad del producto (%)	25-75	15-30	5-8
Densidad del producto (g/L)	320-800	160-510	32-200
Temperatura máxima del cilindro (°C)	20-65	55-145	110-180
Presión máxima del cilindro (Kg/cm <sup>2</sup> ) (KPa)	6-63 588-6178	21-42 2059-4119	42-84 4119-8238
Profundidad del canal (mm)	3-5,3	5-8,5	8-18
Canales de flujo paralelo (n)	1	2	2-3
Velocidad del tornillo (rpm)	Menor que 100	Mayor que 100	Mayor que 100
Conversión de energía (Kw/Kg)	0,01-0,04	0,02-0,08	0,10-0,16
Productos típicos	Productos de pasta. Aperitivos de tercera generación. Productos cárnicos y gomas.	Soya texturizada. Panificables. Alimentos expandidos para animales de compañía. Alimentos semi-húmedos para animales de compañía.	Aperitivos. Cereales para desayuno. Panificables. Picatostes. Almidones finos de ebullición.

Fuente: RIAZ, 2000. Extrusores en las aplicaciones de alimentos.

Por las características del grano de quinua a extruir, así como el producto instantáneo a producir se requiere de un extrusor de alto cizallamiento y condiciones adiabáticas de trabajo.

### 2.2.- Características de los granos de quinua real

El cultivo de la quinua real se remonta a épocas prehispanicas donde las culturas existentes le daban múltiples usos a los diferentes ecotipos y variedades como: en la medicina, forraje para el ganado, pero principalmente en diversas formas de su

alimentación, en la actualidad sigue siendo el alimento básico de muchos pueblos (Tapia 1979).

Actualmente se le está dando gran importancia a la quinua en la alimentación humana por su alto valor nutritivo. Desde el punto de vista nutricional y alimentario, la quinua es la fuente natural de proteína vegetal y de alto valor nutritivo por la combinación de una mayor proporción de aminoácidos esenciales, vitaminas, además de elevado contenido de minerales (PROINPA, 2004), y su potencial es muy grande por sus cualidades nutricionales, que alimentan y curan a la vez.

Para el proceso de extrusión es importante conocer el porcentaje de proteínas del grano puesto que estas juegan un papel importante en el grado de gelatinización, ya que al competir por el agua con el almidón puede hacer que éste se reduzca. También puede limitar el índice de expansión pues incrementa la capacidad de retención de agua, reduciendo la vaporización lo cual no favorece al índice de expansión (Kokini et al., 1992).

El contenido de Almidón está en función al fenotipo de quinua, varía desde 55% para el ecotipo Pisankalla, hasta 65.77% en el ecotipo Real Blanca. (Reynaga, 2010)

El porcentaje de proteína, materia grasa en el germen de quinua real está en función del fenotipo de quinua, teniéndose los siguientes valores: proteína, quinua Negra 29.98% y la variedad Blanquita 30.30%, materia grasa, ecotipo Toledo 18.87% y la variedad Aynoq'a 13.20%. (Reynaga, 2010)

El porcentaje de almidón y la composición del producto a extruir son sumamente importantes pues el contenido de almidón se relaciona directamente con el índice de expansión (Mercier et al., 1998). El autor menciona que el porcentaje mínimo para expandir es de 60 – 70 % y que en general el índice de expansión depende del porcentaje de almidón.

Según (Werner, 2007), las propiedades del almidón varían de lote en lote y dependen de las condiciones de crecimiento, cosecha y almacenamiento.

### 2.2.1.- Características físicas del grano de quinua real

Para el diseño del prototipo de extrusor se es necesario conocer su forma, diámetro, espesor, dureza, características físico químicas, funcionales de los granos de quinua.

- En su gran mayoría de los granos tienen forma cilíndrica y en menor proporción tienen formas elipsoidales, tabla 2.1, Anexo N°1.
- Los diámetros son desde 2.701 mm. hasta los granos de color de 0.9 mm. tabla 2.2, Anexo N°1.
- La densidad aparente de los granos fluctúan desde 1.11 hasta 1.25 gr/ml.
- El peso promedio de los granos de quina real, nos da una idea de la calidad del grano según la variedad y ecotipo, está por el orden de 10.67 miligramos hasta 5.32 miligramos. tabla 2.3 Anexo N°1

### 2.2.2.- Viscosidad

En la industria alimentaria es esencial conocer la viscosidad del fluido bajo tratamiento, esto ocurre en particular en aquellos procesos que implican calentamiento, enfriamiento homogenización y concentración; estos cambios en la viscosidad necesitan ser tenidos en cuenta cuando se diseñan estos procesos.

Cuando la relación no es lineal entre la fuerza de cizalla y el gradiente de cizalla a tales fluidos se denominan no newtonianos. Ejemplos de fluidos no newtonianos son las soluciones concentradas de macromoléculas almidones, proteínas, gomas. (Lewis 1993).

Por las características similares del maíz en contenido de almidón con respecto a la quinua asumimos el valor de la viscosidad de 233 cp (Guy 2002).

### 2.2.3.- Proceso de extrusión de cereales

Los principios básicos de la extrusión de alimentos están cercanamente relacionados a aquellos de la extrusión de polímeros sintéticos termoplásticos, no obstante, la naturaleza del material biológico con un comportamiento viscoso no newtoniano, marca una significativa diferencia. En la extrusión de plásticos, excepto en algunas reacciones de polimerización, la viscosidad generalmente disminuye cuando el polímero se funde;



por el contrario, en la mayoría de los materiales biológicos la viscosidad se incrementa cuando se eleva la temperatura.

La extrusión de alimentos en un sistema de cocción de alta temperatura en corto tiempo (HTS), es utilizado como medio de reestructurar material alimenticio con contenido de almidón y/o proteínas y de esta forma elaborar diferentes tipos de alimentos texturizados.

En este proceso, el alimento se somete a altas temperaturas, elevada compresión e intenso esfuerzo cortante (cizallamiento), en periodos cortos, las cuales producen entre otros, los siguientes fenómenos:

- Modificación de las características físicas, químicas y fisico-químicas de las macromoléculas.
- Fenómenos como la gelatinización, dextrinización del almidón, desnaturalización y/o texturización de las proteínas y la desnaturalización en menor proporción de macro moléculas sensibles como las vitaminas. (Riaz, 2004)

### 2.3. - ANÁLISIS DEL FLUJO

La fuerza de arrastre o fricción entre el material y la superficie interna de la camisa es mayor a menor rotación del material junto con el tornillo. Para aumentar la superficie de fricción se ha incrementado la longitud de la camisa. Así la relación de L/D en extrusores de un solo tornillo es muy importante, a mayor L/D significa mayor superficie de fricción, que a su vez significa mejor propulsión hacia adelante bajo las mismas condiciones de extrusión.

El material nunca se mueve a lo largo de la camisa en línea recta; siempre tendrá una cierta cantidad de rotación alrededor del tornillo en combinación con un movimiento de traslación a lo largo de la camisa.

En la práctica, esta fricción con el eje del tornillo y la camisa, conduce al flujo por arrastre del material fundido a lo largo del tornillo como resultado de las fuerzas de fricción, y es el equivalente al arrastre viscoso entre las placas estacionaria y móvil separadas por un medio viscoso, esto constituye la componente de transporte del extrusor.

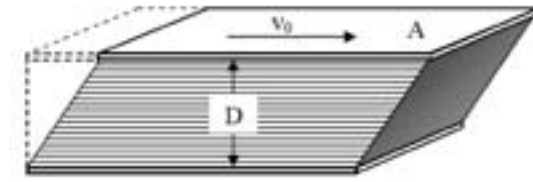


Figura 2.1. Desplazamiento del flujo de extrusión.

Se le opone la componente del flujo de presión, producido por el gradiente de presión, que hay a lo largo del extrusor. Teniéndose una mayor presión en el extremo del dado y baja en el extremo de la alimentación.

El componente final en el modelo de flujo es el **flujo de fuga**, hay un espacio finito entre el tornillo y la camisa a través del cual se puede fugar el material. Este es también un flujo impulsado por el gradiente de presión que también se opone al flujo de arrastre. Por lo tanto, el flujo total es el balance de estos componentes:

$$\text{FLUJO TOTAL} = \text{FLUJO DE ARRASTRE} + \text{FLUJO DE PRESIÓN} - \text{FLUJO DE FUGA}$$

Imaginemos un pequeño elemento de fluido, a una distancia de la placa estacionaria.

El cambio de flujo volumétrico,  $dQ$ , para este elemento está dado por:

$$dQ = V dx dy \quad (\text{Ecuación 2.1})$$

Asumiendo que el gradiente de velocidad es lineal, entonces la velocidad del elemento fluido está dado por:

$$V = V_d (y/H) \quad (\text{Ecuación 2.2})$$

Sustituyendo la expresión se tiene:

$$dQ = V_d (y/H) dx dy \quad (\text{Ecuación 2.3})$$

Integrando a toda la sección para encontrar el flujo total de arrastre  $Q_d$ :

$$Q_d = \int_0^e \int_0^H V_d(y/H) dx dy \quad (\text{Ecuación 2.4})$$

Donde:  $Q_d = 1/2THV_d \quad (\text{Ecuación 2.5})$

Ahora se aplica esta situación de placas paralelas al tornillo de extrusor. Se puede suponer el canal del tornillo como un canal similar, excepto que la disposición es en espiral, en la figura se muestra las dimensiones apropiadas y el pequeño elemento de fluido.

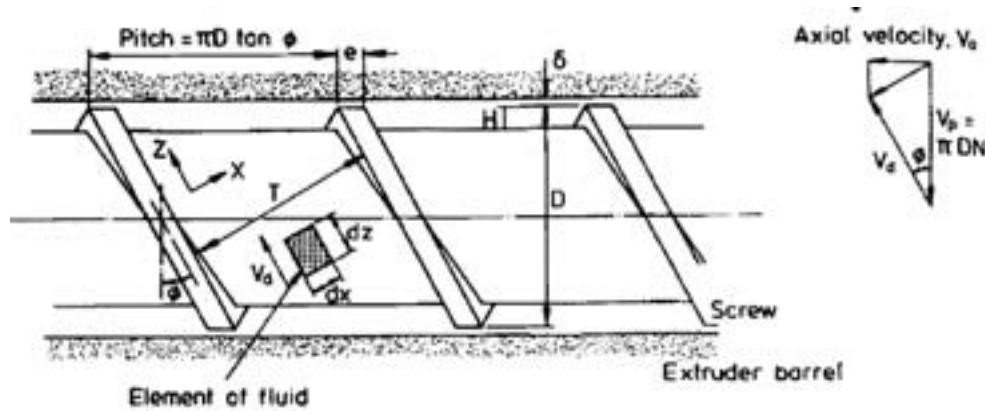


Figura 2.2. Detalle de la zona de dosificación, flujo de arrastre en un tornillo de extrusión.

La camisa simula a la placa estacionaria, y el tornillo giratorio, la placa móvil, el elemento de material fluido se halla entre la camisa y el tornillo giratorio, H es ahora la profundidad del canal, T es la distancia perpendicular entre hilos y N es la velocidad del tornillo en revoluciones por segundo (Beltrán y Marcilla 1999).

### 2.3.1.- Calentamiento

Para un extrusor de operación adiabática, el calor proveniente de la disipación viscosa, y de la operación isotérmica.

### 2.3.2. Flujo de arrastre

Debido a la fricción del material con el tornillo y las paredes de la camisa (cilindro), este flujo es el principal responsable del movimiento del material desde la tolva de alimentación hasta la boquilla, el material fundido en los canales se adhiere a las paredes internas del cilindro y del tornillo en rotación. Si solo existiera este flujo el perfil de velocidades sería aproximadamente lineal.



Figura 2.3. Perfil del flujo del material fundido en el extrusor.

El material durante el proceso se comporta por lo general como un fluido no-newtoniano de tipo pseudo plástico. Además, la viscosidad no es la misma en todos los puntos del canal, pues como en todo material pseudo plástico, la viscosidad disminuye al aumentar la velocidad de corte (Así la viscosidad será menor cerca de la pared del barril, donde la velocidad de corte es mayor, y será mayor hacia el interior del canal, donde la velocidad de corte es menor).

Finalmente, la velocidad del material en la pared del tornillo no es igual a cero, si así fuera, esta capa de material en la pared del tornillo permanecería indefinidamente en el interior del extrusor y se degradaría, y esto no sucede. Por lo tanto, el material tiene que deslizarse en las superficies metálicas del tornillo y de la camisa, este deslizamiento depende de la fricción entre el material y la superficie del tornillo y de la camisa.

$$v = \omega R, \text{ y como: } \omega = 2\pi N, \left[ N \left( \frac{\text{rev}}{\text{s}} \right) \right] \text{ resulta: } v = 2\pi NR = \pi ND$$

(Ecuación 2.6).

