

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA TIPO
EXPELLER PARA LA EXTRACCIÓN DE ACEITE VEGETAL A
PARTIR DE LA SEMILLA DE LA JATROPHA CURCAS CON
CAPACIDAD DE 200 KILOGRAMOS/HORA PARA LA E.S.P.E -
IASA II”**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
MECÁNICO**

SANTIAGO JAVIER GÓMEZ VARGAS

SANTIAGO PATRICIO VILLEGAS ZAPATER

DIRECTOR: Ing. Carlos Naranjo

CODIRECTOR: Ing. Carlos Sntaxi

Sangolquí, 2011-01-14

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA TIPO EXPPELLER PARA LA EXTRACCIÓN DE ACEITE VEGETAL A PARTIR DE LA SEMILLA DE LA JATROPHA CURCAS CON CAPACIDAD DE 200 KILOGRAMOS/HORA PARA LA E.S.P.E - IASA II” fue realizado en su totalidad por Santiago Javier Gómez Vargas y Santiago Patricio Villegas Zapater, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

Ing. Carlos Naranjo

DIRECTOR

Ing. Carlos Sntaxi

CODIRECTOR

Sangolquí, 2011-01-14

LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA TIPO EXPPELLER PARA LA EXTRACCIÓN DE ACEITE VEGETAL A PARTIR DE LA SEMILLA DE LA JATROPHA CURCAS CON CAPACIDAD DE 200 KILOGRAMOS/HORA PARA LA E.S.P.E - IASA II”

ELABORADO POR:

**SANTIAGO JAVIER GÓMEZ VARGAS
EJECUTOR**

**SANTIAGO PATRICIO VILLEGAS ZAPATER
EJECUTOR**

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Ing. XAVIER SÁNCHEZ

DIRECTOR DE CARRERA

Sangolquí, 2011-01-14

DEDICATORIA

*A Dios porque siempre está conmigo,
A mis padres que con su amor, apoyo, ejemplo
y limitaciones, confiaron en mis sueños,
A mis hermanos por ese cariño eterno.*

SANTIAGO GÓMEZ V.

*A mis papis,
Por mostrarme el correcto camino en la vida,
a mis hermanos,
por demostrarme que la unidad hace la fuerza.*

SANTIAGO VILLEGAS Z.

AGRADECIMIENTOS

Carlos Naranjo, Ingeniero Mecánico, Director del Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica de la ESPE. Profesor de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la ESPE.

Carlos Suintaxi, Ingeniero Mecánico, Profesor de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la ESPE.

Personal de Laboratorio de Máquinas y Herramientas de la ESPE, Tecnólogo Roberty Velasco, Laboratorista.

Daniel Fierro, Ingeniero Mecánico, Dirección Nacional de Biocombustibles del Ministerio de Electricidad y Energías Renovables.

RESUMEN

El presente proyecto de grado titulado “Diseño y construcción de una máquina tipo expeller para la extracción de aceite vegetal a partir de la semilla de la *Jatropha curcas* con capacidad de 200 kilogramos/hora para la E.S.P.E-IASA II” es una investigación en el campo de la generación de alternativas energéticas debido a la recurrente necesidad de reemplazar los combustibles fósiles por otros que sean renovables.

El proyecto consiste en el diseño y construcción de una máquina capaz de extraer aceite vegetal de una planta oleaginosa llamada *Jatropha curcas*, conocida vulgarmente como piñón. Por medio de investigaciones bibliográficas y de campo se conocieron los diferentes procesos con los que se extraen aceites vegetales tanto artesanalmente como industrialmente, es así que, en la investigación se determinó que la alternativa más viable debido a la capacidad esperada de la máquina, era la de un expeller ya que esta máquina es capaz de operar inmediatamente a la cosecha.

El expeller es un dispositivo mecánico que mediante la rotación de un tornillo, impulsado por un motor eléctrico, empuja las semillas a través de camisas continuas elevando la presión hasta llegar a una de estrangulación llamada dado; es esta presión con la elevación de temperatura la que ayuda a una extracción continua y de alto rendimiento de aceite.

Para el diseño del ingenio, se tuvo que recurrir al estudio de máquinas similares usadas en el procesamiento de alimentos, esto con el fin de encontrar un modelo apropiado que se acople a los parámetros de funcionamiento tales como producción, 200 kg/h; presión, 30 MPa y, temperatura, 90 °C.

Los parámetros de diseño fueron tomados a partir de experiencias con máquinas semejantes usadas por instituciones públicas y privadas, debido a que el lugar de operación será una zona que tenga similares condiciones de trabajo.

Una vez obtenida toda la información se procedió al diseño de los elementos, siguiendo los conceptos y las recomendaciones ingenieriles; este paso fue sucedido por la construcción, montaje y puesta en operación de la máquina expeller.

Luego de la puesta en operación se procedió a las pruebas que corroborarían los parámetros de operación empleados en el diseño. En el desarrollo de las pruebas se comprobó que efectivamente la máquina extrae aceite de la semilla de la *Jatropha curcas* de una manera continua y prácticamente limpia, la cantidad de producción obtenida en porcentaje de aceite respecto al peso total de la semilla fue muy satisfactorio ya que se llegó a extraer un porcentaje de aceite muy cercano al teórico, obteniendo así desecho prácticamente seco, es decir libre de aceite.

El presente proyecto fue desarrollado por dos estudiantes de la Carrera de Ingeniería Mecánica, como un requisito para la obtención del Título de Ingeniero Mecánico, además de ser un aporte para determinar el método de extracción viable para poder realizar un proceso industrial que brinde beneficios y desarrollo a la actividad productiva del país, además que la materia prima extraída brinda una oportunidad de producir energía renovable y sustentable con el medio ambiente.

ÍNDICE GENERAL

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO	ii
LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTOS	v
RESUMEN	vi
ÍNDICE GENERAL.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS	xii
ÍNDICE DE CUADROS	xiv
ÍNDICE DE FIGURAS	xv
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xvii
NOMENCLATURA	xviii
CAPÍTULO 1	1
1. GENERALIDADES	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 ANTECEDENTES.....	1
1.3 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA	3
1.4 OBJETIVOS.....	5
1.4.1 GENERAL	5
1.4.2 ESPECÍFICOS.....	5
1.5 ALCANCE.....	5
CAPITULO 2	7
2. MARCO TEÓRICO	7
2.1 PROCESOS DE EXTRACCIÓN DE ACEITE	7
2.1.1 GENERALIDADES	7

2.1.2 INTRODUCCIÓN.....	7
2.1.3 MATERIAS PRIMAS.....	8
2.1.4 SELECCIÓN DE LA MATERIA PRIMA	14
2.1.5 TIPOS DE PROCESOS.....	21
2.1.6 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE PROCESOS.....	30
2.1.7 SELECCIÓN DE PROCESO	32
CAPITULO 3	33
3. DISEÑO DE LA MÁQUINA EXPELLER.....	33
3.1 ALTERNATIVAS DE EXTRACCIÓN DE ACEITE VEGETAL	33
3.1.1 CARACTERÍSTICAS DEL EXPELLER.....	33
3.1.2 EXPELLER DE TORNILLO SIMPLE	34
3.1.3 EXPELLER DE TORNILLO DOBLE	35
3.2 PARÁMETROS DE OPERACIÓN	36
3.2.1 TEMPERATURA.....	36
3.2.2 HUMEDAD	37
3.2.3 PRESIÓN DE EXTRACCIÓN	37
3.2.4 CAPACIDAD DE PROCESAMIENTO	38
3.3 SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS	39
3.3.1 MATRIZ DE SELECCIÓN.....	39
3.4 ANÁLISIS DEL EXPELLER DE TORNILLO SIMPLE	40
3.4.1 PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DEL TORNILLO	40
3.4.2 ANÁLISIS DE FLUJO NEWTONIANO EN UN EXPELLER DE TORNILLO SIMPLE	43
3.4.3 ANÁLISIS DE FLUJO NEWTONIANO A TRAVÉS DEL DADO.....	51
3.5 DISEÑO DE ELEMENTOS DEL EXPELLER.....	52

3.5.1 TORNILLO.....	52
3.5.2 DISEÑO DE LAS CAMISAS	60
3.5.3 DISEÑO DEL DADO.....	62
3.5.4 DISEÑO DE JUNTAS ROSCADAS DE LAS CAMISAS Y EL DADO	62
3.5.5 SELECCIÓN DE RODAMIENTOS	65
3.5.6 DISEÑO DEL BASTIDOR.....	65
3.5.7 DISEÑO DE LA TOLVA.....	65
3.6 RESULTADOS DEL DISEÑO DE ELEMENTOS.....	66
3.6.1 PARÁMETROS GEOMÉTRICOS.....	66
3.6.2 CÁLCULO DE LA VELOCIDAD.....	67
3.6.3 CÁLCULO DE FLUJO	67
3.6.4 DETERMINACIÓN DE POTENCIA	68
3.6.5 CÁLCULO DE FLUJO A TRAVÉS DEL DADO.....	68
3.6.6 SELECCIÓN DE MATERIALES	69
3.7 PLANOS CONSTRUCTIVOS	75
CAPITULO 4	77
4. CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE	77
4.1 DIAGRAMAS DE PROCESOS DE FABRICACIÓN.....	77
4.2 CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	88
4.3 RECURSOS DE FABRICACIÓN	190
4.3.1 MATERIALES.....	190
4.3.2 MANO DE OBRA.....	193
4.3.3 EQUIPOS Y HERRAMIENTAS NECESARIOS	193
4.4 MONTAJE.....	194
4.4.1 MONTAJE DE SISTEMA MECÁNICO.....	194

4.4.2 MONTAJE DE SISTEMA ELÉCTRICO	201
CAPITULO 5	205
5. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO	205
5.1 PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO	205
5.2 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN	206
5.3 PROCEDIMIENTO DE PRUEBAS	206
5.4 TOMA DE DATOS	208
5.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS	218
5.6 MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO	224
CAPITULO 6	225
6. ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO	225
6.1 ANÁLISIS ECONÓMICO	225
6.1.1 COSTOS DIRECTOS	225
6.1.2 COSTOS INDIRECTOS	229
6.1.3 RESUMEN DE COSTOS.....	229
6.2 ANÁLISIS FINANCIERO.....	230
CAPITULO 7	233
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	233
7.1 CONCLUSIONES	233
7.2 RECOMENDACIONES.....	234
BIBLIOGRAFÍA.....	237

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Comparación de las principales características de las semillas oleaginosas cultivables en el Ecuador	15
Tabla 2.1 Comparación de las principales características de las semillas oleaginosas cultivables en el Ecuador (Continuación)	16
Tabla 2.2 Identificación geográfica y caracterización agroecológica de las zonas productoras de piñón en el Ecuador y determinación del rendimiento de semilla y aceite.....	19
Tabla 2.2 Identificación geográfica y caracterización agroecológica de las zonas productoras de piñón en el Ecuador y determinación del rendimiento de semilla y aceite (Continuación)	20
Tabla 2.3 Análisis en los residuos de extracción de semillas de piñón	20
Tabla 2.4 Matriz de selección de procesos de extracción de aceite	32
Tabla 3.1 Matriz de selección de alternativa de las máquinas expeller.....	40
Tabla 3.2 Características de operación de un expeller de tornillo simple	41
Tabla 3.3 Factores de área de cortante de barridos de rosca.....	64
Tabla 4.1 Cronograma de actividades para la construcción de la máquina tipo expeller	89
Tabla 4.1 Cronograma de actividades para la construcción de la máquina tipo expeller (Continuación)	89
Tabla 5.1 Prueba 1.....	209
Tabla 5.2 Prueba 2.....	209
Tabla 5.3 Prueba 3.....	210
Tabla 5.4 Prueba 4.....	210
Tabla 5.5 Prueba 5.....	211
Tabla 5.6 Prueba 6.....	212
Tabla 5.7 Prueba 7.....	213
Tabla 5.8 Prueba 8.....	214
Tabla 5.9 Promedio de temperaturas y porcentaje de extracción en prueba 1 @ 85 rpm	219
Tabla 5.10 Promedio de temperaturas y porcentaje de extracción en prueba 2 @ 85 rpm	219

Tabla 5.11 Promedio de temperaturas y porcentaje de extracción en prueba 3 @ 85 rpm	219
Tabla 5.12 Promedio de temperaturas y porcentaje de extracción en prueba 4 @ 85 rpm	220
Tabla 5.13 Promedio de temperaturas, porcentaje de extracción y promedio de potencia en prueba 5 @ 170 rpm.....	220
Tabla 5.14 Promedio de temperaturas, porcentaje de extracción y promedio de potencia en prueba 6 @ 170 rpm.....	221
Tabla 5.15 Promedio de temperaturas, porcentaje de extracción y promedio de potencia en prueba 7 @ 170 rpm.....	221
Tabla 5.16 Promedio de temperaturas, porcentaje de extracción y promedio de potencia en prueba 8 @ 170 rpm.....	222
Tabla 5.17 Promedio de parámetros para velocidad de extrusión 85 rpm	222
Tabla 5.18 Promedio de parámetros para velocidad de extrusión 170 rpm	223
Tabla 6.1 Pago de personal	225
Tabla 6.2 Costos de materiales y accesorios.....	225
Tabla 6.2 Costos de materiales y accesorios (Continuación)	226
Tabla 6.2 Costos de materiales y accesorios (Continuación)	227
Tabla 6.3 Costos de mano de obra	228
Tabla 6.4 Gastos varios	229
Tabla 6.5 Resumen de costos.....	229

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.1 Comparación de propiedades físicas y químicas de la oleína de palma y la jatropa curcas	4
Cuadro 3.1. Parámetros geométricos del tornillo	66
Cuadro 3.2. Parámetros y cálculo de velocidad del tornillo.....	67
Cuadro 3.3. Parámetros y cálculo de flujo dentro del expeller	67
Cuadro 3.4. Parámetros y cálculo de potencia del expeller	68
Cuadro 3.5. Parámetros y cálculo de flujo en el dado.....	68
Cuadro 3.6. Parámetros y estado de carga del tornillo	69
Cuadro 3.6. Parámetros y estado de carga del tornillo (Continuación).....	70
Cuadro 3.7. Parámetros y estado de carga de las camisas.....	71
Cuadro 3.7. Parámetros y estado de carga de las camisas (Continuación).....	72
Cuadro 3.8. Parámetros y estado de carga del dado.....	73
Cuadro 3.8. Parámetros y estado de carga del dado (Continuación).....	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Planta y semillas de palma africana.....	9
Figura 2.2 Planta y semillas de soya.....	10
Figura 2.3 Planta y semillas de colza canola	11
Figura 2.4 Planta y semillas de girasol.....	11
Figura 2.5 Planta y semillas de algodón	12
Figura 2.6 Planta y semillas de higuera.....	13
Figura 2.7 Planta y semillas de jatropha curcas.....	14
Figura 2.8 Extracción con soxhlet	23
Figura 2.9 Prensa de placas	24
Figura 2.10 Prensa de cajetines.....	25
Figura 2.11 Prensa de jaula	26
Figura 2.12 Prensa de vaso	27
Figura 2.13 Prensa tipo expeller	29
Figura 3.1 Corte longitudinal de un expeller estándar.....	34
Figura 3.3 Determinación experimental de presión de extrusión para jatropha curcas	38
Figura 3.4 Geometría típica de un tornillo extrusor	41
Figura 3.5 Diagrama simplificado de incremento de la presión en un extrusor de tornillo simple	43
Figura 3.6 Canal desenvuelto de una extrusora de tornillo simple con las líneas de corriente esquemáticas.	45
Figura 3.7 Factores de corrección del flujo de arrastre (F_d) y flujo de presión (F_p) como función de la geometría del canal H_t/W_t	46
Figura 3.8 Característica del extrusor y dado, punto de operación.....	52
Figura 3.9 Desarrollo del hilo del tornillo, como viga en voladizo.....	53
Figura 3.10 Diagrama de cuerpo libre del tornillo.....	54
Figura 3.11 Diagrama de fuerza cortante.....	55
Figura 3.12 Diagrama de momento flector.....	55
Figura 3.13 Esfuerzo de compresión respecto al tiempo	57
Figura 3.14 Esfuerzo de flexión respecto al tiempo	57
Figura 3.15 Combinación de esfuerzos normales respecto al tiempo.....	58
Figura 3.16 Fuerzas que actúan sobre la chaveta	59

Figura 3.17 Cilindro sometido a presión interna y externa	61
Figura 3.18 Esquema de la tolva de alimentación.....	66
Figura 4.1 Tornillo máquina expeller	195
Figura 4.2 Tornillo con rodamientos y retenedor.....	195
Figura 4.3 Alojamiento de rodamientos con pista externa in situ	196
Figura 4.4 Ajuste de tapa de regulación de rodamientos	196
Figura 4.5 Conjunto tornillo - alojamiento rodamientos armado	197
Figura 4.6 Roscado para acople con alojamiento de rodamientos.....	197
Figura 4.7 Camisa de alimentación y alojamiento montados	198
Figura 4.8 Montaje en motor y bastidor.....	198
Figura 4.9 Conjunto montado en motoreductor y bastidor	199
Figura 4.10 Montaje de camisas de extrusión en máquina expeller.....	200
Figura 4.11 Montaje de dado en máquina expeller	200
Figura 4.12 Máquina expeller montada.....	201
Figura 4.13 Diagrama eléctrico de máquina expeller	202
Figura 4.14 Arrancador encendido.....	204
Figura 4.15 Arrancador en falla.....	204
Figura 5.1 Puntos de toma de temperatura.....	215
Figura 5.2 Puntos de toma de temperatura en operación	215
Figura 5.3 Extracción de aceite.....	216
Figura 5.4 Extracción de aceite y torta.....	216
Figura 5.5 Proceso de extracción.....	217
Figura 5.6 Torta obtenida	217
Figura 5.7 Aceite obtenido	218
Figura 5.8 Prueba con semilla descascarada	218

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A – INDICES DE FLUJO n Y m	239
ANEXO B – MEMORIA DE CÁLCULO	241
ANEXO C – SELECCIÓN DE RODAMIENTOS	270
ANEXO D – DISEÑO DEL BASTIDOR (SAP 2000).....	275
ANEXO E – PLANOS CONSTRUCTIVOS.....	278
ANEXO F – MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO.....	278
ANEXO G – PARÁMETROS DE SETEO DEL ARRANCADOR	286
ANEXO H – CERTIFICACIÓN PRESUPUESTARIA	Error! Marcador no definido.