La velocidad de material fundido de quinua en el extrusor es de:

$$V = 1015.91 \text{ mm/s}$$

El movimiento angular del elemento de material fundido y las dimensiones pueden expresarse como funciones del ángulo del hilo

$$V_d = \pi DN \cos \Phi, \quad T = (\pi D \text{tag} \Phi - e) \cos \Phi$$

(Ecuaciones 2.7 y 2.8)

El movimiento angular del material fundido de quinua será:

$$V_d = 1005.26 \text{ mm/s}$$

Sustituyendo la ecuación 2.7 en la expresión se tiene:

$$Q_d = \frac{1}{2} THV_d = \frac{1}{2} H (\pi D \text{tag} \Phi - e) \cos \Phi \pi DN \cos \Phi = \frac{1}{2} \pi HDN (\pi D \text{tag} \Phi - e) \cos^2 \Phi$$

El flujo de arrastre en el prototipo de extrusor para quinua será de:

$$Q_d = 2999.516 \text{ mm}^3/\text{s}$$

Como el valor del ancho de filete  $e$  es pequeño en comparación con el paso del tornillo, se tiene que:

$$= \frac{1}{2} \pi HDN (\pi D \text{tag} \Phi) \cos^2 \Phi = \frac{1}{2} \pi^2 HD^2 N (\text{tag} \Phi) \cos^2 \Phi = \frac{1}{2} \pi^2 D^2 HN \text{sen} \Phi \cos \Phi = \frac{1}{4} \pi^2 D^2 HN \text{sen} 2\Phi$$

Es decir:

$$Q_d = \frac{1}{2} \pi^2 D^2 HN \text{sen} \Phi \cos \Phi = \frac{1}{4} \pi^2 D^2 HN \text{sen} 2\Phi$$

(Ecuación 2.9).

De la expresión (2.9) se deduce que el flujo de arrastre depende de:

- Diámetro del tornillo al cuadrado  $D^2$ .
- Velocidad del tornillo  $N$ .
- Profundidad del canal  $H$ .
- Angulo de la hélice  $\Phi$ .

O sea, fundamentalmente, (volumen del canal)  $\times$  (velocidad), con un factor de corrección debido al ángulo de hélice. El ángulo de hélice se fija de  $8^\circ.33'$ .

### 2.3.3.- Flujo de presión

El siguiente paso es de encontrar una expresión para el flujo de presión. Nuevamente, se observa un elemento finito de fluido en un canal entre placas paralelas y luego se aplica el resultado al canal de un extrusor. En la figura 2.4 se muestra el elemento de fluido viscoso en un gradiente de presión. Se supondrá que el ancho de las placas es grande en comparación con la separación entre ellas, de forma que el flujo se puede considerar unidireccional y la velocidad no dependerá del ancho  $x$ .

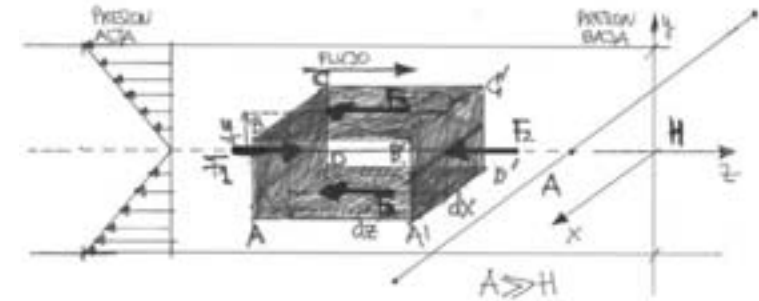


Figura.2.4 Flujo de presión entre dos placas paralelas

Considerando el equilibrio de un elemento ABCDA'B'C'D'. Las fuerzas que actúan sobre el son:

$$F_1 = \left( P + \frac{\partial P}{\partial z} dz \right) 2y dx, \quad F_2 = P 2y dx, \quad F_3 = \tau dz dx$$

(Ecuaciones 2.10, 2.11, 2.12)

**Donde:**

P, es la presión.

Y, es la tensión cortante que actúa sobre el elemento de fluido a la distancia y del plano central.

En flujo estacionario, las fuerzas están en equilibrio, con lo que:  $F_1 = F_2 + 2F_3$ .

No existe fuerza cortante que se oponga al movimiento en los planos ABA'B' y CDC'D', ya que al no variar la velocidad en la dirección x no hay desplazamiento relativo de láminas de fluido en esa dirección.

Sustituyendo los valores de las fuerzas se reduce a (supuesto que la presión varía en la dirección z únicamente):

$$\left( P + \frac{\partial P}{\partial z} dz \right) 2y dx = P 2y dx + 2\tau dz dx \quad \text{de donde:} \quad \tau = \frac{dP}{dz} dy$$

(Ecuación 2.13)

Si se supone que es un fluido newtoniano, entonces:

$$\tau_y = \eta \dot{\gamma} = \eta \frac{dV}{dy}$$

(Ecuación 2.14)

Al sustituir el valor en la ecuación (2.13) se tiene:

$$y \frac{dP}{dz} = \eta \frac{dV}{dy}, \quad \frac{dV}{dy} = y \frac{1}{\eta} \frac{dP}{dz}, \quad dV = \frac{1}{\eta} \frac{dP}{dz} y dy,$$

Integrando para encontrar el valor de la velocidad V:

$$\int_0^V dV = \frac{1}{\eta} \frac{dP}{dz} \int_{H/2}^y y dy \quad \text{de donde:} \quad V = \frac{1}{\eta} \frac{dP}{dz} \left( \frac{y^2}{2} - \frac{H^2}{8} \right)$$

(Ecuación 2.15)

La variación del flujo volumétrico dQ está dada por:

$$dQ = VT dy$$

(Ecuación 2.16)

Sustituyendo la ecuación anterior e integrando para obtener el flujo de presión Qp:

$$Q_p = 2 \int_0^{H/2} \frac{1}{\eta} \frac{dP}{dz} \left( \frac{y^2}{2} - \frac{H^2}{8} \right) T dy \quad \text{de donde:} \quad Q_p = -\frac{1}{12\eta} \frac{dP}{dz} TH^3$$

(Ecuación 2.17)

Ahora se puede usar esta expresión en el canal de un tornillo de un extrusor, teniendo en cuenta las siguientes expresiones:

$$T = \pi D \tan \Phi \cos \Phi$$

(Ecuación 2.18)

Asumiendo que e es pequeño comparado con el paso del tornillo:

$$\sin \Phi = (dL/dz) \quad \text{de donde:} \quad (dP/dz) = (dP/dL) \sin \Phi$$

(Ecuación 2.19)

Al sustituir la expresión (2.19) en la ecuación (2.17) resulta:

$$Q_p = -\frac{\pi DH^3 \sin^2 \Phi}{12\eta} \frac{dP}{dL}$$

(Ecuación 2.20)

Reemplazando para el prototipo de extrusor de quinua tenemos:

$$Q_p = 58390.167 \text{ mm}^3/\text{s}$$



De la expresión (2.20) se deduce, que el flujo de presión depende de:

- Las dimensiones del tornillo (al depender de la tercera potencia de la Profundidad del canal).
- El gradiente de presión.
- La viscosidad del fluido.

### 2.3.4.- Flujo de fuga

Debido a que el ajuste del tornillo con el tornillo no es perfecto. Este flujo tiene lugar entre las paredes de la camisa (cara interior del cilindro) y el filete del tornillo (tolerancia del tornillo), esta tolerancia es generalmente muy pequeña (aproximadamente 0.1 mm). El flujo de fuga normalmente es pequeño en comparación con el flujo de arrastre y el flujo de presión, por tanto, para la mayoría de los casos prácticos reales puede despreciarse en el cálculo del flujo total. Únicamente tiene significado práctico en máquinas desgastadas en las cuales se vuelve grande el espacio libre que hay entre el tornillo y la camisa.



Figura 2.5 Representación del flujo de fuga.

Para efectos de cálculo este tipo de flujo puede ser analizado como un flujo de presión entre planos con una separación  $\delta$ , una longitud  $\text{ecos}\Phi$  y una anchura  $\pi D/\text{cos}\Phi$ .

Puesto que se trata de un flujo de presión la derivación de las formulas es similar a lo realizado para el flujo de presión.

$$H = \delta, T = T = (\pi D/\text{cos}\Phi), \text{Gradiente de presión} = \Delta P / \text{ecos}\Phi \text{ (Ecuación 2.21)}$$

Se obtiene para el flujo de fuga,  $Q_L$ ,

$$Q_L = -\frac{1}{12\eta} \frac{\Delta P}{\text{e cos}\Phi} \frac{\pi D}{\text{cos}\Phi} \delta^3$$

(Ecuación 2.22)

El flujo de fuga ocurre debido a la presión diferencial  $\Delta P$ , existe a través de una sección tal que la CD. El incremento desde A hasta B viene dado por:

$$\Delta P_{AB} = \pi D \text{tag}\Phi (dP/dL)$$

(Ecuación 2.23)

Si el incremento de presión es lineal, entonces la presión diferencial que actúa en C perpendicularmente hacia A, a través de los bordes será proporcional a la relación:

$$\Delta P / \Delta P_{AB} = AC/AB = (AB - BC)/AB = ((\pi D/\text{cos}\Phi) - \pi D \text{tag}\Phi \text{sen}\Phi) / (\pi D/\text{cos}\Phi) = 1 - \text{sen}^2\Phi = \text{cos}^2\Phi$$

Por Tanto, 
$$\Delta P = \pi D \text{tag}\Phi \text{cos}^2\Phi (dP/dL)$$

(Ecuación 2.24)

Sustituyendo en la ecuación (2.22) tenemos:

$$Q_L = (\pi^2 D^2 \delta^3) / (12\eta \text{e}) * \text{tag}\Phi (dP/dL)$$

(Ecuación 2.25)

El flujo de fuga para el prototipo de extrusor de quinua será:

$$Q_L = 221.355 \text{ mm}^3/\text{s}$$

### 2.3.5.- Flujo total

Se puede encontrar fácilmente el flujo de salida total Q sumando las expresiones para el flujo de arrastre. El flujo de presión y el flujo de fuga.

$$Q = Q_D + Q_p - Q_L = 61168.328 \text{ mm}^3/\text{s}$$

Para muchos casos prácticos se obtiene suficiente exactitud despreciando el término debido al flujo de fuga y además se puede considerar el gradiente de presión lineal

### 2.3.6.- Descarga libre

En esta situación no existe presión acumulada ( $P = 0$ ) al final del extrusor con lo que la producción es máxima:

$$Q = Q_{MAX} = 1/2 \pi^2 D^2 H N \sin \Phi \cos \Phi \quad (\text{Ecuación 2.27})$$

La descarga libre para el prototipo de extrusor de quinua de un solo tornillo es de:

$$Q_{MAX} = 13657.225 \text{ mm}^3/\text{s}$$

La presión máxima esta dada por:

$$P = P_{MAX} = \frac{\left(\frac{1}{2}\right) \pi^2 D^2 H N \sin \Phi \cos \Phi}{\pi D H^3 \sin^2 \Phi / 12 \eta L} = \frac{C_1 \eta N}{C_2} = \frac{6 \pi \eta N D L}{H^2 \tan \Phi}$$

Reemplazando valores tenemos que la presión máxima es de  $P_{MAX} = 7.308 \text{ N s mm}^{-2}$

El punto de operación de una máquina de extrusión depende tanto de las características del tornillo como del dado, las cuales son opuestas.

### 2.3.7.- Análisis del dado

Se requiere una presión para que trabaje el dado que se encuentra en el extremo de salida del extrusor, es necesaria la presión simplemente para forzar el paso del material fundido (fluidizado) a través del dado. La característica del dado es, por lo tanto, opuesta en forma y la producción máxima se deberá a una presión máxima.

La salida de dados individuales depende, obviamente, de sus formas. En general:

$$Q = KP$$

(Ecuación 2.27)

Donde:

$K$  = Es el factor que depende de la forma. Para dados capilares cilíndricos

Para un capilar simple (dado cilíndrico), suponiendo el fluido newtoniano del caudal de salida del dado depende de la presión, como sigue:

$$Q = -\frac{\pi R^4}{8\eta} \frac{dP}{dz} = \frac{\pi R^4}{8\eta} \frac{P}{L_D} = KP$$

(Ecuación 2.28)

Donde:

$L_D$ , es la longitud del dado.

$R$ , su radio.

### 2.3.8.- Punto de operación

La ecuación (2.28) puede dibujarse en la misma figura (2.6) representativa de las características del tornillo, obteniéndose la representación de la figura.

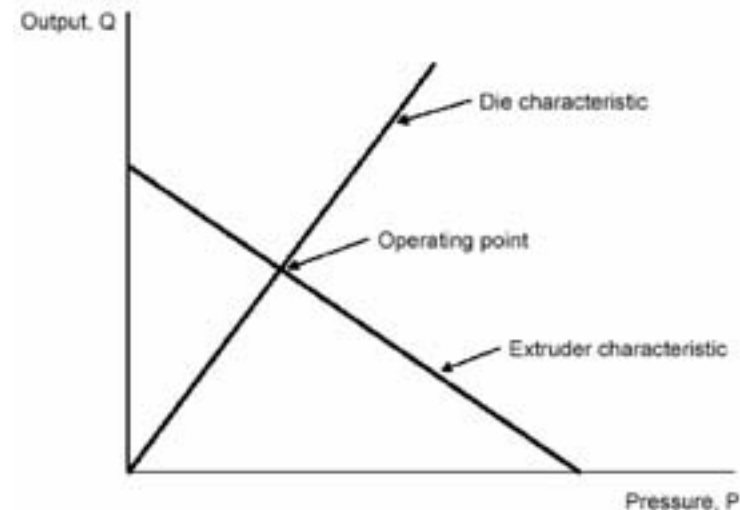


Figura 2.6 Características del extrusor y del dado. Punto de operación.

La intersección de las dos líneas rectas representativas de las características del tornillo y del dado, nos da el punto de operación de la máquina extrusora y es donde se hallan las condiciones óptimas de funcionamiento del extrusor.

La presión en el punto de operación viene dada por:

$$Q = \frac{1}{2} \pi^2 D^2 H \text{sen} \Phi \cos \Phi - \frac{\pi D H^3 \text{sen}^2 \Phi P}{12 \eta L} = \frac{\pi R^4 P}{8 \eta L_D}$$

(Ecuación 2.29)

De donde:

$$P_{OP} = \left[ \frac{2 \pi \eta D^2 N H \text{sen} \Phi \cos \Phi}{\left( \frac{R^4}{2 L_D} \right) + \left( \frac{D H^3 \text{sen}^2 \Phi}{2 L} \right)} \right]$$

(Ecuación 2.30)

La gráfica de la figura 2.6 nos permite analizar el efecto que producen los cambios de los valores de los parámetros. Las posiciones de las líneas de la gráfica se modifican por cambios en las condiciones de operación.

Un aumento en la viscosidad tiene un efecto opuesto sobre el caudal de salida del tornillo y del dado.

Un incremento en la velocidad del tornillo N, moverá la línea característica del tornillo hacia arriba. Lo mismo ocurre con la curva característica del dado al aumentar su radio (aumenta su pendiente). En ambos casos la capacidad de producción de la máquina extrusora aumentará, Reemplazando valores tenemos  $P_{OP} = 0.1795 N^* \text{ mm}^2$ .

### 2.3.9.- Eficiencia volumétrica del extrusor

La salida ideal del tornillo se obtiene cuando el material se mueve a lo largo del tornillo en la dirección axial sin que exista rotación. En este caso, la velocidad axial,  $V_a$ , del material es:

$$V_a = (\text{Paso de la Hélice}) (\text{Velocidad del Tornillo}) = \pi D \text{tag} \Phi N$$

De la figura 2.2 se deduce que la componente de la velocidad paralela a los rebordes del tornillo,  $V_d$  viene dada por:

$$V_d = (V_a / \text{sen} \Phi) = (\pi D N \text{tag} \Phi) / \text{sen} \Phi$$

(Ecuación 2.31)

De manera que la salida ideal es  $Q_{IDEAL}$ :

$$Q_{IDEAL} = (V_d) (\text{Secc. Transv. del reborde del tornillo}) = ((\pi D N \text{tag} \Phi) / \text{sen} \Phi) \pi D H \text{tag} \Phi \cos \Phi \quad (\text{Ecuación 2.32})$$

Y operando:

$$Q_{IDEAL} = \pi^2 D^2 N H \text{tag} \Phi = 279.289 \text{ mm}^3 \text{ s}^{-1}$$

(Ecuación 2.33)

La eficiencia volumétrica del tornillo puede expresarse como:

$$E_v = (Q_{MAX} / Q_{IDEAL}) = 1/2 \cos^2 \Phi = 0.489$$

(Ecuación 2.34)

Se observa que la eficiencia volumétrica solamente depende del ángulo de la hélice y para los casos más normales de tornillos con el paso igual al diámetro,  $\Phi = 17^\circ 40'$ , la eficiencia volumétrica es del 45.4%.

Si  $\Phi$  se hace  $8^\circ 33'$  más escarpado, la eficiencia sube sólo a un 48.5%, y disminuye la capacidad de tener una presión frontal útil en el dado. A valores más altos de  $\Phi$ , la eficiencia cae drásticamente.

### 2.3.10.- Potencia requerida

La potencia suministrada al tornillo se usa para transportar el material a lo largo de la camisa y para comprimirlo y torsionarlo. Puede ser estimada considerando la tensión cortante sobre el material fundido en la pared de la camisa y el área de contacto. La potencia requerida viene dada por:

$$\text{Potencia} = (\text{Velocidad Periférica}) (\text{Fuerza periférica}) = V_p F_p$$

(Ecuación 2.35)

De la figura 2.2. Se deduce:

$$V_p = \pi DN \text{ y } F_p = F_s / \cos \Phi$$

(Ecuación 2.36)

### 2.3.11.- Conclusión

Para el diseño de tornillo de extrusión de quinua:

El flujo de fuga calculado del tornillo con más sus mezcladores radiales es bajo con relación al flujo total.

La presión de operación está por debajo del límite de presión máxima, lo que nos da ha entender que las características físicas del acero son adecuadas para el diseño.

Características del diseño del tornillo y barril del extrusor de quinua:

Para optimizar, separar los procesos y clasificar el movimiento, transformación del material dentro del extrusor, el tornillo de extrusión tiene 3 zonas o secciones diferentes: zona de alimentación (inicial), zona de amasado (intermedia) y zona de cocción (final) – extrusión.

De las pruebas de extrusión de un prototipo con un cilindro sin estrías internas, por las características del grano, así como el producto a obtener, se requiere incrementar el

cizallamiento del material en el equipo, incrementando una rosca interna en la camisa, de 2mm de altura. Anexo N°1

Para incrementar más el efecto de cizallamiento entre el tornillo y el cilindro, la rosca interna será de paso contrario al tornillo de extrusor.

El mezclado se consigue haciendo pasar el material por diferentes zonas que lo obliguen a reorientarse. Las secciones de mezclado son simplemente tramos del tornillo dentro de la zona de dosificado que tiene una configuración especial para este propósito (Beltran y Marcilla 2000). Las secciones de mezclado deben cumplir los siguientes requisitos:

- Provocar una caída de presión mínima de modo que la presencia de la zona de mezclado afecte lo menos posible el caudal de material extruido.
- Evitar zonas muertas donde el material pudiera quedar estancado.
- Barrer la superficie del cilindro completamente

Los extrusores de maiz de construcción nacional no cuentan con estos tramos de mezclado, en nuestro caso para mejorar el mezclado del material dentro del extrusor, se incluyen 2 secciones de mezclado en el tornillo..

El primer mezclador está después de la etapa de alimentación o inicial, que consiste en un cinturón radial de 5 mm de profundidad del canal y un ancho de 30 mm. El segundo después de la etapa de amasado (intermedia) de la misma forma un cinturón radial de 1.2 mm. de profundidad del canal y un ancho de 30 mm.

Para el sistema de alimentación, los granos de quinua en su gran mayoría tienen forma cilíndrica seguido por la forma elipsoidal, con un diámetro que va desde 2.7 mm. hasta 0.9 mm. Para el diseño de la tolva de alimentación no se requerirá de características especiales de dosificación, por la forma del grano se tendrá un flujo regular. El diámetro de ingreso de alimentación al extrusor será:

$$D_{\text{alim.extrusor}} = D_{\text{quinua}} * 7 = 18.9 \approx 20 \text{ mm.}$$



## 2.4.- DISEÑO DEL TORNILLO EXTRUSOR

### 2.4.1.- Características del tornillo

Tabla 2.3 Características del tornillo de extrusión del prototipo

Parámetro	Unidades	
Diámetro del tornillo	mm.	59.7
Paso de la zona de alimentación del tornillo	mm.	25
Paso de la zona de amasado del tornillo	mm.	14.9
Paso de la zona de cocción del tornillo	mm.	12.7
Ancho del filete de la rosca del tornillo	mm.	5
Profundidad del canal zona de alimentación	mm.	6.9
Profundidad del canal zona de amasado	mm.	3
Profundidad del canal zona de cocción mm.		3
Longitud del tornillo	mm.	379
Juego entre el tornillo y camisa	mm.	0,1

Fuente: propia

### 2.4.2.- Características del acero

Para el diseño del prototipo se selecciona el acero AISI-SAE 1045.

**Descripción:** es un acero utilizado cuando la resistencia y dureza son necesarios en condición de suministro. Este acero medio carbono puede ser forjado con martillo. Responde al tratamiento térmico y al endurecimiento por llama o inducción, pero no es recomendado para cementación o cianurado. Cuando se hacen prácticas de soldadura adecuadas, presenta soldabilidad adecuada.

Por su dureza y tenacidad es adecuado para la fabricación de componentes de maquinaria.

#### Propiedades mecánicas:

- Dureza 163 HB (84 HRb)
- Esfuerzo de fluencia 310 MPa (45000 PSI)
- Esfuerzo máximo 565 MPa (81900 PSI)
- Elongación 16% (en 50 mm)
- Reducción de área (40%)
- Módulo de elasticidad 200 GPa (29000 KSI)
- Maquinabilidad 57% (AISI 1212 = 100%)

#### Propiedades físicas:

- Densidad 7.87 g/cm<sup>3</sup> (0.284 lb/in<sup>3</sup>)

#### Propiedades químicas:

- 0.43 – 0.50 % C
- 0.60 – 0.90 % Mn
- 0.04 % P máx.
- 0.05 % S máx.

**Usos:** los usos principales para este acero es piñones, cuñas, ejes, tornillos, partes de maquinaria, herramientas agrícolas y remaches.

### 2.4.3.- Análisis por flexión

Se puede considerar al tornillo como una viga soportando la carga de su propio peso y el material, la carga distributiva  $w$  se halla de la siguiente forma:

$$W = (W1 + W2)/L$$

(Ecuación 2.37)

**Donde:**

$W_1$ , es el peso de una carga de material fundido y su valor viene dado por las siguientes relaciones:

$$\text{Vol} = ((D^2 - d^2) * \pi L) / 4$$

(Ecuación 2.38)

**Donde:**

$V$ , es el volumen de la cámara que contiene al tornillo y este volumen lo multiplicamos por la densidad del material y la masa de una carga de material fundido la que al ser multiplicada por la gravedad da el peso.

El volumen de la cámara que contiene el tornillo:  $\text{Vol} = 202.723$  cc y una densidad de 0.823 gr/cc, teniéndose una masa de 166.84 gramos dentro el extrusor.

El área esta dada por:

$$A = (\pi d^2) / 4$$

(ecuación 2.35)

Se usa ( $d$ ) como diámetro de trabajo porque esté es el que realmente va a soportar las cargas provocadas por el material fundido.

De esta manera se tiene que el esfuerzo de la flexión está dado por (Shigley J. 1995).

$$\sigma = M_c / I$$

(Ecuación 3.36)

$$Z = I / C$$

(Ecuación 3.37)

$Z$  se define como el modelo de sección, entonces:

$$\sigma_f = M / Z$$

(Ecuación 3.38)

Para eje macizo (Silvia R. 1990)

$$Z = (\pi d^3) / 32$$

(Ecuación 3.39)

$$d = D - 2h_2$$

(Ecuación 3.40)

Reemplazando los valores correspondientes se tiene que:

$$d = 53.694 \text{ mm.}$$

$$A = 2.264 * 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$W_1 = 1.635 \text{ kg}$$

$$W = 0.0263 \text{ kg/mm.}$$

$$m = 4.654 \text{ N*m}$$

$$V = 48.990 \text{ N}$$

$$\sigma_f = 0.306 \text{ MPa.}$$

**2.4.4.- Análisis por torsión**

En el caso de una barra maciza, el esfuerzo cortante vale cero en el centro y es máximo en la superficie. Designado como  $r$  radio de la superficie exterior, se tiene que (Shirley J.1995).

$$T_f = T_r / J$$

(Ecuación 3.41)

$Y$  para una sección circular maciza:

$$J = (\pi d^4) / 32$$

(Ecuación 2.42)

Para determinar el  $\tau_{\max}$  se debe determinar primero el momento de torsión  $\tau$  a partir de la potencia a transmitir y la velocidad de un eje rotatorio, así para una potencia en Watts el momento de torsión viene dado aproximadamente por:

$$\tau = \text{Potencia} / (2\pi f)$$

(Ecuación 2.43)

La potencia se halla haciendo un pequeño balance energético en el cilindro o barril que contiene el tornillo extrusor, entonces (Incropera F. 1999).

$$\text{Pot} = mc\Delta T \quad (\text{Ecuación 2.44})$$

**Donde:**

m, es el flujo macizo de material en kg/h.

C, es el calor específico de la quinua BTU/lb°F.

$\Delta T$ , es la diferencia de temperatura que existe entre la entrada y la salida del cilindro.

Además el tornillo girara a 325 RPM.