NOMENCLATURA

Símbolo	Variable	Unidad
a	Relación de aceleración	ninguna
A_a	Área de aplastamiento en los sujetadores roscados	mm^2
A_s	Área cortante de barrido en sujetador roscado	mm^2
A_{td}	Area desarrollada del interior de la camisa	mm^2
A_{tl}	Sección en dirección longitudinal de la camisa	mm^2
b_t	Ancho del hilo del tornillo	mm
D	Diámetro mayor del sujetador roscado	mm
D_{cr}	Diámetro crítico en la flecha del tornillo	mm
D_d	Diámetro de la abertura del dado	mm
D_r	Diámetro de raíz del sujetador roscado	mm
D_t	Diámetro del tornillo	mm
D_{tp}	Diámetro del tornillo en pulgadas	Plg
E	Potencia del motor	w
E_c	Potencia del motor disipada en calor	w
e_c	Espesor de la pared de la camisa	mm
$E_{m\acute{a}x}$	Potencia máxima del motor	w
$E_{m\acute{i}n}$	Potencia mínima del motor	w
E_p	Potencia del motor necesaria para el bombeo	w
F_d	Factor de corrección de flujo de arrastre	ninguna
F_p	Factor de corrección de flujo presión	ninguna
F_r	Fuerza cortante del sujetador roscado	N
FS_c	Factor de seguridad de las camisas	ninguna
FS_{ch}	Factor de seguridad de la chaveta	ninguna
FS_E	Factor de servicio del motor	ninguna
FS_{e_t}	Factor de seguridad estático de la flecha del tornillo	ninguna
FS_h	Factor de seguridad en el hilo del tornillo	ninguna
FS_{sra}	Factor de seguridad al aplastamiento para los sujetadores roscados	ninguna
FS_{src}	Factor de seguridad a cortante para los sujetadores roscados	ninguna
F_t	Fuerza en la superficie del tornillo	N
g_j	Gravedad específica de la jatropha	ninguna

H	Longitud de sujeción entre macho y hembra en los sujetadores roscados	mm
H _{ct}	Holgura camisa - tornillo	mm
H _t	Altura promedio del hilo del tornillo	mm
H _{tp}	Altura del hilo del tornillo en pulgadas	Plg
k _s	Factor de forma del dado	m ⁵ /N.s
L _c	Longitud de la camisa	mm
L _{cha}	Longitud de la chaveta al aplastamiento	mm
L _{chc}	Longitud de la chaveta al cortante	mm
L _d	Longitud del dado	mm
L _t	Longitud del tornillo	mm
m	Índice de flujo	ninguna
M _{máx,t}	Momento flector máximo en la flecha del tornillo	Nm
N	Velocidad de rotación del tornillo	rad/s
n	Índice de flujo	ninguna
n _h	Numero de hilos del tornillo a carga axial	ninguna
P	Presión de extrusión	MPa
P _e	Presión estática en el dado	MPa
p _i	Presión interna en la camisa	MPa
P _{máx}	Presión máxima de extrusión	MPa
p _r	Paso del sujetador roscado	mm
p _t	Paso del tornillo	mm
Q	Caudal volumétrico	mm ³ /s
Q _d	Flujo de arrastre	mm ³ /s
Q _p	Flujo de presión	mm ³ /s
Q _x	Velocidad de flujo (Caudal de Operación)	m ³ /s
R	Flujo másico requerido en libras	lb
r _i	Radio interno de la camisa	mm
r _m	Radio medio del tornillo	mm
r _o	Radio externo de la camisa	mm
r _t	Radio del tornillo en zona de acople con el reductor	mm
S _b	Esfuerzo de flexión en la base del hilo del tornillo	MPa
S _s	Esfuerzo cortante transversal medio en el hilo del tornillo	MPa
S _{sy_c}	Resistencia al cortante de las camisas	MPa
S _{sy_{ch}}	Resistencia al cortante de la chaveta	MPa

Sy_c	Resistencia a la fluencia de la camisa	MPa
Sy_{ch}	Resistencia a la fluencia de la chaveta	MPa
Sy_d	Resistencia a la fluencia del dado	MPa
Sy_t	Resistencia a la fluencia del tornillo	MPa
T	Torque en la flecha del tornillo	Nm
t_{ch}	Ancho de la chaveta	mm
T_{ch}	Torque de la chaveta	Nm
U_x	Velocidad de la pared de la camisa relativa al canal del tornillo en dirección X	m/s
U_z	Velocidad de la pared de la camisa relativa al canal del tornillo en dirección Z	m/s
V_x	Velocidad de flujo en el eje X	m/s
V_z	Velocidad de flujo en el eje Z	m/s
w_i	Factor de área que define el porcentaje del paso ocupado por metal en el diámetro menor	ninguna
w_o	Factor de área que define el porcentaje del paso ocupado por metal en el diámetro mayor	ninguna
w_t	Ancho del canal del tornillo	mm
W_x	Fuerza axial sobre el hilo del tornillo	N
α	Coeficiente para gradiente de presión	ninguna
β	Coeficiente para gradiente de presión	ninguna
Y_{app}	Razón de corte	1/s
ΔP	Gradiente de presión en la extrusión	MPa
ε	Eficiencia de bombeo	ninguna
θ_t	Ángulo de hélice del tornillo	grados
θ_{tr}	Ángulo de hélice del tornillo	radianes
μ	Viscosidad del producto	Pa·s
μ_{app}	Viscosidad aparente newtoniana	Pa·s
μ_d	Viscosidad de la fusión	Pa·s
σ'	Esfuerzo equivalente de la pared de la camisa	MPa
$\sigma_{a_{sr}}$	Esfuerzo de aplastamiento en la rosca de los sujetadores roscados	MPa
σ_{a_t}	Esfuerzo normal alternante en la flecha del tornillo	MPa
σ_{b_t}	Esfuerzo flector máximo en la flecha del tornillo	MPa
σ_{c_t}	Esfuerzo de compresión en el tornillo	MPa
σ_{eq_h}	Esfuerzo equivalente en el hilo del tornillo	MPa
σ_{eq_t}	Esfuerzo equivalente en la flecha del tornillo	MPa
σ_l	Esfuerzo longitudinal en la camisa	MPa

$\sigma_{\text{máx}_t}$	Esfuerzo normal máximo en el tornillo	MPa
$\sigma_{\text{mín}_t}$	Esfuerzo normal mínimo en el tornillo	MPa
σ_m	Esfuerzo normal medio en la flecha del tornillo	MPa
σ_r	Esfuerzo radial en la camisa	MPa
σ_t	Esfuerzo tangencial en la camisa	MPa
τ_{a_t}	Esfuerzo cortante alternante en la flecha del tornillo	MPa
$\tau_{\text{máx}_t}$	Esfuerzo cortante máximo en la flecha del tornillo	MPa
$\tau_{\text{mín}_t}$	Esfuerzo cortante mínimo en el tornillo	MPa
τ_m	Esfuerzo cortante medio en la flecha del tornillo	MPa
T_s	Esfuerzo cortante para el barrido del sujetador roscado	MPa
T_{xy}	Esfuerzo de corte del flujo en el plano xy	MPa
T_{zy}	Esfuerzo de corte del flujo en el plano zy	MPa

CAPÍTULO 1

1. GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha venido haciendo cada vez más necesaria la obtención de energías renovables a fin de poder combatir con alternativas concretas el cambio climático.

El propósito de este proyecto es diseñar y construir una alternativa viable de extracción de aceite vegetal para la semilla de la *jatropha curcas*, el cual se utiliza como materia prima para la elaboración de biodiesel, esta extracción debe tener rendimientos altos en relación a la semilla procesada y aceite obtenido, con estos datos se encontrarán puntos de operación que brinden tiempos reducidos y aceite de buena calidad.

Este proyecto puede brindar una idea muy clara sobre la cantidad de aceite que se puede obtener de una planta usada tradicionalmente como cerca viva, pero que dentro de sí esconde un poder energético considerable, es por ello que la investigación se ha desarrollado usando criterios empíricos y técnicos.

1.2 ANTECEDENTES

Como una acción efectiva contra el cambio climático, a raíz de la firma del protocolo de KIOTO, en los países firmantes, se ha puesto especial interés por el uso de alternativas energéticas provenientes de fuentes renovables. Algunos países, con cierto grado de industrialización como la India y Brasil ya están elaborando biodiesel a partir de la *jatropha curcas*. En Centroamérica, Guatemala y Nicaragua también están incursionando en el cultivo del piñón con algunas experiencias piloto; para la elaboración del biodiesel. Por tanto existe la importancia en incursionar en proyectos de investigación y producción industrial, con procesos térmicos que emitan sustancias contaminantes reducidas y sean sustentables en los aspectos socioeconómicos.

El aceite de la semilla es una fuente de energía renovable no convencional, de bajo costo y amigable con el ambiente, además de ser un sustituto para diesel, keroseno y otros combustibles.

El aceite se usó en motores en África durante la segunda guerra mundial, además, ha sido empleado para iluminación de calles cerca de Río de Janeiro, en Europa se usa en el hilado de lana y manufacturas textiles. Se usa junto con cenizas de quemar plátano para hacer un duro jabón casero. En Gabón, las semillas molidas y mezcladas con aceite de palma se usan para matar ratas y es altamente tóxico para los humanos.

Las semillas se exportaban de Cabo Verde a Portugal para usar el aceite como purgante, aunque es un método muy drástico. La ingestión de 2-3 semillas actúa como un purgante fuerte y se dice que la ingestión de 4-5 semillas puede causar la muerte.

La pasta de prensar la semilla para aceite no puede usarse directamente como alimento para animales pues es tóxica para ellos. Sin embargo, si se le pasa por un proceso de desintoxicación puede usarse sin problema para alimentar vacuno, cerdos y aves, pues contiene altos niveles de proteína (55-58%). Sin desintoxicar, puede usarse como abono orgánico pues tiene un alto contenido en nitrógeno, similar al del estiércol de gallina.

Actualmente hay proyectos para establecer una planta procesadora en Brasil coordinada por Petronic para obtener éster metílico de aceite de piñón. Se han estimado producciones de 6-8 tm/ha de semilla, con aproximadamente 37% de aceite, equivalente a 2100-2800 litros de combustible/ha.

En nuestro país, la empresa La Fabril, perteneciente a la industria de procesamiento de oleaginosas, localizada en Manta, ha implementado una línea dedicada al negocio energético como un complemento para mejorar su competitividad, ha desarrollado una planta piloto para producir biodiesel a partir del aceite de palma.

1.3 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

Debido al uso indiscriminado de los combustibles fósiles, el entorno natural ha sido afectado de forma prácticamente irreversible, ya que estas fuentes de energía, aparte de ser deficitarias son contaminantes, por esta razón se debe buscar a escala global, nuevas fuentes de energías limpias, así como también, tecnologías de explotación que sean eficientes y de bajo impacto ambiental.

En los países latinoamericanos como Brasil se pone especial énfasis a los biocombustibles, en Colombia y Perú, sus universidades han desarrollado pequeñas instalaciones para producir biogás, centrales para micro y pico generación hidráulica, aerogeneradores eólicos; sin embargo, el Ecuador sigue sustentando su escaso crecimiento en la exportación de materias primas y petróleo, sin tomar en cuenta que en los próximos 15 años se convertirá en importador de este hidrocarburo, por lo que es emergente y prioritario investigar y desarrollar en forma oportuna las tecnologías de extracción de aceite vegetal para la consiguiente producción de biodiesel.

La materia prima que va a ser objeto de uso es la *Jatropha curcas*, la cual es considerada como una especie relevante para el desarrollo de la bioenergía. Esta planta es originaria de México y América Central y se cultiva en muchas partes del mundo, pertenece a la familia Euphorbiaceae, se adapta bien a condiciones climáticas áridas y semiáridas.

La potencia calórica de este aceite es similar a la de la palma africana por lo cual es un sustituto viable por sus costos de producción menores; en la siguiente tabla según investigaciones del Proyecto ERGAL, Energías Renovables para Galápagos, realizado por el Ministerio de Electricidad y Energías Renovables, se establece una comparación entre ambos aceites:

Cuadro 1.1 Comparación de propiedades físicas y químicas de la oleína de palma y la jatropha curcas

ANÁLISIS DE ACEITES	OLEÍNA DE PALMA	JATROPHA CURCAS
Características Físicas		
Densidad (kg/m ³)	900,00 – 930,00	915,40
Viscosidad cinemática (m ² /s)	39,38 – 40,34	34,70
Características Químicas		
Poder calórico (BTU/h)	37.234	37.026

Fuente: Proyecto ERGAL.

La jatropha curcas es capaz de producir hasta 1,800 lts de aceite por hectárea, volumen mayor al obtenido de otras plantas oleaginosas.

Existen máquinas con capacidades similares a la planteada que realizan este proceso de extracción de manera industrial, sin embargo, por el precio de venta de las mismas, desde 60.000 USD (Sesenta mil dólares americanos) en el mercado extranjero, justifica el diseño y la construcción de esta máquina ya que su costo será reducido hasta la sexta parte del mencionado precio promedio.

La importancia del diseño y construcción de esta máquina radica en que se fomentará el estudio de materias primas para biocombustibles a nivel académico con proyección industrial.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 GENERAL

- Diseñar y construir una máquina tipo expeller para la extracción de aceite vegetal a partir de la semilla de la jatropha curcas con capacidad de 200 kilogramos/hora para la E.S.P.E – IASA II.

1.4.2 ESPECÍFICOS

1. Investigar y analizar los procesos industriales para la extracción de aceites vegetales.
2. Seleccionar la alternativa óptima para el proceso de extracción de aceite vegetal de la semilla de jatropha curcas.
3. Desarrollar los procesos más adecuados para la construcción de la máquina y encontrar los materiales óptimos.
4. Realizar las pruebas experimentales de la máquina y sus componentes, para comparar con los parámetros propuestos.

1.5 ALCANCE

El presente proyecto tiene como alcance el diseño y la construcción de una máquina tipo expeller con las características necesarias en base a las propiedades físicas de la jatropha curcas, fundamentándose en un diseño práctico y económico, con el fin de obtener el máximo rendimiento del mismo de una manera continua.

Posterior al diseño y la construcción, se realizarán las respectivas pruebas de puesta en marcha y producción efectiva de la máquina.

CAPITULO 2

2. MARCO TEÓRICO

2.1 PROCESOS DE EXTRACCIÓN DE ACEITE

El tipo de semilla que se usa para extraer aceite pertenece a las oleaginosas, semillas que contienen en sus células aceite, en el presente capítulo se describirán las diferentes semillas cultivables en el Ecuador, así como también los diferentes procesos para la obtención de aceite.

2.1.1 GENERALIDADES

Los aceites vegetales a lo largo de la historia han sido usados a manera de fuentes alimenticias, productos estéticos y más recientes aún como fuente energética alternativa.

En la parte alimenticia se los ha aprovechado mayormente como aceites de cocción de otros alimentos, entre los más comunes se encuentran el aceite de girasol, de soja, de olivo entre otros.

En la parte estética se los ha utilizado para proporcionar a la humanidad productos para el cuidado personal tales como champo, cremas, lociones, entre otros; plantas tales como el aguacate, el girasol y otros más.

En lo que a la energía respecta, el uso de biocombustibles a base de aceites vegetales, se ha popularizado en las últimas décadas debido a varios factores como ambientales, económicos e incluso socio políticos.