En el estudio de esfuerzos combinados de torsión y flexión se tiene que usando el análisis del círculo de Mohr los esfuerzos son (Shigley J. 1995).

$$\tau_{\max} = (4V)/(3A) \quad (\text{Ecuación 2.45})$$

Y los esfuerzos principales serán:

$$\sigma_1 = \sigma_f / 2 + \tau_t \quad (\text{Ecuación 2.46}) \quad \text{y} \quad \sigma_2 = \sigma_f / 2 - \tau_t \quad (\text{Ecuación 2.47})$$

Para una viga sólida de sección circular se tiene que el esfuerzo cortante máximo de flexión será:

$$\tau_{\max} = (4V)/3A$$

(Ecuación 2.48)

Entonces para el caso de flexión y torsión combinados se tiene que el esfuerzo cortante total es igual a:

$$\tau_{\text{total}} = \tau_{\text{torsión}} + \tau_{\text{flexión}}$$

(Ecuación 2.49)

En el caso de torsión y flexión combinadas, el más crítico es la torsión, por esto se cumple que:

$$\tau_{\text{torsión}} \gg \tau_{\text{flexión}}$$

Reemplazando los valores correspondientes se tiene:

$$J = 8.157 \times 10^{-7}$$

$$\text{Pot} = 66.925 \text{ kw/h}$$

$$T = 1966.274 \text{ Nm}$$

Para el círculo de Mohr se tiene que:

$$\tau_{\max} = 200.395 \text{ MPa}$$

Los esfuerzos principales serán:

$$\sigma_1 = 129.367 \text{ MPa.}$$

$$\sigma_2 = -129.573 \text{ Mpa}$$

Así se tiene que el esfuerzo cortante de flexión será:

$$\tau_{\max} = 28.85 \text{ Mpa}$$

Entonces se cumple:

$$\tau_{\text{torsión}} \gg \tau_{\text{flexión}}$$

$$129.420 \text{ Mpa} \gg 28.850 \text{ Mpa}$$

Ahora:

$$\tau_{\text{total}} = 158.270 \text{ Mpa}$$

### 2.4.5.- Análisis por fatiga

Una falla por fatiga casi siempre da comienzo en una discontinuidad local, como una ranura, muesca grita u otra área de alta concentración de esfuerzos, cuando el valor del esfuerzo en la discontinuidad excede el límite elástico, se presenta deformación plástica. Para que ocurra una falla por fatiga deben existir deformaciones cíclicas de naturaleza plástica.

La clasificación de algunos de los factores que modifican el límite de fatiga, para tener en cuenta las más importantes de estas condiciones se emplea una diversidad de factores de modificación, de los cuales cada uno corresponde a un solo efecto. Con base en los anterior se tiene (Shigley 1995).

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e S_e'$$

Donde:

- $S_e$ , límite de resistencia a la fatiga del elemento mecánico.
- $k_a$ , factor de superficie.
- $k_b$ , factor de tamaño.
- $k_c$ , factor de carga.
- $k_d$ , factor de temperatura.
- $k_e$ , factor de efectos diversos.

**Factores de superficie  $K_a$  :**

Tabla 3.2 Valores de a y b para algunos tipos de superficie

ka	a (MPa)	b
Rectificado	1.58	- 0.085
Maquinado en frio	4.51	- 0.265
Laminado en caliente	57.7	- 0.718
Forjado	272	- 0.995

Fuente: Shigley J. 1995

$$K_a = aS_{ut}^b \text{ (Ecuación 2.50)}$$

$$\text{Reemplazando: } K_a = 0.7435 \text{ MPa}$$

**Factores de tamaño  $K_b$ :**

$$\text{Primer caso } (d/0.3) - 0.11333 \quad 0.11 \leq d \leq 2 \text{ in.}$$

$$\text{Segundo caso } (d/7.62) - 0.11333 \quad 2.79 \leq d \leq 51 \text{ mm.}$$

$$\text{En nuestro caso } d = 37.4 \text{ mm.}, \text{ nuestro } k_b \text{ será igual a: } K_b = 0.816$$

$$\text{El factor de carga } (k_c) \text{ para el caso de torsión y cortante es: } K_c = 0.577$$

Para la búsqueda del factor de tamaño se debe considerar que cuando las temperaturas de operación son mayores que la del lugar de trabajo, antes debe investigarse la fluencia porque la resistencia de fluencia disminuye muy rápido con la temperatura.

Por lo tanto cualquier esfuerzo inducirá flujo plástico en un material que opere con altas temperaturas; así que también debe tomarse en cuenta este factor. Por último, quizá resulte cierto que no exista límite de fatiga en materiales que operan con altas temperaturas, debido a la reducción en la resistencia a la fatiga, el proceso de falla depende del tiempo hasta cierto punto.

**Factor de temperatura Kd:**

Así tenemos que:

$$k_d = S_T / S_{RT}$$

(Ecuación 2.51)

**Tabla 3.2. Valores de los factores en función de la temperatura**

Temperatura en °C	$S_T / S_{RT}$
50	1.010
100	1.02
150	1.025
200	1.020
250	1.000
300	0.975
350	0.927
400	0.922
450	0.840
500	0.766
550	0.670
600	0.546

Fuente: Shigley J. 1995

Interpolando linealmente para una temperatura de 120°C tenemos que:  $K_d = 1.0219$

Además, uno de los motivos para emplear el factor de efectos diversos ( $k_e$ ), es tomar en cuenta la reducción en el límite de resistencia a la fatiga debida a todos los otros efectos; sin embargo, la verdadera razón de usarlo es que sirve de recordatorio de que deben considerarse dichos efectos, pues no se dispone de valores reales de ( $k_e$ ). Así nuestro tornillo estará sometido debido a la fuerte abrasión a un efecto diverso de corrosión y para este caso:

$$K_e = 0.90$$

Y tenemos que el límite de fatiga del elemento mecánico  $S_e$  es:

$$S_e = 0.504 S_{ut} \quad \text{para } S_{ut} \leq 1400 \text{ MPa} \quad S_e = 453.6 \text{ Mpa}$$

Reemplazando en el balance:

$$S_e = 145.941 \text{ Mpa}$$

Usando la teoría de falla de Goodman modificada se tiene que (Shigley 1995)

$$\sigma_a / S_e = \sigma_m / S_{ut} = 1/n$$

(Ecuación 2.52)

Y para el caso de flexión y torsión combinamos según Von Mises (Shigley 1995) se tiene que:

$$\sigma = (\sigma_x^2 + \tau_{xy}^2)^{1/2}$$

(Ecuación 2.53)

Acomodando esta ecuación para el caso de Goodman modificado, se tiene que:

$$\sigma_a = (3\tau_t^2)^{1/2} = 38.08 \text{ MPa}$$

(Ecuación 2.54)

$$\sigma_a = (\sigma_f^2 + 3\tau_t^2)^{1/2} = 41.88$$

(Ecuación 2.55)

Y se tiene un factor de seguridad de:

$$\eta = (S_{ut} + S_e) / (\sigma_a S_{ut} + \sigma_m S_e) = 3.85 \approx 4$$

(Ecuación 2.56)

El número de ciclos será:

$$N = (\sigma_f / a)^{1/b} =$$

(Ecuación 2.56)

Donde:

$$a = (0.9 S_{ut}/S_e) = 5.550 \text{ MPa}$$

(Ecuación 2.57)

$$b = - (1/3) \log (0.9 S_{ut}/S_e) = - 1.850 \text{ MPa}$$

$$N = 4746.88 \text{ ciclos.}$$

### 2.4.6.- Diseño del barril

El cilindro estará sometido a una presión interior de  $0.1795 \text{ N/mm}^2$ , debe ser lo suficientemente resistente para soportar la presión interior, así como el desgaste, corrosión y evitar la pérdida de calor durante el proceso.

El cilindro no soporta ninguna presión exterior y ningún tipo de esfuerzo externo.

El cilindro inicialmente será calentado por una resistencia de  $72 \Omega$  y  $600 \text{ Watts}$ . hasta los  $86^\circ\text{C}$ , después del cual se apaga,

Es un extrusor adiabático, todo el calor se genera por disipación viscosa de la entrada de energía mecánica.



Figura 2.7. Cilindro de pared gruesa.

Pero, es necesario considerar que, para aplicaciones generales, los esfuerzos radiales y de corte no son de magnitud considerable como para afectar los esfuerzos resultantes, por lo tanto, el  $\sigma_t$  se lo usa como criterio de diseño.

Y como el esfuerzo tangencial máximo  $\sigma_{t_{max}}$  ocurrirá en el radio interior, se tiene que

( $r = r_{int} = a$ ) según (Industrial Chemical Company 1992).

Siendo el espesor del cilindro de  $30 \text{ mm}$ .

Por las características adiabáticas de funcionamiento del extrusor y considerando la ubicación de funcionamiento, a  $3600 \text{ m.s.n.m.}$  donde las temperaturas ambiente es de  $14^\circ\text{C}$  es necesario incrementar este radio externo para evitar el enfriamiento del cilindro durante su funcionamiento se incrementara el radio en  $33\%$  más. Siendo el espesor del cilindro de  $45 \text{ mm}$ .

### 2.4.7.- Camisas del tornillo de extrusión



Fuente: propia



Fuente: propia

Figura 2.8. Camisas del tornillo de extrusión y sección de las camisas.

La camisa del tornillo de extrusión tiene una rosca interna derecha, paso  $12,7 \text{ mm}$ , altura de la rosca  $2 \text{ mm}$ . La mencionada rosca abarca un  $75\%$  del total de la longitud de la camisa.



### 2.4.8.- Sistema de transmisión

Tabla 2.8. Cálculo del sistema de transmisión por correas trapeciales D 120

Datos	Unidades	Resultados
Potencia del motor para cada correa	Hp	5,5
Número de correas	Unidad	2
Dimensiones		
a	mm	32
b	mm	19
Perímetro de la correa	mm	13715
Diámetro polea conducida	mm	380
Diámetro polea motriz	mm	190
Relación de transmisión		2:1
h	mm	30
c	mm	37
Ángulo de los flancos de la garganta	Grados	34

Fuente: propia

Son necesarias 2 correas trapeciales D 120 para el motor de 10 Hp.

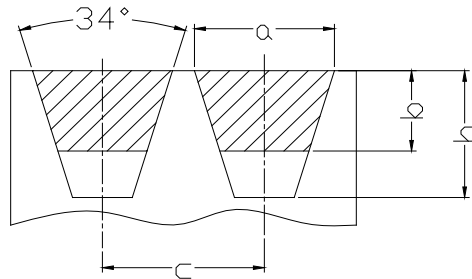


Figura 2.9. Sección de las correas trapeciales. (Casillas, 1988)

### 2.4.9.- Dilatación térmica

Tabla 2.9. Dilatación térmica del tornillo de extrusión.

Datos	Unidades	Resultados
Diámetro exterior final rectificado del tornillo	$d_i$ mm	59,7
Coefficiente de dilatación térmica del acero	$\alpha$ 1/K	0,000012
Temperatura ambiente	$t_i$ °C	20
Temperatura final	$t_f$ °C	150

Cálculos realizados			
$\Delta$ diámetro exterior del tornillo	$\Delta d$	mm	0,0931
Diámetro exterior final del tornillo	$d_f$	mm	59,7931

Fuente: propia

Tabla 2.10. Dilatación térmica de la camisa de extrusión.

Datos	Unidades	Resultados	
Diámetro interior final acabado de la camisa	$D_i$ mm	60	
Coefficiente de dilatación térmica del acero	$\alpha$ 1/K	0,000012	
Temperatura ambiente	$t_i$ °C	20	
Temperatura final	$t_f$ °C	150	
Cálculos realizados			
$\Delta$ diámetro interior de la camisa	$\Delta D$	mm	0,0936
Diámetro interior final de la camisa	$D_f$	mm	60,0936

Fuente: propia

Tabla 2. 11. Holgura entre el tornillo y la camisa de extrusión. en frío y en caliente.

En frío	Unidades	Resultados
Temperatura ambiente	$t_i$ °C	20
Holgura inicial entre tornillo y camisa	$H_i$ mm	0,3
En caliente		
Temperatura final	$t_f$ °C	150
Holgura final entre tornillo y camisa	$H_f$ mm	0,3005

Fuente: propia

La holgura varía 0,005 mm con el aumento de temperatura, por lo tanto no afecta de manera notoria a la diferencia existente entre el diámetro exterior del tornillo y el diámetro interior la camisa.

## 2.4.10.- Rodamientos

### 2.4.10.1.- Rodamiento rígido de bolas

Tabla 2.12 Vida nominal útil del rodamiento rígido de una sola hilera NTN 6008 ZZ. (Rodamientos, 2011)

Datos		Unidades	Resultados
Diámetro exterior del rodamiento	Dr	mm	68
Diámetro interior del rodamiento	dr	mm	40
Carga estática	cor	KN	11,5
Carga dinámica	cr	KN	16,8
Carga radial que soportara el rodamiento	fr	KN	3,4
Carga radial estática	fs	KN	0,2
Factor de velocidad	fn		0,65
Cálculos realizados			
Factor de vida con carga dinámica	fhd		3,2
Factor de vida con carga estática	fhe		57,5
Vida nominal en horas de operación con carga estática.	L <sub>10h</sub>	Horas	∞
Vida nominal en horas de operación con carga dinámica.	L <sub>10h</sub>	Horas	16500

Fuente: propia

Los cálculos mostrados en la tabla 2.12, son para la carga radial, porque para la carga axial los datos y cálculos obtenidos mostraron que el rodamiento rígido NTN 6008 ZZ no es el adecuado.

### 2.4.10.2.- Rodamiento de rodillos cónicos

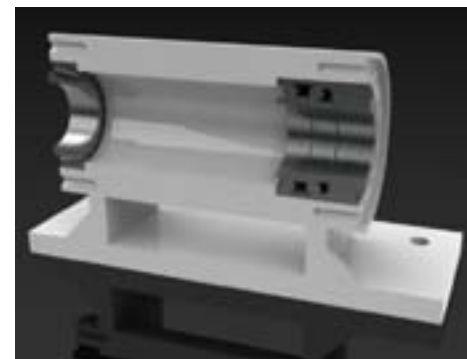
Tabla 2.13. Vida nominal útil del rodamiento cónico NTN 4T-32008X.

Datos		Unidades	Resultados
Diámetro exterior del rodamiento	Dr	mm	68
Diámetro interior del rodamiento	dr	mm	40
Carga estática	cor	KN	65,5
Carga dinámica	cr	KN	50
Carga radial que soportara el rodamiento	fr	KN	3,4
Carga radial estática	fs	KN	0,2

Carga axial que soportara el rodamiento	fa	KN	23,2
Y <sub>2</sub>			1,1
Y <sub>0</sub>			0,6
X			0,4
Y			1,1
Cálculos realizados			
Relación de cargas			6,8
Carga radial y axial dinámica obtenida	pr	KN	26,88
Factor de vida con carga dinámica	fhd		1,9
Factor de velocidad	fn		0,69
Vida nominal en horas de operación con carga dinámica	L <sub>10</sub>	horas	4150
Carga radial y axial estática obtenida	por	KN	0,1
Factor de vida con carga estática	fhe		655
Vida nominal en horas de operación con carga estática	L <sub>10</sub>	horas	∞

Fuente: propia

Los cálculos mostrados en la tabla 2.13, son para la carga radial y para la carga axial combinadas, los datos obtenidos muestran que el rodamiento cónico NTN 4T-32008X es el adecuado. (Rodamientos, 2011)



Fuente: propia



Fuente: propia

Figura 2.10. Rodamiento de rodillos cónicos y sección de la camisa con rodamientos.

### 2.4.11.- Tolva de alimentación



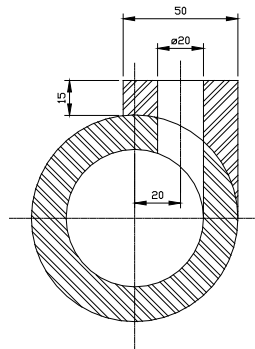
Fuente: propia  
Figura 2.11. Tolva cónica en 3D.

Tabla 2.14. Diseño de la tolva de alimentación.

Datos		Unidades	Resultados
Diámetro mayor	$D_t$	mm	240
Diámetro menor	$d_t$	mm	20
Altura de la tolva	$H_t$	mm	360
Densidad de la quinua Pandela (aproximado)	$\rho$	Kg/m <sup>3</sup>	823,83
Cálculos realizados			
Volumen	V	m <sup>3</sup>	0,0059
Masa lleno a tope	m	Kg	4,9

Fuente: propia

Es mejor una tolva con forma circular para que proporcione un flujo constante de quinua.



Fuente: propia  
Figura 2.12. Sección de la garganta de alimentación.

Como se ve en la figura 2.12, la garganta de alimentación debe ser circular y esta desplazada del eje del tornillo para facilitar la caída de la quinua al tornillo extrusor y esta al lado del sentido de giro del tornillo extrusor.

La garganta de alimentación ha sido diseñada para un caudal aproximado de 22 Kg/hora.

### 2.4.12.- Sistema eléctrico

Tabla 2.15. Datos nominales del motor ABB marca SIEMENS que se está utilizando.

Elemento	Nro. fases	Voltaje (V)	Frecuencia (Hz)	Velocidad (rpm)	Potencia (Kw)	Corriente (A)	Cos $\alpha$
Motor	3	380-440	50	1440	7,5	15,6	0,83

Fuente: propia

Tabla 2.16. Datos nominales del breaker.

Elemento	In(A)	Inbreaker(A)= 1,25* In(A)	Relé térmico	Norma	Nro. Polos	Modelo	Corriente (A)
Breaker	15,6	19,5	IEC 158-1	AC3	3	35 H	19

Fuente: propia

Tabla 2.17. Datos nominales del cable.

Elemento	In (A)	Inconductor(A)= 1,15*In(A)	Temp. Ambiente(C)	Tipo	Código	Corriente (A)
Cable	15,6	17,94	30	Cableado concéntrico	Co.1.TW.7.12	18

Fuente: propia

Tabla 2.18. Datos nominales del variador de frecuencia SIEMENS MM 420.

Elemento	Nro. fases	Voltaje (v)	Potencia (Hp)
Variador	3	380	10

Fuente: propia

Tabla 2.19. Resistencia eléctrica.

Elemento	Tipo	Voltaje (V)	Dimensiones (mm)	Potencia calorífica (W)
Resistencia eléctrica	Suncho	220	961x52	600

Fuente: propia

## CAPITULO TRES

# Pruebas de funcionamiento del extrusor

### **3.- CARACTERISTICAS TECNICAS DEL PROTOTIPO**

Descripción del presente prototipo de extrusor para quinua cuenta con un, apoyo principal del tornillo, tolva de alimentación, conjunto de tornillo y camisa de extrusión, sistema de transmisión, matriz, mesa de apoyo, motor, resistencia eléctrica y variador de frecuencia.

La tolva es el depósito de la materia prima antes de ser extruida, su capacidad estará relacionada al tiempo que se necesitara para que la máquina funcione con un caudal constante. La garganta de alimentación de la tolva estará en función del tamaño de grano y al caudal de alimentación.

El tornillo de extrusión es impulsado mecánicamente rotando en el interior de la camisa de extrusión, transporta el material por medio de los filetes del tornillo. La longitud del tornillo tendrá una relación menor 7:1 y mayor a 6:1 con el diámetro.

El material transportado en el interior del extrusor es sometido a cizallamiento, compresión, mezclado, amasado y cocción en los canales del tornillo de extrusión.

El tornillo de extrusión tiene 3 zonas o secciones diferentes: zona de alimentación, zona de amasado y zona de cocción – extrusión.

**Zona de alimentación**, en esta zona la materia prima ingresará al tornillo de extrusión por medio de la garganta de alimentación, y transporta el material.

**Zona de amasado**, en esta zona el material ingresado será cortado, comprimido y amasado. Además, cerca del final de esta zona se ubica el calentador.

**Zona de cocción – extrusión**, en esta el material será cocido y comprimido, es la zona donde se registrará la mayor temperatura. El espesor de la camisa del extrusor es importante para permitir la pérdida de calor de la camisa.

**La matriz**, permite la salida del material extruido por medio de la boquilla de 3 mm.

**Resistencia eléctrica**, se usará inicialmente para calentar el cilindro y tornillo, calentándose hasta los 86 °C

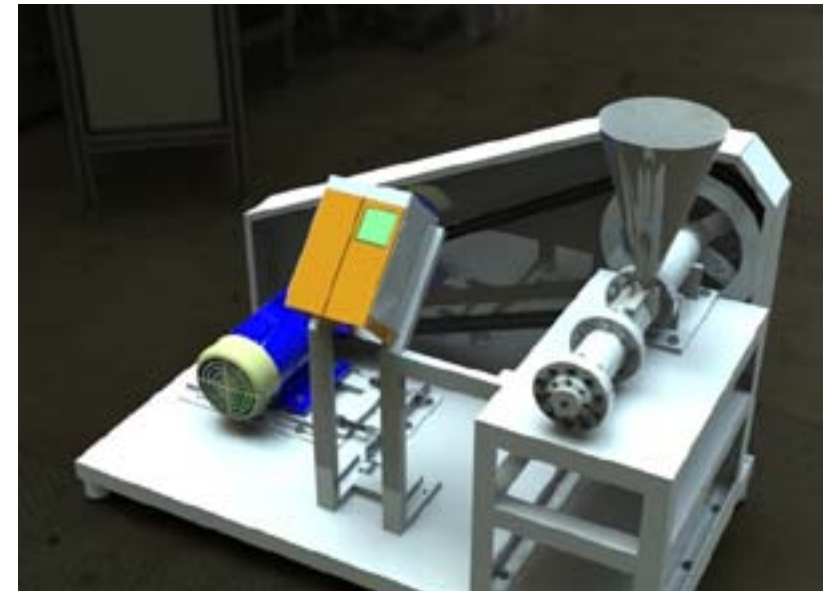
**Apoyo principal del tornillo**, es la parte donde descansará, todo el conjunto de camisa y tornillo de extrusión, el sistema de transmisión, la matriz, la tolva y otros accesorios. Y estará diseñado para permitir la rotación del tornillo de extrusión.

**Sistema de transmisión**, tendrá una relación de 2:1 y estará compuesto por una polea conducida, una polea motriz y un par de correas que transmitirán el movimiento de rotación del motor además de la potencia.

**Mesa de apoyo de la máquina extrusora**, es el elemento donde descansará todo lo referente al tornillo de extrusión, y cuando este se encuentre en movimiento o parado brindará estabilidad a todo la máquina.

**Variador de frecuencia trifásico**, es elemento que formará parte del sistema eléctrico y permitirá la regulación de la velocidad por medio de la variación de frecuencia, esto nos permitirá controlar la calidad del producto extruido.

**El motor trifásico**, la definición dice que transforma la energía eléctrica en energía mecánica capaz de transmitir movimiento de rotación para realizar un trabajo.



Fuente: propia

FIGURA 13.1. Diseño final del prototipo de extrusor en 3D.

Con el objetivo experimental de verificar los efectos que se tiene cuando el tornillo tiene diferentes profundidades de rosca, doble rosca, rosca sencilla, con y sin dispositivo de

mezclado y las combinaciones de estos en la etapa de amasado y cocción, se fabricaron varios tornillos como buges intercambiables que se fueron cambiando según las pruebas de funcionamiento con carga. Las características de los tornillos empleados para estas pruebas se encuentran en el anexo 2.



Fuente: propia

Figura 3.2. Tornillo simple de extrusión

### 3.1.- PRUEBAS DE CALIBRACIÓN EN VACÍO

#### 3.1.2.- Equipo armado completamente sin matriz

Para las pruebas a vacío, el equipo se arma sin matriz, se inicia su funcionamiento, primero lentamente, a una frecuencia de 5, verificando que no exista ningún rozamiento, ruido, que nos indique algún desperfecto, después de 10 minutos incrementamos la frecuencia hasta 30.

No se presenta ningún problema ni se percibe algún sonido extraño en la máquina, el motor le transmite movimiento al tornillo y este a su vez gira libremente, manteniendo la velocidad de rotación que le es transmitida.

#### 3.1.3.- Equipo armado complemente más su matriz

Para esta prueba se arma el equipo completo más su matriz, de la misma forma inicialmente se procede a funcionar a una frecuencia de 5 y posteriormente hasta 30.

Es necesario mencionar la diferencia de diámetro tanto interno de la camisa y externo del tornillo es menor a 1 mm, en caso de que el tornillo ensamblado presentara alguna inclinación o el acabado final del diámetro exterior de la rosca del tornillo fuera mayor al señalado en los planos, esto provocaría fricciones.

Concluyendo, no se tiene vibraciones, rozamientos o ruidos durante su funcionamiento a baja y alta frecuencia.

### 3.2.- PRUEBAS DE CALIBRACIÓN CON CARGA

#### 3.2.1.- Pruebas de extrusión con los tornillos de amasado, cocción de hilo simple y sin matriz

Para esta prueba con el equipo ya armado sin la matriz se procede a encender calibrando a 325 RPM. Sin previo calentamiento del cilindro, se alimenta quinoa ecotipo Toledo al 19% de humedad y un tamaño de grano de 2.66 mm. A un caudal de 0.72 kg/ min. Observándose a la salida de la última camisa del prototipo el extruido, no se percibe ningún sonido, vibración o rozamiento durante la extrusión del grano.



Fuente: propia

Figura 3.3. Producto extruido sin matrix.



Durante los primeros segundos se observa granos partidos de quinua, a medida que continúa la extrusión comienza a calentarse las camisas de cocción y amasado incluyendo al tornillo, llegando a una temperatura de 92°C.

### 3.2.2.- Prueba de extrusión con los tornillos de amasado, cocción de hilo simple con matriz de tres salidas de 3 mm cada una

Previo a la realización del ensayo, el tornillo y las camisas del extrusor fueron calentados con un soplete a gas hasta alcanzar una temperatura de 86°C. El primer ensayo se realizó con quinua ecotipo Toledo a 19% de humedad, a 325 RPM y un caudal de alimentación de 0,62 Kg/min.



Fuente: propia

Figura 3.5. Calentamiento previo del extrusor con soplete a gas.

Al cabo de 1 minuto de funcionamiento, el equipo se atascó e inmediatamente se procedió a desmontar las camisas. Observándose que el material extruido había saturado completamente las tres salidas, debido a la disposición de las tres salidas (de 3mm) distribuidas en la superficie de la matriz. Por la posición de las salidas y la falta del diseño adecuado que canalice la salida del extruido, se taponó con el mismo material.

Estas tres perforaciones de la matriz se tapa con soldadura, volviendo a tornearse una sola salida al centro de esta y para mejorar la disposición de salida se le da forma cónica, esto con el objetivo de facilitar la salida del material extruido.

Retomando las pruebas bajo las mismas condiciones con la matriz modificada, observándose mejoras en la salida del material del extrusor, concluyendo, es importante la disposición y canalización de la salida del material en la matriz.



Fuente: propia

Figura 3.6. Extrusor con matriz de tres salidas de 3mm.

### 3.2.3.- Determinación del caudal más adecuado para los tornillos de amasado, cocción de hilo simple

De la misma manera que el caso anterior, previo al ensayo se calienta el equipo hasta una temperatura de 86°C para quinua del ecotipo Toledo a 19% de humedad y 325 RPM.