2.1.2 INTRODUCCIÓN

Como se explicó anteriormente, los aceites vegetales actualmente se están usando a manera de fuente energética renovable, razón por la cual el estudio de las mismas para cumplir este fin, así como las diferentes tecnologías de extracción con rendimientos eficientes, deben ser una obligación de los institutos de investigación como universidades, entidades gubernamentales y privadas.

El Ecuador es un lugar privilegiado por su clima y posición geográfica, es decir, tiene un gran potencial agroindustrial y se ve obligado a usar sus tierras como sembradíos de este tipo de plantas sin afectar de ninguna manera a la seguridad alimentaria protegida por la actual Constitución de la República.

En nuestro país el uso de aceites vegetales para la obtención del biodiesel no se ha dado a gran escala, ya que actualmente se depende del uso de hidrocarburos fósiles obtenidos del petróleo.

2.1.3 MATERIAS PRIMAS

Las materias primas disponibles en el Ecuador para la obtención de aceite vegetal con fines energéticos son variadas, existen plantas de naturaleza comestibles y otras no, lo cual es un buen referente para seleccionar alternativas que no perjudiquen la seguridad alimentaria, pero a su vez ayuden a obtener la tan anhelada soberanía energética.

La producción de biodiesel a partir de aceite vegetal se ha venido desarrollando como alternativa para sustituir los combustibles fósiles, las investigaciones han arrojado que para obtener datos suficientemente certeros sobre los costos y parámetros de proceso se requiere de una planta que pueda procesar entre 50 a 100 Litros/hora de aceite.

A continuación se revisa algunos aspectos de las posibles materias primas que se encuentran en el país.

2.1.3.1 Palma africana

Es una palmera de climas tropicales, que requiere mínimo 1600 mm de lluvia anual y de 2 a 4 meses secos. Soporta inundaciones temporales, además necesita bastante luz y humedad del suelo adecuada. Se desarrolla mejor en áreas bajas, a temperaturas máximas medias de 30 a 32 C, y mínimas de 21 a 24 C.

El fruto se obtiene entre los 4 y 5 años de plantadas las semillas mediante el uso de variedades seleccionadas y clonadas, que alcanzan su mayor producción entre los 20 y 30 años. Cada planta de palma está conformada por

unos 1000 a 4000 frutos de forma ovalada, de 3 a 5 cm. de largo. Una vez que se obtienen estos frutos se extrae el aceite. El contenido de aceite en la palma africana, se encuentra tanto en la pulpa como en la semilla, en la pulpa se encuentra un contenido de aceite entre 45 y 55%, mientras que en la semilla se encuentra entre 44 y 57%.

En la actualidad existen varios productores a nivel mundial, siendo el más importante Malasia que representa el 40.3% del total de área de producción mundial. Después le sigue Indonesia con el 38.6%, Nigeria con 4.3%, Tailandia, Costa de Marfil, Zaire, Papúa Nueva Guinea. En América Latina, Colombia, Ecuador, Brasil, Costa Rica, Honduras y otros países con un aporte mínimo.



Figura 2.1 Planta y semillas de palma africana

2.1.3.2 Soja o soya

Actualmente el aceite de soja y sus derivados son la principal grasa a nivel mundial. La soja es también una importante fuente de proteínas, especialmente para la alimentación del ganado, aunque también se utiliza extensamente en alimentación humana.

Es una planta herbácea anual adaptada a climas desde los trópicos hasta los sub trópicos húmedos, esta planta no resiste calor excesivo ni inviernos

severos, la temperatura óptima es de 24 a 25 C, pero resiste temperaturas medias anuales entre 5.9 y 27 C. La planta crece mejor en suelos fértiles y bien drenados. Soporta precipitaciones entre 310 y 4100 mm de lluvia anual, el periodo de crecimiento es de 4 a 5 meses. La semilla de soja contiene alrededor del 18 al 20% de aceite y un 35% de proteína.

Los principales países productores son Estados Unidos, Brasil, Argentina, China, India, Paraguay y Canadá.



Figura 2.2 Planta y semillas de soja

2.1.3.3 Colza canola

La colza canola (*Brassica napus*), después de la soja y la palma, es la tercera fuente de aceite vegetal más importante del mundo.

Es una planta anual o bianual de flores amarillas adaptada a climas fríos, requiere suelos fértiles y bien drenados, el clima seco durante la cosecha es esencial, tolera precipitaciones anuales entre 300 y 2800 mm de lluvia y temperaturas medias entre 5 y 27 C, la canola con características agronómicas mejoradas es apta para el consumo humano. El contenido de aceite de la semilla es del 40%.

Si la siembra y cosecha de la colza canola se lo hace de manera técnica, se alcanzaría un rendimiento promedio de 929 litros de biodiesel por hectárea, se debe evitar sembrar canola en zonas donde se originen los ríos para evitar su contaminación o que afecte al caudal de las partes bajas, y en zonas cercanas a áreas naturales protegidas para proteger la biodiversidad.



Figura 2.3 Planta y semillas de colza canola

2.1.3.4 Girasol

Es una planta herbácea anual mejor adaptada a climas cálidos o templados, puede crecer desde el Ecuador hasta los 55° de latitud, esta planta en los trópicos crece mejor en elevaciones medias y altas, es intolerante a la sombra pero tolerante a la sequedad y a la sequía, puede crecer en los suelos pobres siempre que sean profundos y bien drenados, no resiste suelos ácidos o inundados. Tolera precipitaciones anuales entre 200 y 4000 mm de lluvias y temperaturas de entre 6 y 28 C. En zonas cálidas las variedades enanas maduran entre 2.5 y 3 meses después de la siembra. El contenido de aceite por semilla es de 45 a 55 %.



Figura 2.4 Planta y semillas de girasol

2.1.3.5 Algodón

Es una planta arbustiva anual adaptada a regiones de tropicales a templadas, tolera precipitaciones anuales entre 290 y 2780 mm de lluvia y temperaturas de entre 7 y 27.8 C, es sensible a las heladas y requiere de un mínimo de 180 a 200 días de temperaturas uniformemente altas, se cultiva en altitudes de entre 0 y 1200 metros, requiere de luz solar directa y lluvia moderada dentro del periodo vegetativo, y un periodo seco para permitir a los copos que maduren. Se desarrolla mejor en suelos profundos, friables, con alta retención de humedad y buena cantidad de humus. El contenido de aceite por semilla es del 18 al 25 %.



Figura 2.5 Planta y semillas de algodón

2.1.3.6 Ricino o higuera

Es una árbol o arbusto perenne de zonas tropicales, pero se puede comportar como anual en regiones templadas, tolera precipitaciones de 200 a 4290 mm de lluvias anuales y temperaturas de entre 7 y 27.8 C, pero los óptimos están entre 750 y 1000 mm de agua y de 20 a 25 C. crece mejor con altas temperaturas y muere con las heladas. Es bastante tolerante a las sequías, se desempeña mejor en suelos fértiles y bien drenados, no alcalinos ni salinos. El contenido de aceite por semilla es del 45 al 55 %.



Figura 2.6 Planta y semillas de higuera

2.1.3.7 *Jatropha curcas* o piñón

Es un cultivo que es de gran interés para la producción de biodiesel. Crece desde el nivel del mar hasta los mil doscientos metros sobre el nivel del mar; se adapta a suelos pobres, arenosos y/o alcalinos; es muy resistente a la sequía, requiriendo un mínimo de 250 mm/año de precipitación para sobrevivir; para su producción óptima se requeriría entre 900 y 1200 mm/año de precipitación, es un cultivo perenne, con una vida útil de 30 a 50 años; se estima que la fijación de CO₂ en troncos y raíces estaría entre las 7 y 8 tm/ha anuales, más del doble que cualquier cultivo maderero.

Esta planta oleaginosa es nativa de América y actualmente se encuentra difundida a lo largo de las regiones tropicales áridas y semiáridas de América, África y Asia. En el Ecuador es usual encontrar el piñón a manera de cercas vivas, en la zona de Manabí, aprovechando su toxicidad que mantiene alejado al ganado

La gran rusticidad y adaptabilidad de este cultivo se basaría en su variabilidad genética, lo cual le permite resistir condiciones tan diversas y exigentes, como las de la costa desértica o la selva tropical lluviosa. Sin embargo, esta cualidad, muy probablemente se presente como dificultad cuando se desee obtener cierta uniformidad y homogeneidad en grandes extensiones de cultivo, tal como sucedió con el ricino en Brasil.



Figura 2.7 Planta y semillas de jatropha curcas

2.1.4 SELECCIÓN DE LA MATERIA PRIMA

Con el propósito de elegir la materia prima apropiada para la extracción de aceite vegetal se realizará un estudio de las características más relevantes de las mismas y se explicará en base a criterios técnicos la razón de la selección de la jatropha curcas para el presente tema de proyecto, esto sin dejar de lado que la máquina pudiera ser usada para semillas semejantes a la misma.

2.1.4.1 Comparación de materias primas cultivables en el Ecuador

A continuación se muestra una tabla comparativa con los parámetros relevantes para la elección de la materia prima, se ha puesto en énfasis parámetros tales como: el porcentaje de aceite de la semilla, el rendimiento promedio de kilogramo por hectárea anual, el tipo de suelo, precipitaciones, temperaturas adecuadas y los principales usos que ellas tienen; para así encontrar la materia prima que no afecte la seguridad alimentaria y además sea de alto contenido de aceite.

Tabla 2.1 Comparación de las principales características de las semillas oleaginosas cultivables en el Ecuador

Nombre Común y Científico	Contenido de Aceite (%)	Tipo de suelo, precipitación y temperatura	Rendimiento Promedio kg/ha/año	Principales Usos
Palma aceitera (<i>Elaeis guineensis</i>)	Pulpa: 46-55 Semilla 44-57	Suelos: Húmedos Precipitación: 1 600 mm Temperatura: 22 – 31 C	Pulpa: 5 000 Semilla: 800	Palma: Margarina, grasas para cocinar, productos alimentarios, jabones, velas, cosméticos, lubricantes. Palmiste: Grasas alimentarias, helados, mayonesa, repostería, jabones, detergentes, biodiesel.
Soja o Soya (<i>Glycine Max</i>)	18 – 20	Suelos: Fértiles y bien drenados Precipitación: 310 a 4 100 mm Temperatura: 24 – 25 C	280 – 580	Aceite para ensaladas, margarinas, jabones, pinturas, insecticidas, desinfectantes, biodiesel. Industria de alimentos y farmacéutica. Fuente de proteína para animales y humanos.
Colza y canola (<i>Brassica napus</i> , <i>Brassica rapa</i>)	40	Suelos: Fértiles y bien drenados Precipitación: 300 a 2 800 mm Temperatura: 5 – 27 C	700 – 1 500	Productos alimentarios, lubricantes, jabones, biodiesel.
Girasol (<i>Helianthus annuus</i>)	45 – 55	Suelos: Pobres y bien drenados Precipitación: 200 a 4 000 mm Temperatura: 6 – 28 C	600 – 950	Aceite para ensalada y para cocinar, margarina, lubricantes, jabones, pinturas y esmaltes.
Algodón (<i>Gossypium hirsutum</i>)	18 – 20	Suelos: Profundos, fértiles y húmedos Precipitación: 290 a 2 780 mm Temperatura: 7 – 27.8 C	300	Aceite para ensalada y para cocinar, margarina y para coberturas protectoras.

Tabla 2.1 Comparación de las principales características de las semillas oleaginosas cultivables en el Ecuador (Continuación)

Nombre Común y Científico	Contenido de Aceite (%)	Tipo de suelo, precipitación y temperatura	Rendimiento Promedio kg/ha/año	Principales Usos
Ricino o higuera (<i>Ricinus communis</i>)	45 – 55	Suelos: Fértiles y bien drenados Precipitación: 750 a 1 000 mm Temperatura: 20 – 25 C	1 200	En coberturas protectoras, lubricantes, tintas, tintes, textiles, preservación del cuero, fibras sintéticas, pinturas, ceras, velas, crayones.
Piñón (<i>Jatropha curcas</i>)	24 – 34	Suelos: Áridos Precipitación: 900 a 1200 mm Temperatura: 18 – 28.5 C	1 590	Iluminación, jabón, velas.

Fuente: Opciones para la producción y uso de biodiesel en el Perú.

Como se puede apreciar en la anterior tabla comparativa, la gran mayoría de plantas oleaginosas requieren condiciones óptimas tanto de suelo, precipitaciones anuales y temperaturas, por lo cual ocupan suelos fértiles para su producción o bien podrían estos terrenos ser usados para producir otro tipo de plantas comestibles.

También se aprecia que el uso que se les da a la mayoría de plantas mencionadas es netamente alimenticio, pudiendo también usarse para la fabricación de lubricantes, textiles, jabones, cosméticos y otros más.

Respecto a la *jatropha curcas* o piñón, esta planta se caracteriza por soportar condiciones áridas en el terreno a ser sembrada, incluso se la usa como reactivador de suelos erosionados, razón por la cual su cultivo es una opción para zonas con condiciones extremas de sequía y temperatura. Además por ser una planta tóxica para el consumo tanto humano cuanto animal, no afecta al sector alimenticio.

2.1.4.2 Jatropha curcas – piñón

Debido a los antecedentes expuestos, el proyecto será diseñado específicamente para la *Jatropha curcas*, sin embargo no quedan excluidas semillas semejantes en forma pero con contenidos menores en aceite.

2.1.4.2.1 Semillas de la *Jatropha curcas*

La *Jatropha curcas* es una especie con gran distribución en los trópicos, encontrándose mayormente a bajas elevaciones, por debajo de los 1200 msnm, en planicies o colinas, con precipitaciones de 480 a 2380 mm y temperaturas de 18 a 28°C, aunque se planta en sitios con temperaturas de hasta 34°C. La planta se presenta en forma silvestre o cultivada en varias regiones, además que resiste la sequía y se adapta a gran variedad de suelos, incluyendo los de bajo contenido de nutrientes, por lo cual es una excelente alternativa de reforestación en zonas erosionadas, donde no es posible realizar otro tipo de cultivos.

La planta de *Jatropha curcas* es un arbusto o árbol pequeño, de hasta 8 m de alto, el cual tiene una vida útil de 30 a 50 años, con fuste ramificado a poca altura lo cual facilita su cosecha; las flores son masculinas y femeninas en la misma planta; los frutos tienen forma de cápsulas elípticas, de 2.5 a 4 cm de largo, casi 3 cm de ancho, un poco carnosos, color amarillo que se vuelve café al madurar y se abren en tres partes; las semillas vienen entre 2 y 3 por fruto, en forma de elipsoides, de aproximadamente 2 cm de largo y 1 cm de ancho, pálidas, con líneas negras notables.

En los frutos y semillas se han reportado propiedades contraceptivas. Las semillas enteras contienen un 26% de aceite y las semillas descascaradas y frescas alrededor de 37%. El aceite es incoloro, inodoro y muy fluido. Los curanderos brasileños previenen a los compradores sobre los cuidados que se deben tener con el manejo del látex por ser muy cáustico. Si se consume en dosis elevadas, el aceite produce alteraciones en el tracto gastrointestinal, que se manifiesta por malestar, vómitos y gran sudoración, y puede incluso sobrevenir la muerte. La corteza, fruto, hojas, raíces y madera contiene cianuro. Las semillas contienen el alcaloide curcina, el cual las hace fatalmente

tóxicas. Aunque el tostado de las semillas elimina los efectos perjudiciales, el consumo de semillas frescas o aun parcialmente tostadas puede ser fatal, de ahí que su uso como alimento no se recomienda. La madera de esta especie es blanca, muy blanda y esponjosa, usada en ocasiones como leña pero de mala calidad.

2.1.4.2.2 Aceite de la *Jatropha curcas*

El aceite de la semilla es una fuente de energía renovable no convencional, de bajo costo y amigable con el ambiente, además de ser un sustituto para diesel, keroseno y otros combustibles. También se usa para preparar barnices después de ser quemado con óxidos de hierro, o como un excelente sustituto para aceites industriales. Contiene toxinas venenosas, lo cual hace que no se pueda consumir y produzca irritaciones en la piel.

2.1.4.2.3 Torta de la semilla de la *Jatropha curcas*

La torta que resulta de la extracción de aceite de la semilla, no puede usarse directamente como alimento para animales pues es tóxica para ellos. Sin embargo, si se le pasa por un proceso de desintoxicación puede usarse sin problema para alimentar vacas, cerdos y aves, pues contiene altos niveles de proteína (55-58%). Sin desintoxicar, puede usarse como abono orgánico pues tiene un alto contenido en nitrógeno, similar al del estiércol de gallina. El contenido en nitrógeno varía del 3-4 %.

2.1.4.2.4 *Jatropha curcas* en el Ecuador

Las tierras marginales secas del litoral ecuatoriano en gran parte están ubicadas en terrenos de pendiente, donde no es posible el desarrollo adecuado de la agricultura, por falta de agua para riego y debido a que las escasas precipitaciones no permiten muchas veces obtener cosechas rentables en algunos cultivos tradicionales de la zona como maíz, maní, fréjol, etc.; por lo cual se hace necesario buscar alternativas de producción en las condiciones mencionadas. Una especie ideal para cultivarse en este medio es el piñón, que al mismo tiempo está adaptado a la zona y es muy conocido por los agricultores.