Por la dificultad y el tiempo requerido para calentar con un soplete a gas el equipo, se implementa un sistema de calentamiento eléctrico que consiste en una resistencia tipo zuncho de 72.1  $\Omega$  y 600Watts, facilitando en gran parte el trabajo.

Tabla N° 3.5. Determinación del caudal de alimentación con quinua.

Ecotipo	RPM	Diámetro del grano (mm)	%Humedad inicial (preacondicionado)	Caudal de alimentación (Kg/min.)	IAA	ISA	Observaciones
Toledo	325	2,66	19	0,36	4,87	20,33	Presencia de granos de quinua
Toledo	325	2,66	19	0,48	5,20	20,75	presencia de granos de quinua
Toledo	325	2,66	19	0,6	3,90	13,98	Atorado
Toledo	325	2,66	19	0,72	3,90	12,60	Atorado

Fuente: propia

El caudal más adecuado para el proceso de extrusión es 0.48 kg/min. obteniéndose un extruido de 91% de gelatinización.



Fuente: propia

Figura 3.7. Sistema de calentamiento eléctrico de la camisa del extrusor.

### 3.2.4.- Prueba de extrusión con los tornillos de amasado y cocción de doble hilo

El equipo se calentó hasta una temperatura de 86 °C, se empleo el ecotipo Toledo acondicionado a 19% de humedad y 325 RPM, con una alimentación de 0.48kg/min.

Luego de 30 segundos de funcionamiento, el extrusor se detiene atorado, una vez desmontado el equipo, se observa que el grano de quinua no sufrió el cizallamiento esperado (molienda) en la zona de amasado, de la misma forma en la zona de cocción, se tiene presencia de granos de quinua enteros los cuales obstruyeron el orificio de salida de la matriz. Por efecto del doble hilo del tornillo, el tiempo de residencia es muy corto, es decir que el desplazamiento del material es más rápido.



Fuente: propia

Figura 3.8. Tornillo de amasado y cocción de doble hilo.

Podemos concluir, los tornillos de amasado y cocción de doble hilo no son adecuados para este tipo de proceso.

### 3.2.5.- Prueba de extrusión con los tornillos de amasado (hilo simple) y sin mezclador

El equipo se calentó hasta una temperatura de 86 °C, se empleo quinua el ecotipo Toledo acondicionado a 19% de humedad y 325 RPM, con una alimentación de 0.48kg/min.



Fuente: propia

Figura 3.9. Tornillo de hilo simple sin mezclador.

Del proceso de extrusión con este tornillo, se observa en el extruido la presencia de granos partidos de quinua obstruyendo por momentos la salida de la matriz.

Una vez desmontado el equipo se observa la presencia de granos partidos y un bajo cizallamiento del material, debido a la profundidad de los filetes.

El mismo tornillo se rellena con soldadura, después de un torneado de los filetes de 2.7mm. con estos cambios se retoma las pruebas con las mismas condiciones, teniéndose mejores resultados en el extruido de quinua con un grado de gelatinización de 86.33%, mismas que se pueden observar en la tabla 3.6.

**Tabla 3.6. Resultado de extrusión en entornillo de hilos simple sin mezclador y una altura de hilo de 2.7mm.**

Ecotipo	RPM	Diámetro del grano (mm)	%Humedad inicial (preacondicionado)	Caudal de alimentación (Kg/min.)	IAA	ISA	Observaciones
Toledo	325	2,66	19	0,36	6,57	19,43	Extrusión y expansión

Fuente: propia

Concluyéndose, las características del extruido mejora cuando la altura del filete disminuye, denotándose que para este diseño es necesario la implementación de un mezclado previo antes del amasado y de la etapa de cocción.

### 3.2.6.- Prueba de extrusión con la combinación de tornillos de amasado (doble hilo) y de cocción (hilo simple)

El equipo se calentó hasta una temperatura de 86 °C, quinua ecotipo Toledo acondicionado a 19% de humedad y 325 RPM, con una alimentación de 0.48kg/min.

Al cabo de 30 segundos de funcionamiento, el equipo se detiene, el tornillo de doble hilo en la zona de amasado ocasiona la rápida remoción del material, hacia la zona de cocción. Este material con bajo cizallamiento dificulta y obstruye la salida de la matriz.



Fuente: propia

Figura 3.10. Tornillo de amasado de doble hilo y cocción de hilo simple.

Podemos concluir que esta combinación de tornillos no es la adecuada.

### 3.2.7.- Prueba de extrusión con la combinación de tornillos de amasado (hilo simple) y de cocción (doble hilo)

El equipo se calentó hasta una temperatura de 86 °C, el ecotipo Toledo acondicionado a una humedad de 19% y 325 RPM, con una alimentación de 0.48kg/min.

Al igual que el caso anterior, el extrusor se detiene después de unos minutos, de la evaluación se observa un mejor cizallamiento en la zona de amasado con partículas de menor tamaño pero no uniformes. Al ingresar el material a la zona de cocción (tornillo de doble hilo) el cizallamiento del material es menor y la remoción de este hacia la matriz en más rápida, como consecuencia provoca la obstrucción de este, concluyendo que esta combinación no es adecuada para extrusión de granos de quinua.



Fuente: propia

Figura 3.11. Tornillo de amasado de hilo simple y cocción de doble hilo.

### 3.2.8.- Determinación del tamaño de grano más adecuado

Por las características del tamaño del grano de quinua de 2 a 2.66 mm. y con el objetivo de determinar los resultados del uso de partículas de mayor tamaño en el extrusor, se usa maíz frangollado de diferentes tamaños de grano para las pruebas.

El material se acondiciona Las condiciones realizar estas pruebas con maíz frangollado al 19% de humedad y un caudal de 0.6 kg/min.

Tabla 3.7. Determinación del tamaño de grano más adecuado para el proceso de extrusión de maíz

Descripción	RPM	Diámetro del grano (mm)	%Humedad inicial (preacondicionado)	ISA	IAA
Maíz frangollado Nº 1	288	4,5	25,5	5,27	15,19
Maíz frangollado Nº 2	350	4,5	25,5	6,03	16,87
Maíz frangollado Nº 3	437	4,5	25,5	5,35	13,33
Maíz frangollado Nº 4	437	2,8	25,5	6,98	16,34
Maíz frangollado Nº 5	350	2,8	25,5	7,929	26,15
Maíz frangollado Nº 6	288	2,8	24,2	7,04	23,87

Fuente: propia

De las pruebas se puede concluir que el mayor tamaño de partícula que el equipo puede extruir es de 2.8mm.

### 3.2.13.- Registro de la temperatura de extrusión del equipo

Para el registro de las temperaturas en diferentes partes del extrusor, se usaron termocuplas introducidas al interior de la camisa de las cuales se tiene los siguientes resultados.

Tabla 3.8. de temperaturas de trabajo durante la extrusión

Descripción	Temperatura en °C
Zona de amasado	90,9
Zona de cocción	126,5
Matriz de salida	109,76

Fuente: propia

Se observa mayor temperatura en la etapa de cocción donde la se tiene la gelatinización del almidón, y menor temperatura a la salida del matriz debido a la disipación de calor por salida del material extrusado.

### 3.2.14.- Determinación de la humedad más adecuada

Tabla 3.9. Humedad más adecuada para el proceso de extrusión de quinua

Ecotipo	%Humedad inicial (preacondicionado)	RPM	Granulo de almidón en micras	% Humedad final (extrusado)	Expansión del extrusado (mm)	IAA	ISA
Toledo	15	364	3,55	11,19	0,68	3,91	31,21
Toledo	19	364	3,55	9,15	1,03	4,3	29,35
Toledo	23	364	3,55	6	1,12	4,74	27,77

Fuente: propia

La humedad más adecuada para la cocción del almidón de quinua en el extruido es de 23% de humedad, con un grado de gelatinización del 91.57% de gelatinización del almidón.

### 3.2.15.- Influencia de la fibra en el extruido

La presencia de fibra en los diferentes ecotipos y variedades está en función al fenotipo, teniéndose mayores porcentajes de fibra para granos más oscuros, la influencia y efecto de la fibra en el extruido de quinua son: menor expansión del extruido y baja gelatinización del almidón, presencia de gránulos de almidón, presencia de fibra en el producto.

Tabla 3.10. Influencia de la fibra en el extruido

Ecotipos/ variedades	Humedad inicial preacondicionado (%)	Fibra cruda %	Granulo de almidón en micras	Contenido de Almidón %	Contenido de Amilosa %	RPM	% Humedad (prom)	Expansión (mm)	IAA	ISA
Real blanca	19	1,65	1,27	58,14	26,34	364	9,28	0,81	4,07	28,12
Kellu	19	1,16	1,8	55,69	27,66	364	11,51	0,79	3,61	29,88
Aynoqa	19	2,54	2,2	60,65	27,56	364	12,02	0,49	3,67	26,58
Chillphi	19	2,39	9,56	63,87	33,21	364	11,31	0,99	3,88	25,11
Utusaya	19	2,3	2,56	60,21	28,3	364	9,24	0,62	4,85	30,55

Pisankalla (altiplano Norte)	19	3,82	0,95	55,13	14,77	364	9,61	0,77	4,11	28,69
Pisankalla	19	3,82	0,95	55,13	14,77	364	11,51	0,56	4,16	28,13
*Rosa Blanca	19	1,66	2,11	65,77	27,34	364		0,78	3,34	25,59

Fuente: propia

### 3.3.- EVALUACION DE LA MATERIA Y ENERGÍA EN LA EXTRUSIÓN

#### 3.3.1.- Balance de materia

$$\sum me - \sum ms = \Delta msist.$$

$$\text{Caudal ent.} - \text{Caudal sal.} = \text{Acumulado}$$

#### 3.3.2.- Calculo de la humedad

$$mq * Xms + mw - me * Xme - mv$$

Reordenando y calculando tenemos:

$$me = 1.873 \text{ Kg/min.}$$

#### 3.3.3.- Cálculos del balance de energía

Utilizando Q para identificar el caudal de energía (energía por unidad de tiempo tal como kJ/h)

$$\sum Q \text{ entrada} - \sum Q \text{ salida} = 0$$

El calor específico de grano de quinua:

$$Cp = 1.7877 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$$

Calculo del contenido energético del agua usada para el pre acondicionado del grano

$$Q_{pre} = - 61.24 \text{ kJ/min}$$

Calculo de entrada de energía mecánica:

$$Q_{me} = 3006.83 \text{ kJ/min}$$

Cálculo de la energía consumida por la gelatinización del almidón:

$$Q_{ga} = -483.84 \text{ kJ/min}$$

Calculo de energía consumida por la desnaturalización de la proteína:

$$Q_{Prot} = - 665.28 \text{ kJ/min}$$

Calculo de la perdida de calor en forma de vapor a la salida del extrusor:

$$Q_{vap} = - 53.26 \text{ kJ/min}$$

Calculo de la perdida de calor del extrusado a la salida del equipo:

$$Q_{Extrusado} = - 81.24 \text{ kJ/min}$$

#### 3.3.3.1.- Balance de energía en el equipo de extrusión

$$\sum \text{entrada} - \sum \text{salida} = 0$$

$$Q_{me} - Q_{pre} - Q_{ga} - Q_{Prot} - Q_{vap} - Q_{extrus} = 1661.95 \text{ kJ/min}$$

Concluyéndose que la mayor cantidad de energía usada es para mantener el equipo a la temperatura de 120 °C y el 44% es usado para el calentamiento del producto. Teniendo de pérdidas de energía por el orden de 5%.



## CAPITULO CUATRO

# CONCLUSIONES

- El funcionamiento de la máquina demostró que todos los cálculos realizados para la construcción del extrusor se realizaron correctamente, confirmando su funcionalidad y resistencia, ninguna pieza del equipo sufrió daños a pesar de las pruebas extremas a las que fueron sometidas.
- La ubicación más adecuada para los orificios de salida de la matriz, es el centro además es necesario darle una disposición cónica.
- Las diferentes combinaciones de tornillos utilizados en el equipo a lo largo de las diferentes pruebas, indican que el tipo de tornillo más conveniente es el de hilo simple con una altura de filete de 7mm en la etapa de alimentación, 3mm en la etapa de amasado y 3 mm en la etapa de cocción.
- La adición de anillos de mezclador en el tornillo ha mejorado la homogeneidad del material dentro el extrusor
- El prototipo es un extrusor adiabático, que inicialmente requiere su calentamiento hasta 86°C, durante la extrusión posterior no requiere de calor adicional para proceso.
- Del balance de energía se puede concluir que más del 40% del calor generado disipación viscosa del material es usado para mantener caliente el equipo de extrusión.
- El caudal más adecuado para el proceso de extrusión es 0.48 kg/min. con un grado de gelatinización de 91%.
- La humedad más adecuada para la cocción del almidón de quinua en el extruido es de 23% de humedad, con un grado de gelatinización del 91.57% de gelatinización del almidón.



- La presencia de fibra en los diferentes ecotipos y variedades está en función al fenotipo, teniéndose mayores porcentajes de fibra para granos más oscuros, la influencia y efecto de la fibra en el extruido de quinua son: menor expansión del extruido y baja gelatinización del almidón, presencia de gránulos de almidón, presencia de fibra en el producto.

# REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

BOTTMAN IVAN, 2000, Catalogo General de Aceros.

BELTRAN M. y A. Marcilla Tecnología de Polímeros

CAF (Corporación Andina de Fomento), CID (Centro para el Desarrollo Internacional-Universidad de Harvard), CLACDS-INCAE (Centro Latinoamericano para la Competitividad y el Desarrollo Sostenible. 2001.

CASILLAS A. L. 1988. Máquinas. España, Madrid: Melsa. 645 p.

DE ANTONIO GÓMEZ, María Isabel. Tesis de extrusor memoria de cálculo.

DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR TECHNISCHE ZUSAMMENARBEIT. 1985. Matemática aplicada para técnica mecánica. Alemania. 178 p.

FAIRES, V. M. 1999. Diseño de elementos de máquinas. España, Barcelona: Montaner & Simon S.A. 802 p.

FARRELL, D. 1971. Extrusion equipment-types, functions and applications. symposium on extrusion: Process and product development, american association of cereal chemist, St. Paul, MN

HARPER, B. W. 1981. Extrusion of foods. Vols. I and II. Boca raton, FL: CRC Press, Inc.

HAUCK, B. W. 1985. Comparison of single and twin screw cooking extruders. Impulse food suppl.

[HTTP://bolivia./nutrient.org](http://bolivia./nutrient.org)

Industrial Chemical Company, Polietylene, Extrusion Film, Frist Edición, National Distillers and Chemical Corporation, USA, 1992.

JACOBESSEN S.E., MUJICA A. & PORTILLO Z. PROINPA. 2004. Primer taller internacional sobre la quinua. Perú,Lima. 457 p.

JOHNSTON, G. L. 1978. Technical and practical processing conditions with single screw/cooking extruders. paper presented at international seminar: cooking and extruding techniques. ZDS, Solingen-Grafeath, Germany.

KOKINI L., Chi-Tang Ho, Mukund V., 1992. Food extrusion science and technology.

KURT GEICK. 1995. Manual de formulas técnicas. México, D.F.: Alfaomega, 320 p.

LAST, J. 1979. Thermoplastic extrusion trials of some oilseed, legume and cereal proteins.

LINKO, P., P.Colonna, and C. Mercier. 1981. High temperature short-time extrusion. In: advances in cereal science and technology. Vol IV, Y. Pomeranz, ed., American Association of Cereal chemists. St. Paul, MN.

LOPÉZ VICENTE, José Manuel. 1988. Mecánica del taller – Materiales – Metrología I. España, Madrid: Cultural. 200 p.

LEWIS M.J., 1993. Propiedades de los Alimentos y de los Sistemas de Procesado. España: Acribia S.A. 498 p.

MANRIQUE QUEVEDO, Nancy. 2006. Tesis de grado. Producción de almidones pre gelatinizados a partir de mezclas de almidones de fuentes no convencionales usando un extrusor de doble tornillo. Tesis de Grado, Yautepec, Mexico. 85 p.

MERCIER, C. P. Linko, and J. M. Harper. 1998. Extrusion cooking. American Association of Cereal Chemists. Inc., St. Paul, MN.

MORAN FRANCO, Carlos Daniel. 2002. Adaptación tecnológica de una máquina extrusora de termoplásticos. Ecuador, Guayaquil. 171 p.

MOTT, Robert L. 1992. Diseño de elementos de máquinas. España: Prentice Hall. 500 p.

NIEMANN, G. Elementos de máquinas. España, Barcelona: Labor S.A. 393 p.

PROINPA, 2004. Procesos de elaboración y transformación en plantas procesadoras. Programa apoyo a la cadena de quinua Altiplano Sur. La Paz-Bolivia.

REYNAGA A., M. Quispe, A. Huarachi, I. Calderon, J. L. Soto y M. Torrez. 2011. Caracterización física – química de trece ecotipos de quinua real (*Chenopodium quinoa Willd*) del altiplano sur de Bolivia con fines agroindustriales. Convenio UMSA, Facultad Técnica, carrera Química Industrial – Cooperación Sueca ASDI/SAREC. La Paz – Bolivia.

RIAZ MIAN N. 2000. Extrusores en las aplicaciones de alimentos. España, Zaragoza: Acribia. S.A. 227 p.

ROBIN GUY. 2002. Extrusión de alimentos. España, Zaragoza: Acribia, S.A. 208 p.

ROKEY, G. 1995. Tecnología de la extrusión e implicaciones nutricionales. España, Barcelona.

ROSSEN, J L. and R. C. Miller. 1973. Food extrusion. Food Technol.

RUIZ PAUCAR, Freddy. Máquina extrusora de manguera negra. Ecuador, Quito. 57 p.

SCHAUM. Diseño de Máquinas. México: Latinoamericana. 307 p.

SERRANO, B. & HERING, R. 1993. Dibujo técnico normalizado. Bolivia, Oruro: Papiro. 412 p.

SMITH, O. B. 1976. Extrusion cooking. New protein foods. Altschul. New York: Academic Press.

SHIGLEY JOSEPH, 1995. Diseño en Ingeniería Mecánica, Cuarta Edición en Español. Mc. Graw Hill, México D.F.

SINGER FERDINAND L. 1995. Resistencia de Materiales, 4ta. Edición, Editorial Harla, México D.F.

TAPIA, Mario E., 1979. La Quinua y la Kañiwa cultivos andino. IICA, Bogotá-Colombia.

UGARTE P. F. 2006. Mecánica de fluido. Perú, Lima: San Marcos. 265 p.

VASQUEZ ANGULO, José Antonio. Análisis y diseño de piezas de máquinas con CATIA V5. España: Marcombo. 271 p.

WERNER, W. y E. Strobel, 1991. Compounding of thermoplastic starch with twin-screw extruders. 138-145.

ZAYA, Pierre & MUJICA SÁNCHEZ, Ángel. Informe final del proyecto quinua: cultivo multipropósito para los países andinos: PNUD-PROY /INT/ 01/K01-PERÚ.

# ANEXOS

## ANEXO N° 1

Tabla 2.3. Determinación de la forma de los granos de quinua real

Formas del grano	Cilíndrico	Elipsoidal	Cónico
Aynoca	XXX	-	-
Blanquita	XXX	-	-
Surumi	XXX	-	-
Toledo	-	XXX	-
Pandela	XXX	-	-
Rosa Blanca	-	XXX	-
Pisankalla	XXX	-	-
Q. Negra	-	XXX	-
Achachino	XXX	XXX	-
Kellu	-	XXX	-
Utusaya	XXX	-	-
Chillpi	XXX	-	-
Mocko	XXX	-	-
Ajara	-	XXX	-
Toledo	XXX	-	-
Real Blanca	XXX	-	-

Fuente: Reynaga, 2011.

Tabla 2.4 Determinación del diámetro y espesor de los granos de quinua real

Malla	N° 3		N° 4		N° 5	
Apertura de la malla	2,0 (mm)		1,5 (mm)		1,0 (mm)	
Observaciones	diámetro	espesor	diámetro	espesor	diámetro	espesor
Aynoca	2,701	1,164	2,160	1,138	1,922	0,913
Blanquita	0,000	0,000	2,083	1,100	1,789	0,908
Surumi	2,571	1,385	2,220	1,308	1,780	1,002

Toledo	2,690	1,438	2,160	1,286	1,885	0,985
Pandela	2,597	1,400	2,378	1,340	1,835	0,920
Pisankalla	2,602	1,396	2,336	1,292	1,872	0,945
Negra	0,000	0,000	2,328	1,345	1,895	0,100
Rosa Blanca	2,637	1,418	2,332	1,288	1,900	0,989
Chillpi Rosado	2,546	1,337	2,293	1,213	1,828	0,940
Mocko	2,599	1,459	2,238	1,229	1,880	1,018
Achachino	2,696	1,450	2,406	1,348	1,929	0,970
Kellu	2,655	1,386	2,290	1,282	1,884	1,005
Utusaya	2,502	1,337	2,376	1,287	1,887	1,031
Ajara	2,098	1,273	1,802	1,154	1,424	0,876
Toledo	2,661	1,456	2,398	1,278	1,856	0,991
Real Blanca	2,590	1,460	2,380	1,281	1,942	1,001

Fuente: Reynaga 2011.

Tabla 2.5 Determinación del peso promedio de los granos de quinua real

Variedad/ECotipo	Peso promedio de cada grano de quinua en mgr.
Aynoca	8,93
Blanquita	5,32
Surumi	8,90
Toledo	9,85
Pandela	9,76
Pisankalla	9,77
Negra	9,02
Rosa Blanca	9,73
Chillpi Rosado	9,53
Mocko	10,20
Achachino	10,67
Kellu	10,29
Utusaya	9,74
Ajara	5,52
Toledo	6,57
Real Blanca	8,00

Fuente: Reynaga, 2011.

Tabla 2.6 Determinación de la densidad aparente de los granos de quinua real

Variedad/ECotipo	Densidad aparente (g/ml)
Aynoca	1,11
Blanquita	1,11
Surumi	1,17
Toledo	1,21
Pandela	1,21
Rosa Blanca	1,21
Pisankalla	1,25
Q. Negra	1,21
Achachino	1,17
Kellu	1,17
Utusaya	1,25
Chillpi	1,25
Mocko	1,25
Ajara	1,25
Real Blanca	1,21

Fuente: Reynaga, 2011.

Tabla 2.7 Altura de la rosca interna (estriás) de la camisa del prototipo de extrusor

Rosca interna de la camisa	RPM	Temperatura en la camisa (°C)	Observaciones
	325	65	No extruye, reduce de tamaño de partícula (molienda gruesa)
0.1 mm.	325	91	Extrusión a medias con partículas de grano de quinua
0.2 mm.	325	120	Extrusión de los granos de quinua

Fuente: propia

Tabla 3.1 Tornillo de hilo simple

Diámetro (mm)	59,7
Longitud (mm)	379
Relación de longitud y diámetro	6,3
<b>Zonas</b>	
Zona de alimentación (mm)	174,8
Zona de amasado (mm)	125,4
Zona de cocción y extrusión (mm)	79,8
Para la fabricación del tornillo	
Longitud del primer paso con su mezclador(mm)	153
Longitud del segundo paso con su mezclador(mm)	115
Longitud del tercer paso con parte cónica (mm)	111
Longitud de la parte cónica (mm)	60
<b>Parte cónica</b>	
Diámetro menor (mm)	51
Diámetro mayor (mm)	59,7
Relación de la conicidad	0,85
Conicidad %	14,5
<b>Dimensiones del paso</b>	
Zona de alimentación. Primer paso (mm)(rosca derecha)	25
Zona de amasado. Segundo paso (mm)(rosca derecha)	15
Zona de cocción y extrusión. Tercer paso (mm)(rosca derecha)	12,7
Ancho de la cara del filete en todo el tornillo(mm)	5
Altura del filete al comienzo del tornillo(mm)	7
Altura del filete al final del tornillo antes de parte cónica(mm)	3
Altura del filete en la parte cónica(mm)	3

Fuente: propia

Tabla 3.2. Tornillo de hilo simple sin mezclador con mayor altura de los filetes al final de tornillo

Diámetro (mm)	59,7
Longitud (mm)	379
Relación de longitud y diámetro	6,3
<b>Zonas</b>	
Zona de alimentación (mm)	174,8
Zona de amasado y cocción (mm)	205,2
Para la fabricación del tornillo	
Longitud del primer paso con su mezclador(mm)	153
Longitud del segundo paso con su parte cónica (mm)	226
Longitud de la parte cónica (mm)	60
<b>Parte cónica</b>	
Diámetro menor (mm)	51
Diámetro mayor (mm)	59,7
Relación de la conicidad	0,85
Conicidad %	14,5
<b>Dimensiones del paso</b>	
Zona de alimentación. Primer paso (mm)(rosca derecha)	25
Zona de amasado y cocción. Segundo paso (mm)(rosca derecha)	15
Ancho de la cara del filete en todo el tornillo(mm)	5
Altura del filete al comienzo del tornillo(mm)	7
Altura del filete al final del tornillo antes de parte cónica(mm)	4.1
Altura del filete en la parte cónica(mm)	4.1

Fuente: propia

Tabla 3.3. Tornillo de hilo simple sin mezclador con menor altura de los filetes al final de tornillo

Diámetro (mm)	59,7
Longitud (mm)	379
Relación de longitud y diámetro	6,3
<b>Zonas</b>	
Zona de alimentación (mm)	174,8
Zona de amasado y cocción (mm)	205,2
Para la fabricación del tornillo	
Longitud del primer paso con su mezclador(mm)	153
Longitud del segundo paso con su parte cónica (mm)	226
Longitud de la parte cónica (mm)	60
<b>Parte cónica</b>	
Diámetro menor (mm)	51
Diámetro mayor (mm)	59,7
Relación de la conicidad	0,85
Conicidad %	14,5
<b>Dimensiones del paso</b>	
Zona de alimentación. Primer paso (mm)(rosca derecha)	25
Zona de amasado y cocción. Segundo paso (mm)(rosca derecha)	15
Ancho de la cara del filete en todo el tornillo(mm)	5
Altura del filete al comienzo del tornillo(mm)	7
Altura del filete al final del tornillo antes de parte cónica(mm)	2,7
Altura del filete en la parte cónica(mm)	2,7

Fuente: propia

Tabla 3.4. Tornillo de doble hilo

Diámetro (mm)	59,7
Longitud (mm)	379
Relación de longitud y diámetro	6,3
<b>Zonas</b>	
Zona de alimentación (mm)	174,8
Zona de amasado (mm)	125,4
Zona de cocción y extrusión (mm)	79,8
<b>Para la fabricación del tornillo</b>	
Longitud del primer paso con su mezclador(mm)	
Longitud del segundo paso con su mezclador(mm)	115
Longitud del tercer paso con parte cónica (mm)	111
Longitud de la parte cónica (mm)	60
<b>Parte cónica</b>	
Diámetro menor (mm)	51
Diámetro mayor (mm)	59,7
Relación de la conicidad	0,85
Conicidad %	14,5
<b>Dimensiones del paso</b>	
Zona de alimentación. Primer paso (mm)(rosca derecha)	25
Zona de amasado. Segundo paso (mm)(rosca derecha)	15
Zona de cocción y extrusión. Tercer paso (mm)(rosca derecha)	12,7
Ancho de la cara del filete en todo el tornillo(mm)	5
Altura del filete al comienzo del tornillo(mm)	7
Altura del filete al final del tornillo antes de parte cónica(mm)	3
Altura del filete en la parte cónica(mm)	3

Fuente: propia



Figura 1. Tornillo simple de extrusión con sus tornillos intercambiables.