Las plantas en Manabí se han usado tradicionalmente como cercas vivas de fincas y potreros, con estacas entrelazadas con el alambre cuyo mantenimiento consiste en mantener a las plantas a podas periódicas con el fin de evitar el exceso de sombra sobre los cultivos. En estas condiciones sobre la temporada lluviosa la planta llega a producir una o dos cosechas con volúmenes aceptables de semillas, sin embargo, el grano es poco comercializado debido a que únicamente se le da uso para la fabricación de jabones caseros.

En el Ecuador esta planta se encuentra en diferentes provincias, entre las más importantes están Manabí, Santo Domingo de los Tsáchilas, y Guayas; según estudios de la Escuela Politécnica Nacional en el país existen aproximadamente 700 hectáreas de estas plantaciones a manera de cerca viva en su mayoría, además se han determinado los rendimientos de semilla por hectárea según distintas zonas de precipitación, obteniendo un promedio de 850 kg de semilla por hectárea, encontrándose lugares con hasta 1275 kg de semilla por hectárea. Debido al alto porcentaje de germinación, 80%, las semillas deben ser procesadas de una manera inmediata al proceso de despulpado, de lo contrario empezarán a germinar en el lugar de almacenamiento; es por esta razón que se requiere de una máquina con capacidad de procesamiento capaz de extraer el producto dentro de los 20 a 30 días de cosecha.

Tabla 2.2 Identificación geográfica y caracterización agroecológica de las zonas productoras de piñón en el Ecuador y determinación del rendimiento de semilla y aceite

Localidad	Rango de lluvias mm	Condiciones de cultivo		Rendimiento de semilla kg/ha	Contenido de aceite %	Rendimiento de aceite kg/ha	Rendimiento de aceite lts/ha
		Plantas cada 100 m	Número frutos/planta				
Quimí – La Pila	0 – 500	49	298	1275,8	36,48	465,41	222,00
Canoa – Jama	500 – 750	111	57	421,2	37,72	158,88	68,00
Pedro Carbo	750 – 1000	142	117	1148	34,52	396,29	177,54

Tabla 2.2 Identificación geográfica y caracterización agroecológica de las zonas productoras de piñón en el Ecuador y determinación del rendimiento de semilla y aceite (Continuación)

Localidad	Rango de lluvias mm	Condiciones de cultivo		Rendimiento de semilla kg/ha	Contenido de aceite %	Rendimiento de aceite kg/ha	Rendimiento de aceite lts/ha
		Plantas cada 100 m	Número frutos/planta				
Olmedo – Sta Ana	750 – 1000	77	78	510,2	34,12	174,08	77,81
Pedernales – Canoa	1000 – 1250	125	45	482,6	34,35	165,77	72,11
Balzar – Olmedo	1500 – 1750	50	83	254	34,58	87,83	31,53
Ricaurte – Eloy Alfaro	1750 – 2000	250	18	354,7	31,10	110,31	38,39
Quevedo Km 20 – El Empalme	2000 – 2500	83	32	172,6	32,23	55,63	26,59

Fuente: Escuela Politécnica Nacional.

Tabla 2.3 Análisis en los residuos de extracción de semillas de piñón

Localidades	Nitrógeno (%)	Fósforo (%)	Potasio (%)
Quimí – La Pila	4.56	0.78	1.89
Canoa – Jama	4.03	0.78	1.78
Pedro Carbo	1.51	0.66	0.26
Olmedo – Sta. Ana	1.26	0.78	0.95
Pedernales – Canoa	4.00	0.86	0.17
Balzar – Olmedo	3.90	0.81	0.36
Ricaurte – Eloy Alfaro	3.30	0.80	0.43
Quevedo Km 20 – El Empalme	4.12	0.71	0.29

Fuente: Escuela Politécnica Nacional.

2.1.5 TIPOS DE PROCESOS¹

La separación de los aceites a partir de productos oleaginosos animales y vegetales, constituyen una rama propia y específica de la tecnología de las grasas. La diversidad de características de tales productos, obligan en su mayoría, a adoptar técnicas especiales en extracción. Las formas de extracción más frecuentes son mediante procesos químicos y físicos.

Todos estos métodos tienen la finalidad de obtener el máximo rendimiento para que el proceso resulte económico, conseguir un producto con el mínimo de impurezas y finalmente obtener una torta que pueda ser comercializada en el mercado.

La extracción de aceites vegetales ofrece mayores dificultades que para los de procedencia animal. En los vegetales, y en especial el aceite de semillas, la dificultad estriba sobre todo en que algunos sólidos están íntimamente unidos al aceite, por lo cual es preciso que la materia prima quede finamente dividida. En los casos de mayor dificultad se sigue un tratamiento a base de calor y a alta presión, para separar el aceite de los sólidos.

2.1.5.1 Procesos químicos

La extracción de aceite mediante procesos químicos se la realiza a nivel de laboratorio, ya que se usan para el muestreo de pequeñas porciones y para analizar propiedades químicas.

2.1.5.1.1 Extracción por solvente

La extracción por solvente se define como la acción de separar con un líquido una fracción específica de una muestra, dejando el resto lo más íntegro posible.

Se pueden realizar desde los tres estados de la materia, y se llaman de la siguiente manera: 1) extracción sólido – líquido; 2) extracción líquido – líquido y 3) extracción gas – líquido.

¹ BAILEY, ALTON, Aceites y grasas industriales, p. 422.

La primera forma es la más utilizada para la extracción con el equipo Soxhlet, es decir aplica para la obtención de principios activos de los tejidos vegetales, como es el aceite. La segunda tiene usos especialmente en química analítica cuando se extrae el producto de una reacción efectuada en fase líquida con un solvente específico para separar uno o algunos de los componentes. Por último la tercera, gas – líquido, que ordinariamente se llama ‘lavado de gases’, es el burbujeo por una fase líquida de un gas que se quiere lavar o purificar.

El proceso de extracción de la mayoría de las sustancias tiene muy baja eficiencia, es decir una vez que se agrega el solvente, lo que está en contacto íntimo con lo extraíble se satura enseguida, por lo que hay que filtrar y volver a tratar con solvente fresco.

Eso implica gran cantidad y mucha manipulación del solvente aparte de la atención personalizada que la operación requiere. Como muchas veces lo que se quiere recuperar es el extracto y no la muestra extraída, habrá que evaporar todo el solvente para recuperarlo. Por otro lado estas tareas debieran realizarse en una campana espaciosa dado que los solventes se suelen utilizar calientes, es decir con una alta tensión de vapor.

El equipo utilizado comúnmente, el extractor Soxhlet, realiza un sinnúmero de extracciones de manera automática, con el mismo solvente que se evapora y condensa llegando siempre de manera pura al material.

La extracción Soxhlet se fundamenta en las siguientes etapas: 1) colocación del solvente en un balón. 2) ebullición del solvente que se evapora hasta un condensador a reflujo. 3) el condensado cae sobre un recipiente que contiene un cartucho poroso con la muestra en su interior. 4) ascenso del nivel del solvente cubriendo el cartucho hasta un punto en que se produce el reflujo que vuelve el solvente con el material extraído al balón. 5) Se vuelve a producir este proceso la cantidad de veces necesarias para que la muestra quede agotada. Lo extraído se va concentrando en el balón del solvente.

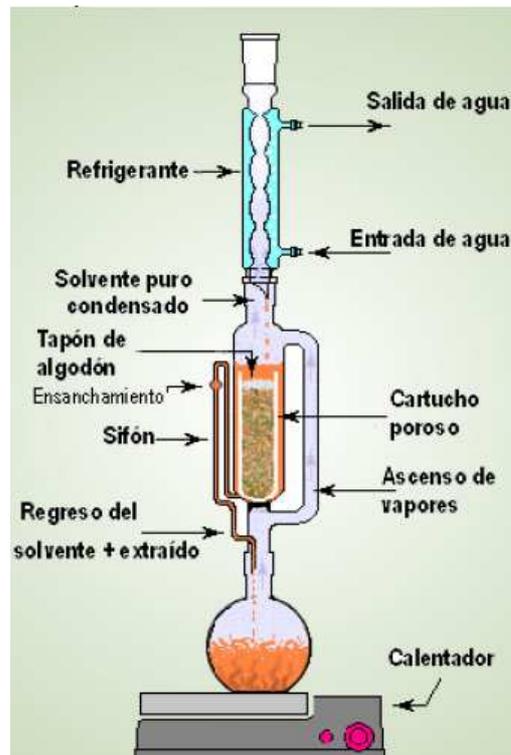


Figura 2.8 Extracción con soxhlet

Cuando se parte de semilla u otros materiales que contienen grandes cantidades de aceites y pequeñas de sólidos como es el caso de la *Jatropha curcas*, el aceite que queda sin extraer, en el residuo, es solo una mínima fracción del total; sin embargo, cuando se trata de semillas como la soya, con bajo contenido en aceite, el que queda en el residuo puede llegar a ser del 20 al 25% del total. En estos casos, conviene extraer con disolventes este aceite retenido, consiguiéndose, por este procedimiento, disminuir el porcentaje a menos del 1%. Los inconvenientes principales de la extracción con disolvente son el elevado costo de la instalación inicial y la tendencia de ciertas semillas oleaginosas a desintegrarse en presencia del disolvente haciendo su manipulación muy dificultosa.

2.1.5.2 Procesos físicos

Estos tipos de procesos se los realiza para la extracción industrial de aceites, tanto comestibles como para otros usos. A continuación se referirá a los distintos procesos que se basan en la extracción de aceite por medio de altas presiones.

2.1.5.2.1 Prensado discontinuo abierto

Las prensas de tipo abierto pueden subdividirse en prensas de placa y prensas cajetín:

La estructura de una prensa abierta o anglo americana se compone de cuatro sólidas columnas verticales, cuyos extremo superior e inferior están fijos a sendos bloques de acero macizo. Dentro de la jaula abierta, formada por las columnas y suspendida por la parte superior de la prensa, hay una serie de placas horizontales de acero. Estas placas llenan, apretadamente, el espacio encerrado por las columnas, estando igualmente espaciadas entre sí a intervalos de 7,5 a 12,5 cm y suspendidas unas de otras por medio de conexiones, que permiten prensar todo el armazón. En la parte inferior del conjunto de placas y unida a un vástago accionado también por debajo, existe una placa de fonda, más pesada. El material que debe prensarse se moldea en tortas rectangulares, que se colocan entre las distintas placas suspendidas. Al levantar el vástago dichas tortas sufren una compresión, que hace que el aceite fluya de las mismas y caiga dentro de una bandeja, colocada sobre el bloque de fondo.

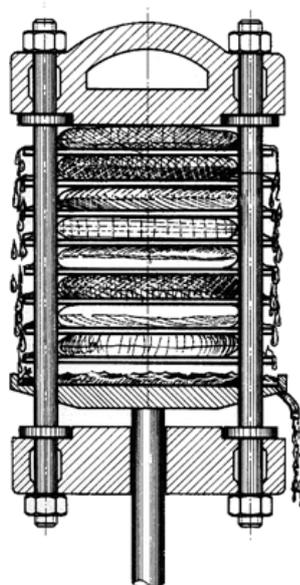


Figura 2.9 Prensa de placas

Las prensas de cajetines disponen de una serie de cajones en las que se introducen la torta y que evitan el empleo de telas. La prensa completa incluye:

un bastidor de drenaje corrugado, una esterilla de acero corrugado y perforado, que descansa sobre el bastidor de drenaje y se coloca debajo de la torta; y unos ángulos de acero que sobresale de la parte baja de cada placa, para formar los lados del cajetín que encierran la torta. El tamaño ordinario de los cajetines es de unos 5 cm de profundidad por 90 de largo, 35 de ancho en la parte de atrás y 36.5 adelante, ensanchándose ligeramente de atrás a adelante para facilitar la inserción y extracción de la torta. Las prensas se suelen construir para 15 o 16 cajetines. Las prensas de placa para tamaño equivalente poseen 24 placas, razón por la que tienen mayor capacidad que las de cajetines.

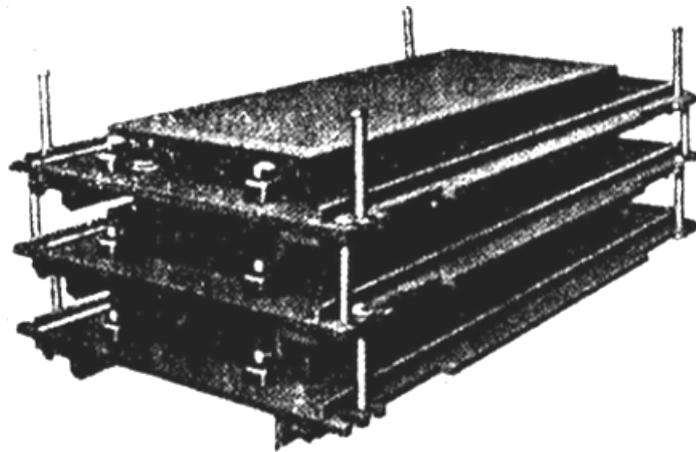


Figura 2.10 Prensa de cajetines

Previamente se necesita un accesorio esencial el cual es un aparato moldeador de la torta, ya sean prensado de placas o cajetines, el mismo que suministra automáticamente la cantidad apropiada de moltura procedente del horno de cocción y reunir las en una torta de tamaño apropiado, para ser colocadas dentro de las telas de la prensa, estos aparatos actúan también hidráulicamente.

2.1.5.2.2 Prensado discontinuo cerrado

Las prensas de tipo cerrado pueden subdividirse en prensas de vaso y de jaula. Este tipo de prensas pueden trabajar a presiones superiores a las de tipo abierto y son particularmente apropiadas para el prensado de semilla oleaginosa de alto contenido en aceite y poco material fibroso, que si se prensan en las de tipo abierto, tienden a romper las telas. Las semillas de ricino

u otras que se deseen exprimir sin tratamiento térmico, se prensan satisfactoriamente solo con prensas de este tipo; ya que pueden desarrollar las altas presiones necesarias para extraer eficazmente el aceite de semillas frías.

Las jaulas para este tipo de prensa se fabrican redondas o cuadradas, componiéndose generalmente de una serie de barras de acero muy próximas entre sí o de placas con ranuras, soportadas por dentro y solidarias de un bastidor o anillo rígido, por medio de gruesas barras de acero. Los canales a través de los cuales fluye el aceite aumentan de anchura de adentro hacia afuera de la jaula para disminuir cualquier tendencia a la obstrucción con partículas sólidas. Las jaulas trabajan verticalmente, dentro de un bastidor semejante a la prensa angloamericana. El aceite se exprime accionando de abajo hacia arriba un pistón muy ajustado, por medio de un vástago que trabaja hidráulicamente. Las jaulas están diseñadas para soportar presiones de 420 kg/cm². En las grandes instalaciones, las jaulas pueden desmontarse fácilmente y separarse de las prensas, disponiéndose de otras auxiliares para su llene y descarga, además de una serie de ellas para la terminación del proceso. Se dispone también de transportadores para las pesadas jaulas de una prensa a otra.

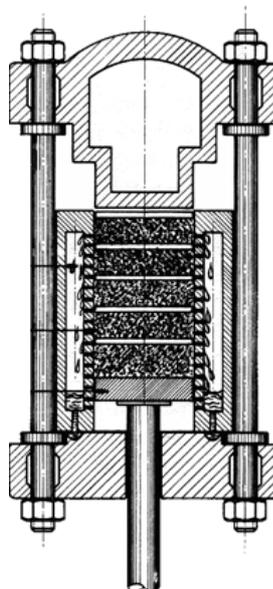


Figura 2.11 Prensa de jaula

La prensa de vaso es una forma especial de prensa de jaula, usada en la extracción de la manteca de cacao u otras grasas sólidas, a temperatura ordinaria. La jaula se sustituye por una serie de secciones cilíndricas de poca longitud y calentados con vapor. Las paredes de los vasos son sólidas y el drenaje se efectúa entre las placas perforadas y esteras filtrantes, colocadas en el fondo de cada sección. Estas prensas se suelen diseñar para trabajar a presiones intermedias entre las prensas de tipo abierto y las de jaula. La ventaja de las prensas de vaso reside en la posibilidad de calentar el producto oleaginoso y la manipulación de materiales muy blandos y no fibrosos, tales como las pulpas de frutas, a elevadas presiones, sin que pasen materias sólidas al aceite. Su capacidad es, sin embargo pequeña en relación al tamaño y coste, necesitándose más mano de obra que en los otros tipos de prensa.

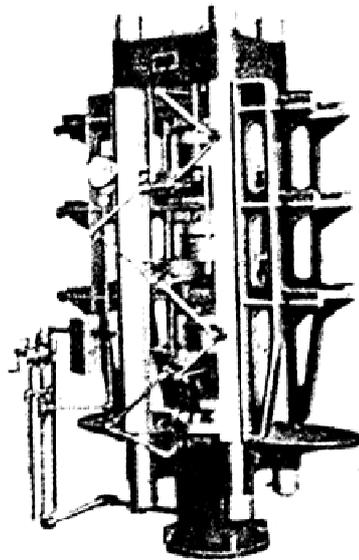


Figura 2.12 Prensa de vaso

Ciertas semillas con elevado contenido de aceite como la copra (coco) y la *Jatropha curcas* (piñón), son difíciles de someter satisfactoriamente a expresión por medio de equipos discontinuos. En algunas instalaciones, se suele deshacer la torta procedente del primer prensado y someterlas a un segundo. La práctica requiere triturar dos veces la semilla, obteniéndose además generalmente, en el segundo prensado, un aceite de calidad inferior.

Las semillas en las que, por simple prensado hidráulico, no se logra disminuir el contenido residual de aceite, hasta valores suficientemente bajos, se tratan preferentemente en prensas de tornillo o expeller de trabajo continuo.

2.1.5.2.3 Prensado continuo (Máquina expeller)

Las prensas continuas en su mayor parte son máquinas de alta presión diseñadas para efectuar la obtención del aceite en un solo paso y destinadas, generalmente a una sola clase de semilla.

Las prensas continuas ahorran mucha mano de obra respecto a las hidráulicas. Se adaptan a una amplia gama de materias y, en la mayor parte de los casos, dan un rendimiento en aceite algo superior a las hidráulicas. Su mayor inconveniente estriba en el gasto de energía, relativamente alta, a la vez que requieren una buena práctica de operación y conservación y no se adaptan bien a procesos intermitentes.

La prensa de tornillo es esencialmente una prensa de jaula, en la que, la presión se desarrolla por medio de un eje rotatorio o tornillo sinfín en vez de un pistón de acción intermitente. En la jaula se desarrolla una presión extremadamente alta, del orden de 140 a 2800 kg/cm², por medio de la acción del eje contra un orificio o estrangulación regulable, que restringe la descarga de la torta al extremo de la jaula. Las partes interiores de las jaulas, de estas máquinas están construidas de barras de aceros planas, colocadas alrededor de la periferia de la jaula y mantenidas en su sitio por una especie de cuña rígida. Las aberturas entre las barras de la jaula, a través de las cuales fluye el aceite, miden de 0.013 a 0.005 cm y se pueden ajustar variando el grosor de los espaciadores entre barras; existen también prensas que tienen camisas agujereadas en lugar de las barras antes descritas, esto debido a la versatilidad que ofrecen en construcción y operación.

Las instalaciones de prensado continuo de semillas oleaginosas se pueden dividir en dos tipos, semejantes en principio, pero ligeramente diferentes en construcción. Uno de ellos, el expeller Anderson, emplea una jaula vertical, que recibe la semilla y la prensa obteniendo, aproximadamente, la mitad del aceite, después de lo cual la semilla parcialmente extraída, se transporta al interior de

otra jaula horizontal en la que se obtiene el resto del aceite, bajo una presión superior. Los ejes de los tornillos sinfín están accionados por un motor eléctrico de 40 HP, provisto de reductor de velocidad. Para la eliminación de la gran cantidad de calor generado por la fricción, la jaula se enfría mientras la máquina trabaja, haciendo pasar el aceite exprimido por agua y pulverizando el aceite frío sobre el exterior de la jaula. El tornillo sinfín principal puede estar también refrigerado con agua, por su parte interna dependiendo del calibre del eje del tornillo.

La prensa de tipo French dispone de una sola jaula, pero el eje está dividido en dos secciones, que giran a diferentes velocidades, a fin de tener al inicio una presión relativamente baja y posteriormente tener una presión superior en la parte final.



Figura 2.13 Prensa tipo expeller

El aceite obtenido con los expeller contiene siempre más cantidad de sólidos que el precedente de prensas hidráulicas. Para filtrar estos productos, se dispone de rejillas y dispositivos de drenaje, que separan las porciones mayores y las reúne con las cargas de las máquinas. Al final de todas las operaciones, se suele pasar el aceite por un filtro-prensa, para eliminar aquellas partículas que, por su tamaño pequeño, no han sido separados por las

rejillas. Es muy importante la separación de sedimentos o barros, ya que su presencia aumenta las pérdidas por neutralización por encima de lo ordinario.

2.1.6 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE PROCESOS

En base al estudio bibliográfico y también a la investigación de experiencias en el campo de extracción, se analizará de forma detallada las ventajas y desventajas de cada uno de los procesos industriales posibles para la extracción de aceite vegetal y de esta manera encontrar el proceso óptimo para la obtención de aceite de la *Jatropha curcas*.

2.1.6.1 Ventajas

2.1.6.1.1 Extracción por solvente

- La mayor ventaja de la extracción por medio de solvente y el equipo Soxhlet, es que la cantidad de aceite residual en la muestra extraída es bastante pequeña, lo que denotaría que es un proceso con alta eficiencia de extracción.

2.1.6.1.2 Prensado discontinuo

- Las máquinas no requieren de mucha tecnología para su funcionamiento, razón por la cual el costo de estas es relativamente bajo respecto a los demás procesos.
- La estructura de este tipo de máquina es sencilla, ya que consiste en vástagos que por efecto de algún mecanismo simple ya sea de cremallera, de pistón, entre otros; ejercen presión suficiente para la extracción de aceite.
- Dada la estructura simple de la máquina y la menor tecnología de funcionamiento, el mantenimiento no requiere de mano de obra especializada pues no hay riesgos de que personal de baja calificación realice dicha tarea.

2.1.6.1.3 Prensado continuo (Máquina expeller)

- El rendimiento de volumen del aceite extraído es bastante satisfactorio, por lo cual es el proceso más común que se usa en aplicaciones industriales de extracción de aceite vegetal.

- Mediante este proceso se consigue una mejor separación de la torta y el aceite extraído.
- Estas máquinas poseen una alta capacidad de producción, además que pueden funcionar ininterrumpidamente ya que no se tiene que desmontar ninguna de sus partes para poder abastecer carga a procesarse.
- El proceso continuo no requiere de varios operadores, razón por la cual se refleja en ahorro de costos de mano de obra.

2.1.6.2 Desventajas

2.1.6.2.1 Extracción por solvente

- El proceso de extracción de aceite por solvente requiere un pretratamiento de la materia prima en el cual primero se la debe triturar, hasta un tamaño determinado, lo cual requiere otro proceso; además se la debe calentar a este machacado con vapores a altas temperaturas, lo cual es un riesgo para el operario; y por último, el acondicionamiento del lugar en el cual se realiza dicha extracción, debe ser controlado tanto en temperatura como en humedad.
- La extracción por solvente tiene una limitación, la cual es, que una estación industrial resultaría con un costo excesivo tanto por infraestructura cuanto por la cantidad de solvente que se requeriría.
- La mano de obra debe ser especializada, ya que se necesita conocimientos de laboratorio, mismos que encarecerían el costo de mano de obra.
- Este proceso no es un proceso continuo ya que una vez realizada la extracción por solvente, se requiere del reposo del producto terminado hasta alcanzar temperaturas manipulables.

2.1.6.2.2 Prensado discontinuo

- Por las características que este proceso tiene, el tiempo de producción no se lleva a cabo de manera ininterrumpida, dado que, tanto el abastecimiento de la materia prima, cuanto la descarga del producto procesado, se requiere desmontar partes de la máquina como son las bandejas de tortas y de aceite, lo cual perjudica en el factor de producción.

- Para la separación de la parte sólida de la líquida, este proceso requiere el uso de telas filtrantes, la cuales debido a la cantidad de presión que se ejerce en el proceso, tienden a desgastarse rápidamente.

2.1.6.2.3 Prensado continuo (Máquina expeller)

- El proceso de prensado continuo, requiere una cantidad de energía mayor respecto a los procesos antes mencionados, es común ver en máquinas comerciales de este tipo el uso de motores de gran potencia.

2.1.7 SELECCIÓN DE PROCESO

Una vez determinada las ventajas y desventajas del los tipos de procesos, se puede llegar a la selección de la alternativa adecuada.

Tabla 2.4 Matriz de selección de procesos de extracción de aceite

Proceso	Factibilidad económica	Facilidad operación y mantenimiento	Capacidad de producción	Porcentaje de aceite obtenido	Total (/20)
Extracción por solvente	2	2	1	5	10
Prensado discontinuo	3	3	3	3	12
Prensado continuo	3	4	5	4	16

Calificación: 5 Muy alto, 4 Alto, 3 Medio, 2 Bajo, 1 Muy bajo

Tomando en cuenta parámetros como costos, facilidad de operación y mantenimiento, capacidades de producción y porcentaje de aceite obtenido, se ha llegado a elegir la alternativa de un proceso continuo de prensado por medio de una máquina expeller.

Esta máquina tipo expeller tiene las cualidades que se requiere para el presente proyecto, ya que va dirigido a usos industriales y/o artesanales, es decir, la tecnología de manejo y la estructura que presenta para su mantenimiento, sugieren una gran versatilidad para los diferentes operadores.

CAPITULO 3

3. DISEÑO DE LA MÁQUINA EXPELLER

3.1 ALTERNATIVAS DE EXTRACCIÓN DE ACEITE VEGETAL

Una vez determinado el proceso óptimo para el desarrollo del proyecto, se debe primero analizar las características propias de una máquina expeller además de las diferentes máquinas que existen.

3.1.1 CARACTERÍSTICAS DEL EXPELLER

Desde el punto de vista de ingeniería, una expeller es una bomba y presenta las siguientes características²:

1. El extrusor es un intercambiador de calor, dado que tiene una gran superficie de contacto, la pared interna del extrusor es limpiada en cada paso del tornillo, haciendo a esta máquina un intercambiador de calor por conducción.
2. La presión y temperatura a lo largo del extrusor (dentro de los límites), pueden lograrse mediante el diseño del tornillo y las condiciones de operación.
3. El grado de mezcla y triturado que se impondrá sobre el material son parámetros que pueden ser modificados por la combinación de diseño del tipo de tornillo, salida del extrusor y velocidad de extrusión.

Con los años, los tornillo extrusores se han investigado a fondo, y su trabajo es razonable y bien entendido. La principal diferencia entre un solo tornillo de extrusión y un expeller de doble tornillo se encuentra en el mecanismo de transporte. Un solo tornillo extrusor tiene un tornillo giratorio ajustado dentro de un tambor.

Para lograr la máxima producción, el material debe deslizarse tan libremente como sea posible en la superficie del tornillo y ajustarse lo más posible a la pared de la camisa. Esta última restricción puede satisfacerse mediante la introducción adicional de fricción en el cuerpo de la camisa por medio de ranuras que pueden ser, como se explicó anteriormente, barras o agujeros en la sección cilíndrica de la camisa del conjunto. Dado que, como se verá más

² MERCIER, LINKO, HAPER; Extrusion cooking, p.17.

adelante, la eficiencia de bombeo de un solo tornillo extrusor es relativamente baja, una cantidad considerable de energía del motor no se utiliza para el bombeo, en lugar de eso es convertida en calor.

Existen varios tipos de expeller a analizar, cada uno de ellos se diferencian por el tipo de tornillo para realizar la extrusión, se puede mencionar los siguientes tipos de husillos: simple y doble.

Un expeller consiste en tres regiones distintas: una zona que permite la alimentación del material a procesar; luego una zona por donde pasa el material que ingresó ya fundido y por último una zona donde la acumulación de presión por el proceso debe ser liberada.

3.1.2 EXPELLER DE TORNILLO SIMPLE

El expeller de tornillo simple consiste en un solo husillo que gira libremente dentro de un cilindro, barril o camisa; estos dos elementos interactúan a manera de una bomba elevando la presión de la mezcla, extrayendo el aceite y drenándolo a través de las ranuras u orificios y liberando la torta por medio de un agujero llamado dado.

Para elevar la presión en un tornillo simple existen variaciones de geometría que influyen directamente en el comportamiento de la mezcla mientras permanece dentro del cilindro, además la forma del tornillo también influye en la potencia requerida para la extrusión y por ende en el calor generado en el proceso, dado que gran parte de la energía se libera en calor.

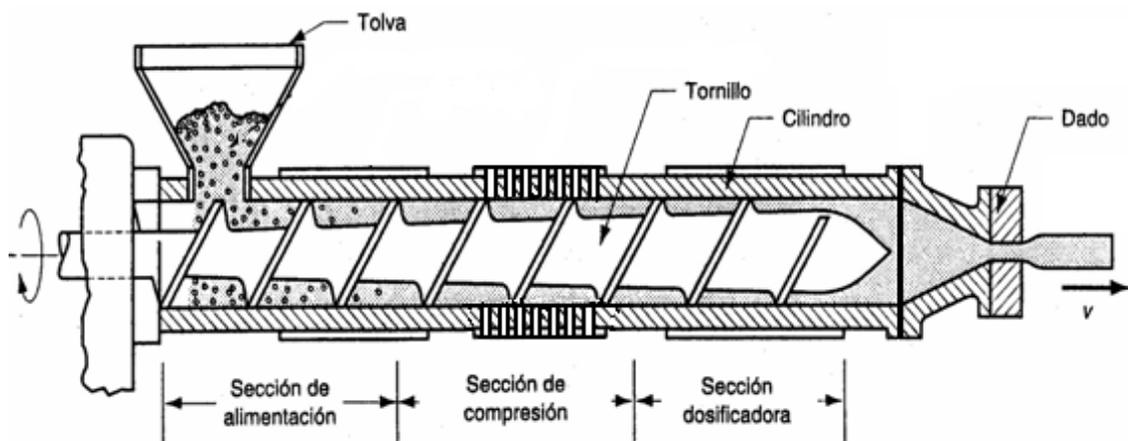


Figura 3.1 Corte longitudinal de un expeller estándar

En la figura 3.1 se aprecia las tres secciones antes descritas de un expeller estándar, la zona de alimentación, la zona de medición o compresión, la zona final o dosificadora.

Desde la zona de alimentación hasta la zona dosificadora la compresión aumenta progresivamente y en ésta última es donde la mayoría de la energía mecánica es disipada, causando que la temperatura de las semillas se incremente rápidamente transformándola de un estado granular, a un estado de masa plástica, esta masa estará compuesta de parte líquida y sólida, las cuales se separarán por medio de los agujeros en la camisa y a través del dado, respectivamente.

3.1.3 EXPELLER DE TORNILLO DOBLE

Un extrusor de tornillo doble consiste en dos husillos que giran ya sea en el mismo sentido o en sentido contrario, dentro de una misma camisa, esto permite una mejor mezcla de material y una mejor eficiencia en lo que respecta a la energía mecánica de entrada, sin embargo el diseño es bastante complejo en función de que teóricamente existen diferentes disposiciones de operación de los mismos, incluso existen modelos teóricos que en la realidad son imposibles de fabricar. En el diseño de estos tornillos la geometría variable no es posible dado que los dos tornillos deben ser solidarios entre sí, es decir, no se podría tener configuraciones cónicas en este tipo de expeller.

En la presente investigación ha resultado escasa la información que respalde el diseño de este tipo de expeller, sin embargo, es importante mencionar que existen los mismos. De ahí que el principio de funcionamiento es similar que los tornillos simples, es decir, existen las tres zonas típicas de un expeller: alimentación, compresión y dosificación.

Uno de los puntos que más se ha tomado en consideración es el hecho que al tener un expeller de este tipo, hay varias restricciones conocidas: a más de necesitar un sistema motriz único se requiere una disposición compleja en el mecanismo motriz de ambos ejes, ya que los dos giran al mismo tiempo; además la posibilidad de tener dos tornillos duplica el costo de la máquina

primero porque se necesita construir dos tornillos y segundo porque la camisa contenedora debe tener una disposición particular a la forma de los tornillos.

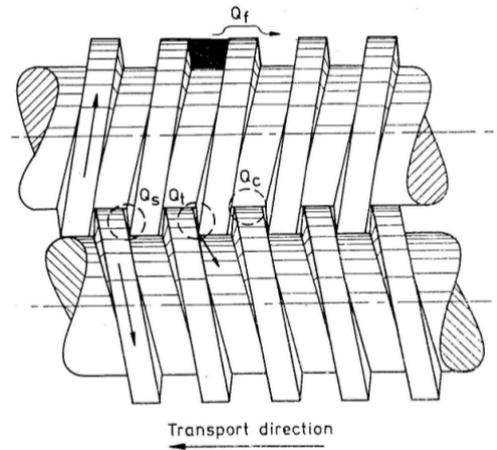


Figura 3.2 Expeller de doble tornillo

3.2 PARÁMETROS DE OPERACIÓN

En el presente numeral, se describirán los parámetros de operación que la semilla de *Jatropha curcas* debe poseer en el extrusor, a fin de conseguir eficiencia mecánica, cantidad de aceite aceptable y temperaturas ideales para obtener aceite de buena calidad.