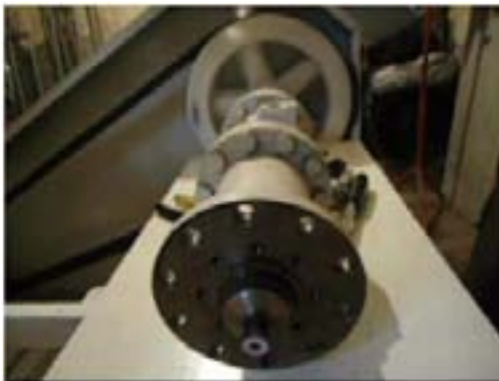
Fuente: propia

Figura 3.2. Tornillo simple y la camisa de alimentación.



Fuente: propia

Figura3.3. Tornillo simple de extrusión con su camisa de alimentación y camisa de amasado.



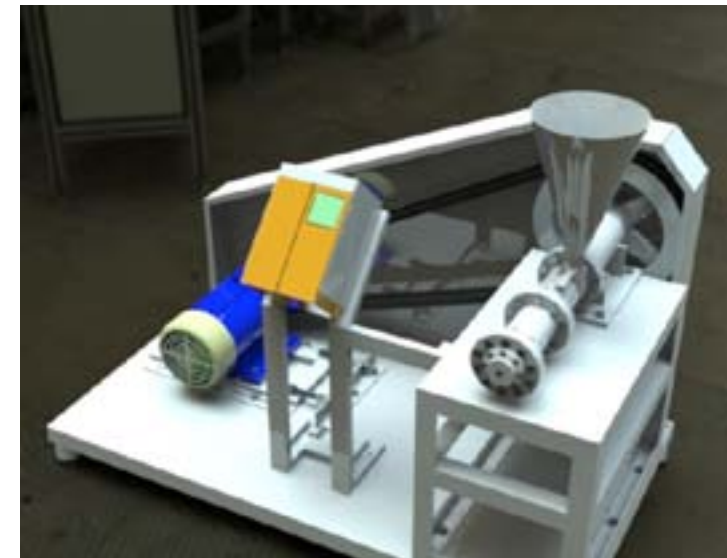
Fuente: propia

Figura3.4. Tornillo simple de extrusión con su camisa de alimentación y camisa de amasado y su troquel armado.



Fuente: propia

### CONSTRUCCIÓN DEL EXTRUSOR PARA QUINUA



Fuente: propia

La figura 3.6 es un diseño final 3D tentativo para la construcción del prototipo.

Figura 3.7. Cortando cilindro con amoladora y cilindros para camisas.



Fuente: propia  
 La figura 3.7 muestra el comienzo de la construcción del prototipo en el taller de Sr. Jorge y TS. Carlos Laine ubicado en El Alto Zona Rio Seco. También los cilindros macizos ya cortados y listos para proceder a la elaboración de las camisas del extrusor y el troquel.

Figura 3.8. Piso y mesa del tornillo soldadas y los elementos del extrusor.



La figura 3.8. Muestra parte de lo que será la estructura del prototipo ya soldadas con arco eléctrico AC y electrodo 6013. También podemos apreciar algunos elementos casi terminados.

Figura 3.9. Elementos ensamblados del extrusor casi terminado.



La figura 3.9. muestran el sistema de transmisión completo, el conjunto de camisa y tornillo de extrusión, la tolva, la mesa del extrusor, el piso, el porta-variador y el variador de frecuencia.

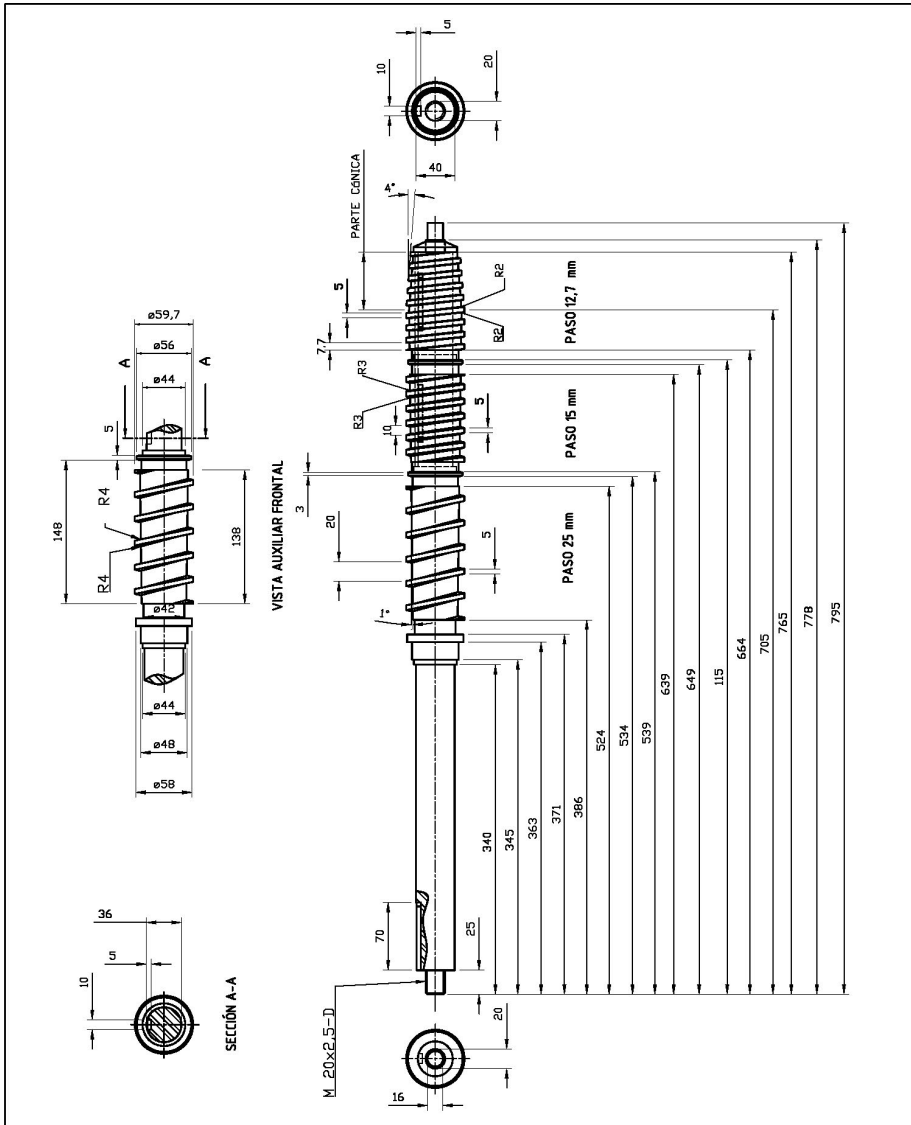
Figura3.10. Partes del extrusor pintadas y el extrusor terminado.



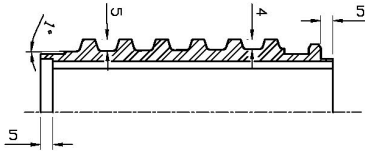
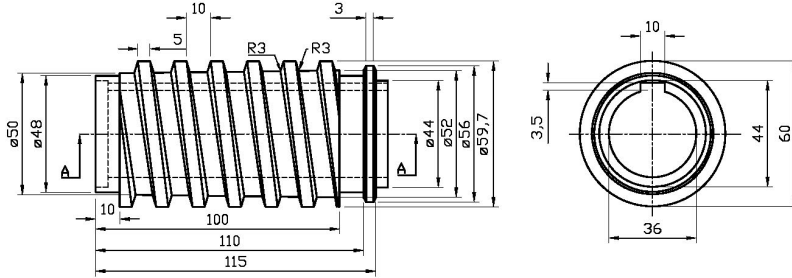
En la figura 3.10. se ven algunos elementos ya pintados con pintura anticorrosiva blanca y la parte mecánica terminada.

Figura 3.11. Extrusor para quinua terminado con el sistema eléctrico instalado.

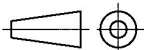




				Escala: 1 : 5	Peso:	
						OBS.: Las medidas del plano estan en mm.
			Fecha	Nombre	TORNILLO DE EXTRUSIÓN CON DIFERENTES PASOS	
		Proy.	01/07/11	QUIROZ		
		Dib.	01/07/11	QUIROZ		
		Rev.				
		Aprób.				
FACULTAD TÉCNICA MECÁNICA INDUSTRIAL					PLANO Nro 16	
Edic.	Modificación	Fecha	Nom.			



SECCIÓN A-A  
PASO 15 mm



Escala: 1 : 2      Peso:

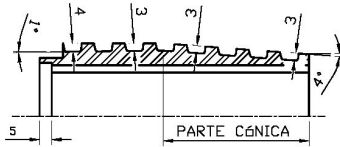
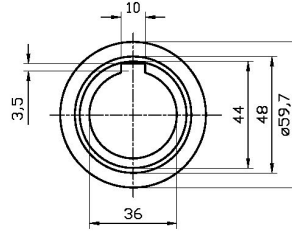
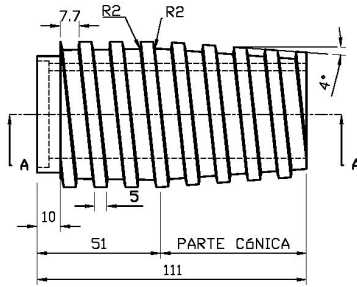
OBS.: Las medidas del plano estan en mm.

TORNILLO POSTIZO

PLANO Nro 16

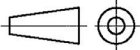
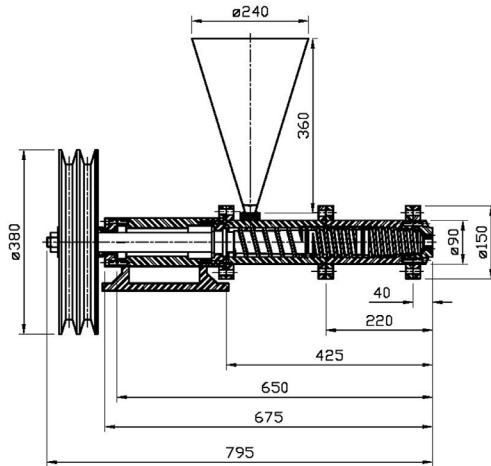
FACULTAD TÉCNICA  
MECÁNICA INDUSTRIAL

Edic.	Modificación	Fecha	Nom.	Fecha	Nombre
				Proy. 01/07/11	QUIROZ
				Dib. 01/07/11	QUIROZ
				Rev.	
				Aprob.	



SECCIÓN A-A  
PASO 12,7 mm

				Escala: 1:2	Peso:	
						OBS.: Las medidas del plano estan en mm.
				Fecha	Nombre	
				Proy. 01/07/11	QUIROZ	
				Dib. 01/07/11	QUIROZ	
				Rev.		
				Aprob.		
				FACULTAD TÉCNICA MECÁNICA INDUSTRIAL		
				TORNILLO POSTIZO CÓNICO		
				PLANO Nro 17		
Edic.	Modificación	Fecha	Nom.			



Escala: 1 : 10

Peso:

OBS.: Las medidas del plano estan en mm.

	Fecha	Nombre
Proy.	01/07/11	QUIROZ
Dib.	01/07/11	QUIROZ
Rev.		
Aprob.		

TORNILLO COMPLETO

FACULTAD TÉCNICA  
MECÁNICA INDUSTRIAL

PLANO Nro 24

Edic.	Modificación	Fecha	Nom.





**Anakainó**  
*logística en servicios gráficos*

*Este libro se terminó de imprimir en*  
**Producciones Gráficas Anakainó S.R.L.**  
*C. Unión N° 433 • La Paz - Bolivia*  
*Tel/Fax: (591-2) 2450554 - 79555550*  
*e-mail: anakainoo@yahoo.com*

*Tiraje de 1000 Ejemplares*  
**Mayo de 2012**