3.2.1 TEMPERATURA

La temperatura en el proceso de extracción de aceite tiene que estar en el intervalo de un rango aceptable, esto en base a experiencias empíricas que han sido proporcionadas por personas que han trabajado con esta semilla. El control de temperatura es importante, debido a que en un proceso de extracción en la cual ésta supere los 90 C el aceite obtenido tiende a elevar el contenido de fósforo, lo cual en el momento de fabricar biodiesel se produce daños dentro de la cámara de combustión de los motores. En conclusión el proceso debe ser eficiente para que la energía mecánica no se disipe excesivamente en calor.

En la zona de dosificación la temperatura debe ser superior que en la zona de compresión, para que el producto sólido a extruirse tenga facilidad de desfogue.

3.2.2 HUMEDAD

La humedad de la semilla se la determina antes de entrar al proceso de extrusión, esta humedad debe ser controlada, ya que las semillas en sus células poseen, aparte de aceite, cierta cantidad de agua. Es necesaria la disminución de la humedad, desde el almacenamiento de la semilla, a fin de evitar la germinación y/o descomposición de ésta en los silos de bodegaje, así como también en el proceso mismo de extracción de aceite.

Investigaciones realizadas por parte de la Escuela Politécnica Nacional, han determinado que la humedad óptima de almacenamiento y previa a la extracción de aceite, oscila entre el 7% y el 8 %; sin embargo, otras investigaciones empíricas han determinado que se puede procesar la semilla hasta con un 12% de humedad.

En países centro americanos que están iniciando la explotación de esta semilla, el proceso de secado se lo hace de una manera artesanal, es decir, tienden la semilla sobre lonas a la intemperie para que sean secadas por los rayos solares, sin embargo, en países industrializados el proceso se lo realiza por equipos de secado de gran capacidad, optimizando el proceso y controlando mejor la humedad.

3.2.3 PRESIÓN DE EXTRACCIÓN

La presión necesaria para poder extraer aceite vegetal a partir de semillas oleaginosas requiere ser elevada, ya que por efecto de ésta, las células oleaginosas comienzan a romperse y logran que el aceite dentro de ellas empiece a fluir.

Cada semilla, como es de esperarse, tiene su propia presión de extracción; en la presente investigación no se ha podido recolectar esta información por medios bibliográficos, pero se ha optado por utilizar la experimentación a fin de determinar la presión necesaria.

Para poder realizar el experimento se utilizó una prensa hidráulica de gran capacidad y la materia prima necesaria, arrojando el dato experimental de que

la semilla de la *jatropha curcas* requiere una presión de extracción en frío de 30 MPa.

Obviamente este dato conseguido experimentalmente, no es determinante más bien referente debido a que en el proceso de extracción entra la variable de temperatura, misma que al incrementarse, disminuye la viscosidad del aceite logrando una mejor extracción.

En conclusión la presión mínima a la cual, referencialmente, se debe elevar en el proceso es de 30 MPa.

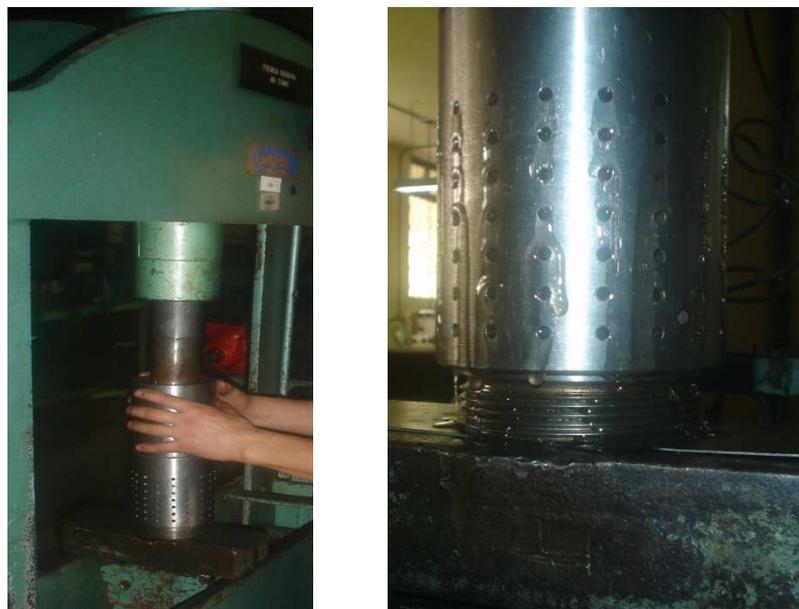


Figura 3.3 Determinación experimental de presión de extrusión para *jatropha curcas*

3.2.4 CAPACIDAD DE PROCESAMIENTO

La capacidad de procesamiento está determinada por la cantidad de semilla que se pueda recolectar en nuestro medio y también por la demanda que el aceite pueda tener una vez extraído, de ahí que se debe tomar en cuenta las plantaciones que actualmente existen en nuestro país, según estudios de la Escuela Politécnica Nacional en el país existen aproximadamente 700 hectáreas de esta planta, a manera de cercas vivas en su mayoría, además se han determinado los rendimientos de semilla por hectárea según distintas

zonas de precipitación, obteniendo un promedio de 850 kg de semilla por hectárea por cosecha, encontrándose lugares con hasta 1275 kg de semilla por hectárea. Debido al alto porcentaje de germinación, 80%, las semillas deben ser procesadas de una manera inmediata al proceso de despulpado, de lo contrario empezarán a germinar en el lugar de almacenamiento; es por esta razón, que se requiere de una máquina con capacidad de procesamiento capaz de extraer el producto dentro de los 20 a 30 días de cosecha.

Tomando como inicio estos datos, en promedio se obtendrían 595.000 kg de semilla por cosecha a nivel nacional, el dimensionamiento de la capacidad de producción de la máquina, se ha tomado, como el 8% de la oferta del total de las semillas a nivel nacional, 47.600 kg de semilla, este valor se debe procesar a 30 días, trabajando un promedio de 8 horas diarias.

En conclusión, una máquina con capacidad de 200 kilogramos por hora, satisfaría, el 8% de la actual oferta de semillas, sin embargo, si los proyectos tanto privados como estatales para la producción de aceite entran en marcha, la máquina podrá trabajar mayor número de horas diarias, logrando procesar más semilla.

3.3 SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

Una vez estudiadas los dos tipos de expeller existentes, para el actual proyecto, se elegirá la alternativa óptima en base a: diseño, costos, construcción y mantenimiento.

3.3.1 MATRIZ DE SELECCIÓN

La matriz que se presenta a continuación tiene los aspectos más relevantes, para desarrollo del proyecto priorizados según su importancia, sobre una calificación de 100 puntos.

Tabla 3.1 Matriz de selección de alternativa de las máquinas expeller

Parámetros	Calificación en importancia/100	Expeller tornillo simple	Expeller tornillo doble
Costos de fabricación	25	25	15
Factibilidad de diseño	20	20	10*
Capacidad de producción	15	10	15
Facilidad tecnológica de construcción	10	10	7
Facilidad de operación	10	10	10
Mantenimiento	10	10	6
Eficiencia mecánica	10	7	10
Resultado	100	92	73

Nota (*): Falta de fuentes de información para diseñar.

Como se puede apreciar el expeller de tornillo simple es la alternativa que más se acomoda a las necesidades de trabajo y posibilidades de recursos disponibles, por lo cual el proyecto se desarrollará entorno de la misma.

3.4 ANÁLISIS DEL EXPELLER DE TORNILLO SIMPLE

3.4.1 PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DEL TORNILLO

Los parámetros geométricos son determinantes en el comportamiento del producto dentro de un expeller, por lo cual es necesario un análisis de los mismos, la forma del tornillo definirá a la máquina como extrusor de bajo, medio o alto corte.

Un expeller en el cual el corte se va incrementando gradualmente, logra que el rango de humedad del producto disminuya y la temperatura del mismo aumente, dado que gran parte de la energía del motor de la máquina se transfiere en calor.

El diseño del tornillo en su geometría define las características de operación del tornillo simple.

Tabla 3.2 Características de operación de un expeller de tornillo simple

Variable de operación	Expeller de corte bajo	Expeller de corte medio	Expeller de corte alto
Humedad de la materia prima (%)	25 – 35	20 – 30	12 – 20
Temperatura máxima del producto (C)	50 -120	125 - 175	150 – 200
Relación Lt/Dt	5 – 8	10 – 20	4 – 12
Relación de compresión	1 : 1.5	2 - 3 : 1	3 – 5 : 1
Velocidad del tornillo (rad/s)	3 – 10	10 – 25	30 – 45
Energía mecánica neta de entrada (kW – hr / kg)	0.03 – 0.06	0.04 – 0.08	0.10 – 0.14

Fuente: Food Extrusion Science and Technology

Según la tabla anterior el tipo de expeller a diseñarse debe ser uno de bajo corte, ya que ciertos parámetros como la temperatura, la velocidad y la potencia de la máquina deben estar en los rangos característicos de este tipo de extrusor para extraer el aceite de la *jatropha curcas*.

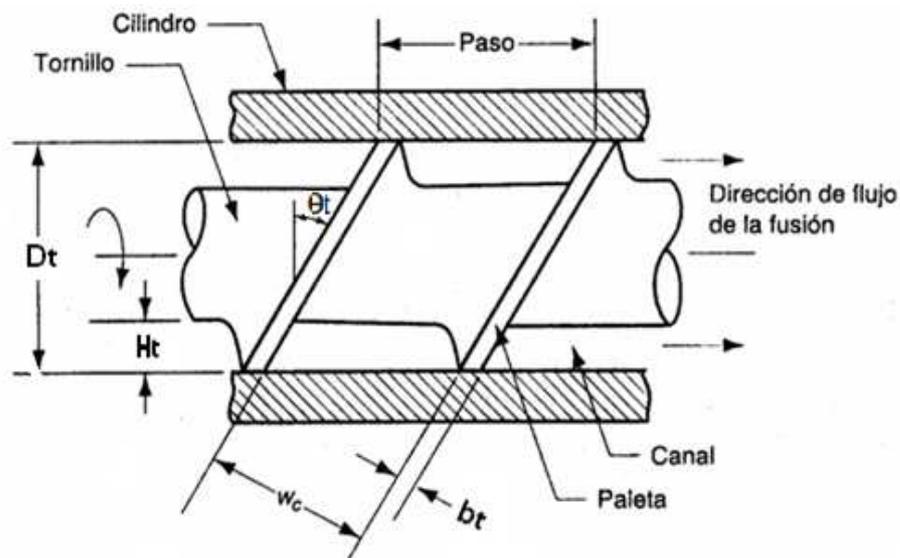


Figura 3.4 Geometría típica de un tornillo extrusor

La geometría típica de un tornillo extrusor³ se describe en la figura 3.4 El tornillo consiste en paletas o aspas espirales (hilos) con canales entre ellas, que conducen el material. La pared del hilo tiene un ancho b_t , y está hecha de acero endurecido para resistir el desgaste al girar y al rozar contra el interior del cilindro.

Al girar el tomillo, las paletas empujan el material hacia adelante a través del canal desde la tolva hasta el dado. Aunque no se aprecia en el diagrama, el diámetro de la paleta es más pequeño que el del cilindro D_t con un pequeño claro, H_{ct} , de aproximadamente 0.50 mm. La función de este claro es limitar la fuga de la fusión hacia atrás, a través del canal conductor.

El canal tiene un ancho W_t y una profundidad H_t . El radio medio r_m es la media de la altura del hilo y el diámetro del husillo.

$$w_t = (\pi \cdot D_t \cdot \tan(\theta_t) - b_t) \cdot \cos(\theta_t) \quad \text{Ecuación 3.1}$$

$$r_m = \frac{D_t - H_t}{2} \quad \text{Ecuación 3.2}$$

El tornillo tiene un paso p_t y un ángulo de hélice Θ_t que se determina mediante la relación:

$$\theta_t = \tan^{-1} \left(\frac{p_t}{2 \cdot \pi \cdot r_m} \right) \quad \text{Ecuación 3.3}$$

Una vez determinados los parámetros geométricos del tornillo del expeller se debe analizar el comportamiento del flujo cuando este se encuentra en operación.

³ GROOVER, Fundamentos de manufactura moderna, p.314.

3.4.2 ANÁLISIS DE FLUJO NEWTONIANO EN UN EXPELLER DE TORNILLO SIMPLE⁴

Un solo tornillo de extrusión consiste en tres regiones distintas: una zona de transporte de sólidos, en la que el material es transportado en forma de un sólido elástico y es precalentado hasta la temperatura de fusión; una zona de fusión, en la cual el producto se transforma en una masa plástica; y una zona de bombeo, en la que la presión necesaria para empujar el material a través de la apertura del dado, es producida.

El comportamiento del flujo dentro del extrusor se lleva a cabo como un fluido no newtoniano, es decir, que su viscosidad varía con respecto a su temperatura y presión.

Por razones de simplificación, se va a desarrollar un proceso ideal para el material, por ejemplo, una fusión isotérmica newtoniana, separada de la zona de alimentación por un proceso de fusión instantánea. Es evidente que, debido a la continuidad de estas tres zonas se debe tener el mismo rendimiento entre ellas. Las diferencias de presión en las tres zonas deben ser tomadas en cuenta.

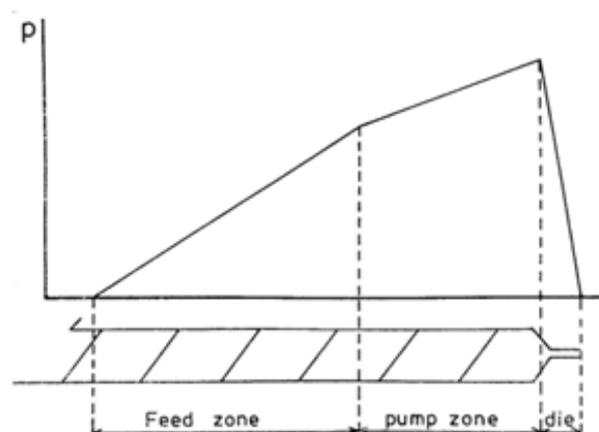


Figura 3.5 Diagrama simplificado de incremento de la presión en un extrusor de tornillo simple

Para el análisis en la zona de bombeo de un extrusor de tornillo simple, el tornillo es considerado como estacionario y se asume que la camisa se mueve

⁴ MERCIER, LINKO, HAPER; Extrusion cooking, p.20.

alrededor del mismo. A fin de simplificar el estudio, el canal se desenrollada. El flujo puede ser analizado teniendo en cuenta las ecuaciones de movimiento entre dos placas paralelas, bajo las aproximaciones que las fuerzas de viscosidad dominan a las fuerzas inerciales y a las fuerzas de gravedad, y que el canal tiene una sección transversal uniforme.

Para el sistema de coordenadas, se adopta la convención normal en la tecnología de extrusión, donde el eje z indica la dirección hacia abajo del canal, el eje y indica la altura del canal y el eje x es tomado en la dirección transversal del canal.

Bajo la hipótesis de que el canal es más ancho con respecto a su altura, las ecuaciones del movimiento se reducen a:

$$\frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial z} \quad \text{Ecuación 3.4}$$

y,

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial x} \quad \text{Ecuación 3.5}$$

Donde P es la presión, τ denota el esfuerzo cortante para un fluido newtoniano:

$$\tau_{xy} = -\mu \cdot \frac{\partial V_z}{\partial y} \quad \text{Ecuación 3.6}$$

$$\tau_{xy} = -\mu \cdot \frac{\partial V_x}{\partial y} \quad \text{Ecuación 3.7}$$

Donde μ es la viscosidad. Las velocidades de la pared de la camisa relativa al canal del tornillo en las direcciones z y x son U_z y U_x :

$$U_z = \pi \cdot N \cdot D_t \cdot \cos(\theta_t) \quad \text{Ecuación 3.8}$$

$$U_x = \pi \cdot N \cdot D_t \cdot \sin(\theta_t) \quad \text{Ecuación 3.9}$$

Donde D_t es el diámetro del tornillo, N es la velocidad de rotación, y Θ_t es el ángulo de hélice.

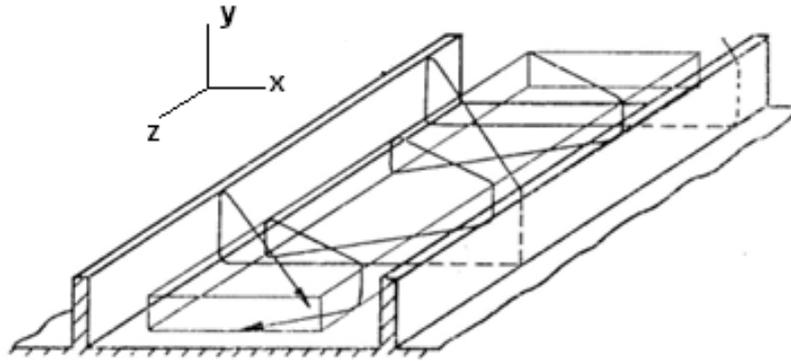


Figura 3.6 Canal desmenuado de una extrusora de tornillo simple con las líneas de corriente esquemáticas.

Debido a que el flujo lejos de la trayectoria de las paredes no tiene componente en la dirección y , se puede estar seguro de que el gradiente de presión en la dirección z no es una función de y . La combinación de las ecuaciones 3.5 y 3.6, y la integración de las mismas da después de la introducción de las condiciones límite $v = 0$ en $y = 0$ y $V_z = U_z$ en $y = H_t$

$$V_z = U_z \left(\frac{y}{H_t} \right) - \frac{H_t^2}{2 \cdot \mu} \cdot \frac{dP}{dz} \cdot \left[\left(\frac{y}{H_t} \right) - \left(\frac{y}{H_t} \right)^2 \right] \quad \text{Ecuación 3.10}$$

Donde V es la velocidad, H_t es la altura del canal. La integración de esta ecuación y la multiplicación por ancho del canal, W_t , da el caudal volumétrico Q :

$$Q = W_t \int_0^{H_t} v dy = \frac{W_t}{2} \cdot U_z \cdot H_t - H_t^3 \cdot \frac{W_t}{12 \cdot \mu} \cdot \frac{dP}{dz} \quad \text{Ecuación 3.11}$$

Sin embargo, el canal no es infinitamente ancho, y una corrección de la solución por placas paralelas es requerida. Los factores de corrección para el flujo de arrastre F_d y la flujo de presión F_p son introducidas:

$$Q = \frac{W_t}{2} \cdot U_z \cdot H_t \cdot F_d - H_t^3 \cdot \frac{W_t}{12\mu} \cdot \frac{dP}{dz} \cdot F_p \quad \text{Ecuación 3.12}$$

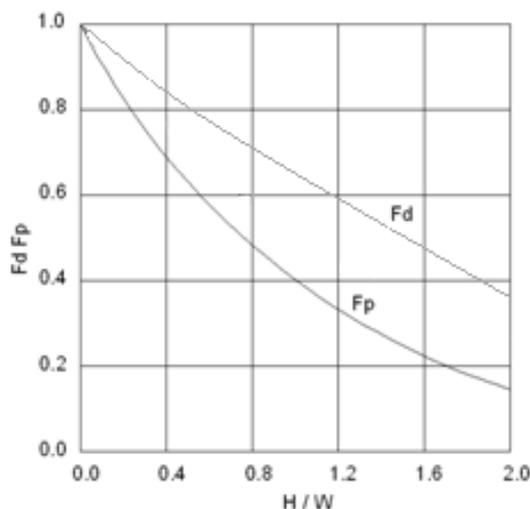


Figura 3.7 Factores de corrección del flujo de arrastre (Fd) y flujo de presión (Fp) como función de la geometría del canal Ht/Wt

En una dirección perpendicular al canal, no se produce el rendimiento neto. Un análisis similar para el rendimiento del flujo:

$$V_x = 3U_x \cdot \frac{y}{H_t} \cdot \left(\frac{2}{3} - \frac{y}{H_t} \right) \quad \text{Ecuación 3.13}$$

De esta ecuación se puede ver que el fluido localizado a $y = 2H_t / 3$ no tiene velocidad en la dirección x, y nunca llegará a la pared del canal.

En la expresión para el rendimiento (Ecuación 3.12), los dos términos diferentes que desempeñan un papel en la designación de un solo tornillo extrusor pueden distinguirse fácilmente. El primer término en el lado derecho, representa el flujo de arrastre, en relación con la velocidad de rotación del extrusor, y el segundo término da la presión de flujo, en relación con la presión del dado.

Para un tornillo simple, el caudal volumétrico (Ecuación 3.12) tiene la siguiente forma:

$$Q = \frac{\pi \cdot D_t \cdot N \cdot \cos(\theta_t) \cdot W_t \cdot H_t}{2} \cdot F_d - \frac{W_t \cdot H_t^3 \cdot \sin(\theta_t) \cdot P}{12 \cdot \mu_{app} \cdot L_t} \cdot F_p \quad \text{Ecuación 3.14}$$

El parámetro N es la velocidad de rotación del tornillo y está en relación el caudal volumétrico que se desea extruir, por lo tanto viene dada por:

$$N = \frac{R}{2.3 \cdot D_{tp}^2 \cdot H_{tp} \cdot g_j} \quad \text{Ecuación 3.15}$$

Donde:

R es el flujo másico requerido en libras,

D_{tp} es el diámetro del tornillo en pulgadas,

H_{tp} es la altura del hilo en pulgadas,

g_{jp} es la gravedad específica de la jatropha curcas.

Debido a que el material dentro del extrusor se comporta como un fluido no newtoniano, se debe realizar una corrección a esta, para que se aproxime a este tipo flujo, para lo cual se utiliza la razón de corte:

$$\gamma_{app} = \frac{\pi \cdot N \cdot D_t}{H_t} \quad \text{Ecuación 3.16}$$

Para determinar el comportamiento newtoniano del flujo, se utiliza la viscosidad aparente newtoniana dada por la fórmula:

$$\mu_{app} = m \cdot \gamma_{app}^{n-1} \quad \text{Ecuación 3.17}$$

En esta ecuación existen factores de corrección dados por el tipo de flujo a extruir, denominados índices de flujo n y m, estos factores se encuentran en tablas para extrusión de alimentos. Ver ANEXO A.

El gradiente de presión de trabajo está en función del flujo másico requerido y es calculado por la siguiente ecuación:

$$\Delta P = \int_0^x \frac{(\alpha \cdot H_t \cdot \sin(\theta_t) \cdot \cos(\theta_t) - Q) \cdot \mu_{app}}{\beta \cdot H_t^3 \cdot \sin(\theta_t) \cdot \sin(\theta_t)} \cdot dx \quad \text{Ecuación 3.18}$$

Donde:

α es el coeficiente para gradiente de presión,

β es el coeficiente para gradiente de presión y

En la sección final del tornillo extrusor, se produce una contrapresión que reduce el flujo, misma que es esencial para la plastificación apropiada del producto, si esta contrapresión se vuelve lo suficientemente alta como para reducir la salida a cero; en ese punto, $Q_d = Q_p$ y la presión máxima es:

$$P_{\text{máx}} = \frac{6 \cdot \pi \cdot D_t \cdot N \cdot L_t \cdot \mu_{\text{app}} \cdot \cot(\theta_t)}{H_t^2} \quad \text{Ecuación 3.19}$$

Es decir, el gradiente de presión desde la zona de alimentación hasta el final del tornillo no debe superar el valor de $P_{\text{máx}}$, ya que si esto sucede, el producto residual (torta) ya no fluirá a través del dado.

Para una descripción más fácil de los fenómenos que ocurren en un extrusor de tornillo simple, es posible escribir la ecuación 3.10 en forma adimensional dividiéndola para el componente de flujo de arrastre:

$$\frac{2 \cdot Q}{U_z \cdot W_t \cdot H_t} = 1 - a \quad \text{Ecuación 3.20}$$

Donde a es la relación de aceleración, definida como la relación entre presión de flujo y presión de arrastre:

$$a = \frac{Q_p}{Q_d} = \frac{\text{presión de flujo}}{\text{flujo de arrastre}} \quad \text{Ecuación 3.21}$$

Z indica la longitud del canal de la extrusora considerada. Para aplicaciones prácticas, la relación de aceleración puede fácilmente determinarse a partir de la ecuación 3.21. La relación de aceleración juega un papel importante en la

descripción de la ingeniería de la extrusora. Por ejemplo, el máximo rendimiento y la máxima acumulación de presión puede ser fácilmente encontrado, haciendo que la relación de aceleración sea igual a cero o a la unidad, respectivamente.

Otro efecto relevante en el que la relación de aceleración juega un papel importante es la eficiencia de bombeo, ε , definida como la fracción de la potencia del motor E , necesarios para transportar el material y generar la presión deseada. Esto implica que $(1 - \varepsilon)$ es la fracción de la potencia del motor que no contribuye a la acción de bombeo, pero el material se calienta por la disipación de viscosidad y se utiliza para proporcionar la entalpía de cambio de fase. La eficiencia de bombeo se define como:

$$\varepsilon = \frac{E_p}{E} \quad \text{Ecuación 3.22}$$

Usando las ecuaciones 3.11 y 3.20, la potencia de bombeo puede ser escrita, como:

$$E_p = \frac{3 \cdot \mu_{app} (\pi \cdot N \cdot D_t)^2 \cdot W_t \cdot L_t}{H_t \cdot \sin(\theta_t)} \cdot [a(1 - a) \cdot \cos^2(\theta_t)] \quad \text{Ecuación 3.23}$$

Suponiendo que el material tiene una viscosidad Newtoniana, el esfuerzo cortante puede ser descrito como:

$$\tau_{zy:H} = - \frac{\mu \cdot dV_z}{dy} \Big|_{y=H} \quad \text{Ecuación 3.24}$$

$$\tau_{xy:H} = - \frac{\mu \cdot dV_x}{dy} \Big|_{y=H} \quad \text{Ecuación 3.25}$$

La combinación de estas ecuaciones con los perfiles de velocidad en la dirección z y la dirección x (ecuaciones 3.10 y 3.13) da la potencia necesaria del motor para bombear el material a través de la zona de medición de un extrusor de tornillo simple:

$$E = \frac{\mu_{app}(\pi \cdot N \cdot D_t)^2 \cdot W_t \cdot L_t}{H_t \cdot \sin(\theta_t)} \cdot [\cos^2(\theta_t) + 4 \sin^2(\theta_t) + 3a \cdot \cos^2(\theta_t)]$$

Ecuación 3.26

Los tres términos dentro de los corchetes pertenecen al flujo de arrastre en la dirección del canal, el flujo perpendicular a la dirección del canal, y la presión de flujo, respectivamente.

La eficiencia de bombeo de un extrusor de tornillo simple puede ser calculada así:

$$\varepsilon = \frac{3 \cdot a(1 - a)}{1 + 3 \cdot a + 4 \cdot \tan^2(\theta_t)}$$

Ecuación 3.27

Las potencias del motor, máxima y mínima, se determinan para condiciones particulares, $Q=0$ y $Q=Q_d$, respectivamente. De esta manera se tienen las siguientes ecuaciones:

$$E_{\min} = \frac{\mu_{app} \cdot (\pi \cdot N \cdot D_t)^2 \cdot W_t \cdot L_t}{H_t \cdot \sin(\theta_t)} \cdot [4 - 3 \cdot \cos^2(\theta_t)]$$

Ecuación 3.28

$$E_{\max} = \frac{\mu_{app} \cdot (\pi \cdot N \cdot D_t)^2 \cdot W_t \cdot L_t}{H_t \cdot \sin(\theta_t)} \cdot [4]$$

Ecuación 3.29

La potencia disipada a manera de calor, misma que se aprovechará para calentar el producto dentro del expeller a fin de reducir la viscosidad de la fracción líquida se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$E_c = E - E_p$$

Ecuación 3.30

La variación de la temperatura durante la extrusión, se debe tomar en consideración como un parámetro muy importante, ya que los estudios acerca de la *Jatropha curcas*, dicen que el proceso de extracción de aceite se debe llevar a cabo a una temperatura de alrededor de 90 C.

3.4.3 ANÁLISIS DE FLUJO NEWTONIANO A TRAVÉS DEL DADO⁵

Una vez comprimido el material y drenado el aceite del mismo, este pasa al dado, donde se lleva a cabo la configuración. La presión generada en la extrusora se utiliza para transportar el material a través del dado.

Para una abertura circular del dado con una longitud del canal establecido, el factor de forma k , puede calcularse como:

$$k_s = \frac{\pi \cdot D_d^4}{128 \cdot \mu_d \cdot L_d} \quad \text{Ecuación 3.31}$$

Donde:

D_d es el diámetro de la abertura del dado,

L_d es la longitud del dado, y

μ_d es la viscosidad de la fusión, generalmente de 3 a 6 veces superior a la viscosidad en la extrusión.

Para formas diferentes, el factor de forma del dado es menor que para las redondas, esto significa que se requiere mayor presión para lograr la misma velocidad de flujo.

La velocidad de flujo Q_x , a través del dado depende del tamaño y forma de la abertura, y de la presión estática en el dado P_e , para forzar la fusión a través de dicho dado. Esto se puede expresar como:

$$Q_x = k_s \cdot P_e \quad \text{Ecuación 3.32}$$

La relación entre Q_x y P_e , se llama característica del dado. En la figura 3.8 ésta se dibuja como una línea recta, añadida a las características previas al extrusor. Los dos trazos se intersecan, los valores correspondientes de Q_x y P_e , se conocen como punto de operación para el proceso de extrusión.

⁵ GROOVER, Fundamentos de manufactura moderna, p.314.

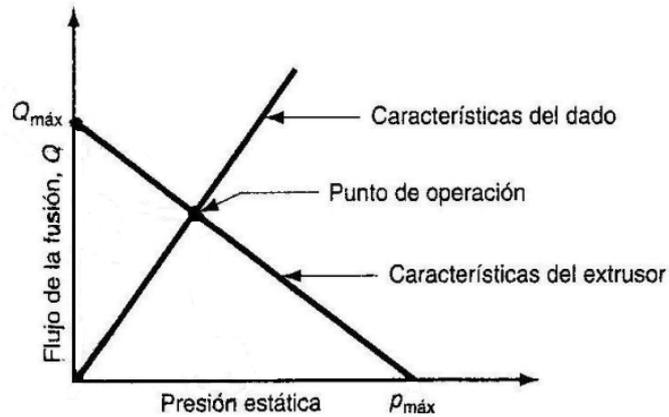


Figura 3.8 Característica del extrusor y dado, punto de operación

Las características del tornillo se pueden expresar en la ecuación de una línea recta, entre $Q_{máx}$ y $P_{máx}$ como:

$$Q_x = Q_{máx} - \frac{Q_{máx}}{P_{máx}} \cdot P_e \quad \text{Ecuación 3.33}$$

Y la presión de operación se calcula mediante:

$$P_e = \frac{Q_{máx}}{k_s + \frac{Q_{máx}}{P_{máx}}} \quad \text{Ecuación 3.34}$$

3.5 DISEÑO DE ELEMENTOS DEL EXPELLER

Una vez determinados los parámetros de operación y funcionamiento de la máquina expeller, se debe proceder con el diseño de los elementos de ésta.

3.5.1 TORNILLO

En el tornillo se debe poner énfasis en tres partes medulares: los hilos, la flecha propiamente dicha y la chaveta que se acoplará al moto reductor.

3.5.1.1 Diseño de los hilos del tornillo⁶

Se calcula considerando que el hilo, es una viga corta en voladizo proyectada desde el núcleo. En la figura 3.9, la carga sobre la viga se toma como la carga axial del tornillo w , concentrada con el radio medio, esto es en la mitad de la altura H_t de la rosca. El ancho de la viga es la longitud de la rosca (medida en el radio medio) sometida a la carga.

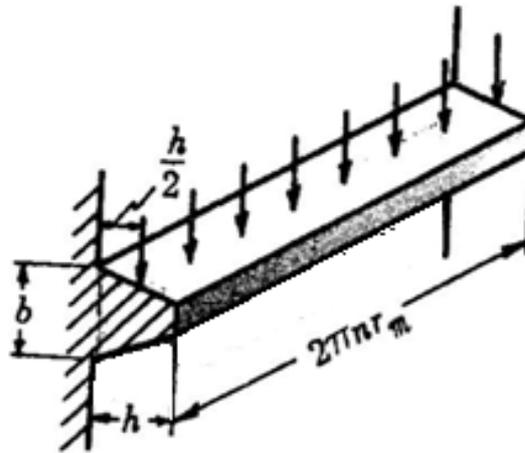


Figura 3.9 Desarrollo del hilo del tornillo, como viga en voladizo.

En el caso de un tornillo extrusor la carga W_x , aplicada sobre los hilos del mismo, se obtiene con la presión en la zona final del tornillo y el área transversal del hilo calculado con la altura promedio de la siguiente manera:

$$W_x = \frac{\pi \cdot P}{4} \cdot (D_t^2 - (D_t - 2 \cdot H_t)^2) \quad \text{Ecuación 3.35}$$

Con estas hipótesis el esfuerzo de flexión S_b en la base del hilo es:

$$S_b = \frac{3 \cdot W_x \cdot H_t}{2 \cdot \pi \cdot n_h \cdot r_m \cdot b_t^2} \quad \text{Ecuación 3.36}$$

El esfuerzo cortante transversal medio es:

$$S_s = \frac{W_x}{2 \cdot \pi \cdot n_h \cdot r_m \cdot b_t} \quad \text{Ecuación 3.37}$$

⁶ HALL, HOLOWENKO, LAUGHLIN, Diseño de máquinas, p.145.

Donde:

n_h es el número de vueltas del hilo sometido a la carga,

r_m es el radio medio, y

b_t es el ancho de la sección de la rosca en el núcleo.

Se aplicará la teoría de esfuerzo cortante máximo σ_{eq_h} , para el cálculo del factor de seguridad FS_h , debido a que el tornillo es de un material dúctil:

$$\sigma_{eq_h} = \sqrt{(S_b^2 + 4 \cdot S_s^2)} \quad \text{Ecuación 3.38}$$

$$FS_h = \frac{S_{yt}}{\sigma_{eq_h}} \quad \text{Ecuación 3.39}$$

Donde:

S_{yt} es la resistencia a la fluencia del material.

3.5.1.2 Diseño estático de la flecha

La flecha en la cual se halla el tornillo, consiste en la parte roscada y dos secciones cilíndricas continuas, que se requieren para poder montar el elemento sobre los rodamientos, por lo cual, la flecha estará sometida a las siguientes fuerzas descritas en un diagrama de cuerpo libre:

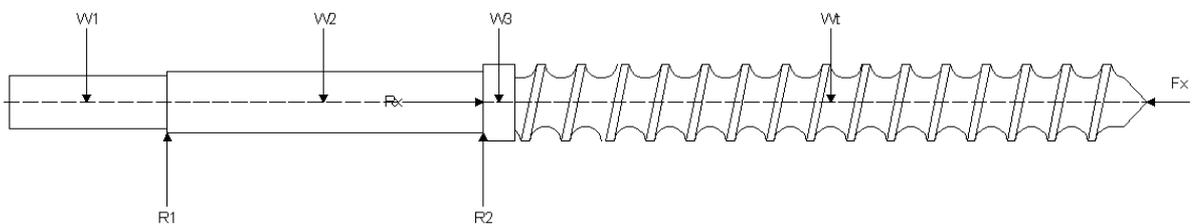


Figura 3.10 Diagrama de cuerpo libre del tornillo

Se debe calcular los pesos en las diferentes secciones del tornillo, las cuales servirán para determinar las reacciones en los apoyos (rodamientos), para posteriormente realizar los diagramas de esfuerzo cortante y momento flector.

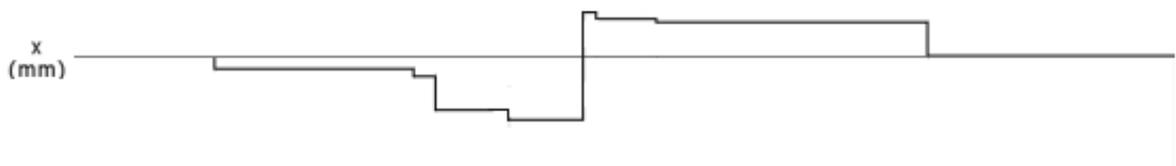


Figura 3.11 Diagrama de fuerza cortante

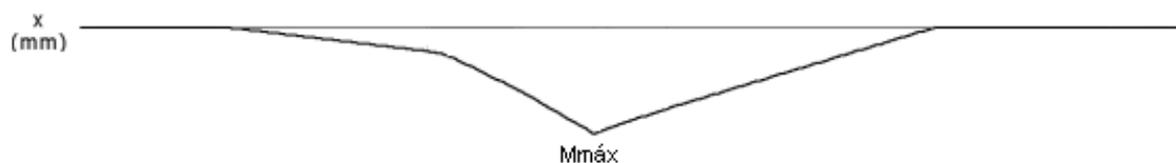


Figura 3.12 Diagrama de momento flector

En los diagramas se puede establecer el momento flector máximo $M_{máx_t}$ que sirve para calcular el esfuerzo flector máximo en la sección con diámetro crítico en la raíz del tornillo D_{cr} .

$$\sigma_{b_t} = \frac{32 \cdot M_{máx_t}}{\pi \cdot D_{cr}^3} \quad \text{Ecuación 3.40}$$

A fin de determinar el esfuerzo normal máximo $\sigma_{máx_t}$ se debe también considerar el esfuerzo de compresión σ_{c_t} debido a la presión de trabajo P :

$$\sigma_{c_t} = -P \quad \text{Ecuación 3.41}$$

$$\sigma_{máx_t} = \sigma_{b_t} + \sigma_{c_t} \quad \text{Ecuación 3.42}$$

Para el cálculo del torque se necesita el valor real de la potencia generada, E , considerándose el factor de servicio FS_E , del motor comercial:

$$T = \frac{E \cdot FS_E}{N} \quad \text{Ecuación 3.43}$$

Con el torque calculado, se encuentra el esfuerzo cortante $\tau_{\text{máx}_t}$ en la flecha debido al giro del motor:

$$\tau_{\text{máx}_t} = \frac{16 \cdot T}{\pi \cdot D_{cr}^3} \quad \text{Ecuación 3.44}$$

Con los dos esfuerzos calculados se encuentra el esfuerzo equivalente σ_{eq_t} , con la teoría la energía de distorsión máxima y de esta manera se calcula el factor de seguridad estático FS_{et}

$$\sigma_{eq_t} = \sqrt{(\sigma_{\text{máx}_t}^2 + 3 \cdot \tau_{\text{máx}_t}^2)} \quad \text{Ecuación 3.45}$$

$$FS_{et} = \frac{S_{y_t}}{\sigma_{eq_t}} \quad \text{Ecuación 3.46}$$

3.5.1.3 Diseño dinámico de la flecha

La falla por fatiga se produce debido a los esfuerzos fluctuantes que varían con el tiempo, estas alteraciones producen grietas en el material hasta llegar a una fractura súbita causada por el crecimiento inestable de estas.

El crecimiento de las grietas se debe a esfuerzos a tensión, que crecen a lo largo de planos normales al esfuerzo máximo a tensión. Es por esta razón que las fallas por fatiga se consideran causadas por esfuerzos a tensión, los esfuerzos alternantes que sean siempre a compresión no causarán crecimiento de grietas, ya que en ese caso aquellos tienen tendencia a cerrarlas.⁷

En el caso de la flecha del expeller, esta se encuentra a compresión pura, debido a que el tornillo actúa a manera de bomba dentro de las camisas, por lo cual está sometido a presión continua alrededor de toda su superficie. La presión interna en el expeller es muy superior a los esfuerzos producidos por la flexión que tiene la flecha por su propio peso.

⁷ NORTON, Diseño de máquinas, p.350.

A continuación, se muestran el estado de esfuerzos respecto al tiempo particulares al caso del expeller.

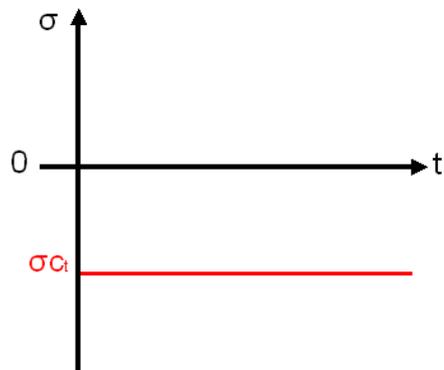


Figura 3.13 Esfuerzo de compresión respecto al tiempo

En la figura 3.13, se tiene que la acción del esfuerzo a compresión debido a la presión de trabajo del expeller es continua respecto al tiempo, debido a que la máquina funciona a un régimen constante de producción.

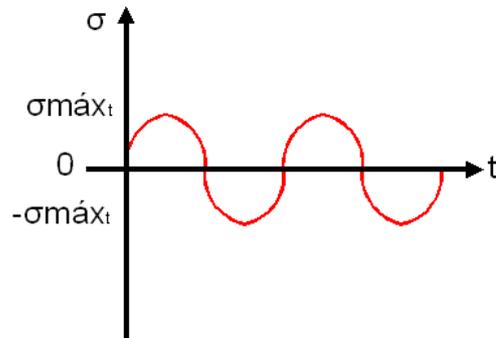


Figura 3.14 Esfuerzo de flexión respecto al tiempo

En la figura 3.14, el esfuerzo a flexión es fluctuante debido a la rotación del tornillo, sin embargo, este esfuerzo es bastante pequeño ya que el peso del tornillo es insignificante para efectos de cálculo.

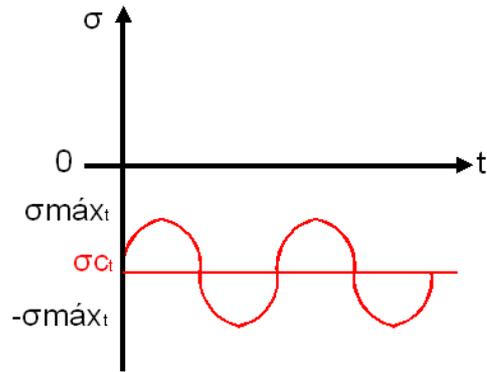


Figura 3.15 Combinación de esfuerzos normales respecto al tiempo

En la figura 3.15 se tiene la combinación de esfuerzos y se puede apreciar que, debido a la pequeña magnitud del esfuerzo de flexión, el tornillo trabaja a compresión pura.

Una vez analizados los gráficos anteriores, se puede concluir que el cálculo de fatiga no es procedente, ya que, según la teoría de falla anteriormente explicada, la compresión no causa agrietamiento al material.

3.5.1.4 Diseño de la chaveta

Para montar la flecha al reductor, es necesario el acople mediante una chaveta, debido a que el sistema motriz es de tipo pendular, el chavetero en el agujero de este ya viene dimensionado de fábrica, por lo cual las medidas de alto y ancho deberán ser las mismas, en esta caso la única variable a calcular es el largo de este elemento.

El par a transmitirse es alto debido a la potencia del motor, por lo tanto, el material de la chaveta debe ser más blando que el de la flecha de tornillo, para que en caso de sobrecarga, este elemento funcione a manera de fusible mecánico y de esta manera no se afecte al sistema.

Con el torque en la zona de la chaveta calculado mediante la ecuación 3.43, se calcula la fuerza cortante en la tangente de la flecha del tornillo:

$$F_t = \frac{T_{ch}}{r_t}$$

Ecuación 3.47

Donde:

F_t es la fuerza en la superficie del tornillo,

T_{ch} , es el torque en la zona de la chaveta,

r_t es el radio del tornillo en la zona de acople con el reductor.

Mediante la teoría de la energía de distorsión, la resistencia al cortante corresponde que:

$$Ss_{ych} = 0.577S_{ych}$$

Ecuación 3.48

En la figura 3.16, se aprecia las fuerzas que actúan sobre la chaveta debido al par a transmitir.

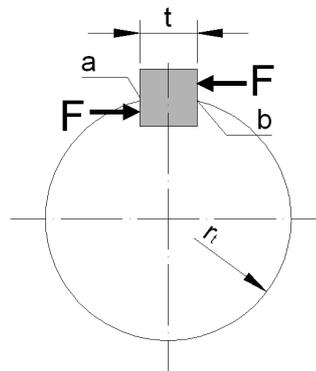


Figura 3.16 Fuerzas que actúan sobre la chaveta

La falla por cortante a lo largo del área ab, crea un esfuerzo cortante, con lo cual se puede calcular el largo de la chaveta en función de un factor de seguridad propuesto.

$$l_{chc} = \frac{F_t \cdot FS_{ch}}{t_{ch} \cdot Ss_{ych}}$$

Ecuación 3.49

Donde:

l_{chc} es la longitud de la chaveta al cortante,

FS_{chc} es el factor de seguridad de la chaveta, y,

t_{ch} es el ancho de la chaveta.

Para resistir el aplastamiento se usa el área de la mitad de la cara de la chaveta, así:

$$l_{cha} = \frac{2 \cdot F_t \cdot FS_{ch}}{t_{ch} \cdot S_{ych}} \quad \text{Ecuación 3.50}$$

Donde:

l_{cha} es la longitud de la chaveta al aplastamiento,

3.5.2 DISEÑO DE LAS CAMISAS

El método del diseño de la camisa se desarrollará asumiendo que la presión de trabajo de extrusión va a ser la presión interna de un cilindro de pared gruesa ya que la relación espesor de la pared respecto al radio es mayor a 1/20.⁸ Para ello se asumirá que la presión interna será la presión máxima de trabajo en cada uno de los elementos, debido a que los cilindros son intercambiables por objeto de prueba.

En los recipientes cilíndricos de conducción de fluidos a altas presiones, se desarrollan esfuerzos radiales y tangenciales, con magnitudes que dependen del radio del elemento. Al determinar el esfuerzo radial σ_r y el esfuerzo tangencial σ_t , se supone que la elongación longitudinal es constante alrededor de la circunferencia del cilindro.

⁸ SHIGLEY, MISCHKE, Diseño en ingeniería mecánica, p. 134.

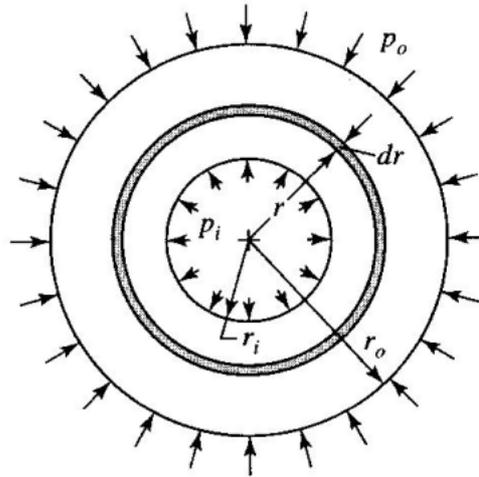


Figura 3.17 Cilindro sometido a presión interna y externa

Con referencia a la figura 3.17, el radio interior del cilindro se designa por r_i , el radio exterior por r_o , la presión interna por p_i y la presión externa por p_o . Entonces se prueban que los esfuerzos tangencial y radial existen, y que sus magnitudes son:

$$\sigma_t = \frac{p_i \cdot r_i^2 - p_o \cdot r_o^2 - r_i^2 \cdot r_o^2 \cdot (p_o - p_i)/r^2}{r_o^2 - r_i^2} \quad \text{Ecuación 3.51}$$

$$\sigma_r = \frac{p_i \cdot r_i^2 - p_o \cdot r_o^2 + r_i^2 \cdot r_o^2 \cdot (p_o - p_i)/r^2}{r_o^2 - r_i^2} \quad \text{Ecuación 3.52}$$

Como es usual, los valores positivos indican tensión y los negativos compresión.

En el presente caso la presión externa es igual a la presión atmosférica, por lo cual se da el caso especial de que $p_o=0$, dando como resultado:

$$\sigma_t = \frac{p_i \cdot r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \cdot \left(1 + \frac{r_o^2}{r^2}\right) \quad \text{Ecuación 3.53}$$

$$\sigma_r = \frac{p_i \cdot r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \cdot \left(1 - \frac{r_o^2}{r^2}\right) \quad \text{Ecuación 3.54}$$

Se debe considerar que existen esfuerzos longitudinales σ_l cuando el propio recipiente a presión toma las reacciones en los extremos debidas a la presión interna. Este esfuerzo resulta ser:

$$\sigma_l = \frac{p_i \cdot r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \quad \text{Ecuación 3.55}$$

Debido a que el flujo en el interior del barril es constante, el análisis a fatiga no es requerido, por lo tanto, solo se calculará el factor de seguridad, en base a la teoría de distorsión máxima, así:

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_t^2 + \sigma_l^2 + \sigma_r^2 - \sigma_t \cdot \sigma_r - \sigma_l \cdot \sigma_r - \sigma_l \cdot \sigma_t} \quad \text{Ecuación 3.56}$$

Para calcular el factor de seguridad se utiliza la siguiente ecuación:

$$FS_c = \frac{S_{y_c}}{\sigma'} \quad \text{Ecuación 3.57}$$

3.5.3 DISEÑO DEL DADO

El dado al ser un cilindro que tiene presión interna semejante a la de las camisas tiene un diseño similar a estas. Igualmente se considera un cilindro de pared gruesa debido a que la relación entre su radio interno y el espesor de la pared es mayor a 1/20.

Por lo tanto, para el diseño de la resistencia del dado se utilizará las mismas ecuaciones (de la 3.51 a la 3.57), correspondientes al análisis de las camisas.

3.5.4 DISEÑO DE JUNTAS ROSCADAS DE LAS CAMISAS Y EL DADO

La máquina expeller diseñada tiene una configuración de juntas roscadas con el fin de intercambiar sus camisas para objetos de prueba de operación y además poder realizar el mantenimiento del tornillo.

Debido a la presión existente en el interior del extrusor, las juntas roscadas están sometidas a dos tipos de esfuerzo: esfuerzo de corte y esfuerzo de aplastamiento.

3.5.4.1 Esfuerzo cortante en los sujetadores roscados

Un modo de falla posible por cortante implica que las roscas, ya sea del macho o de la hembra, se barran. Debido a que el macho y la hembra son del mismo material, el conjunto se llega a barrer a lo largo del diámetro de paso, debiendo suponer algún grado de compartición de carga entre roscas, a fin de calcular un esfuerzo.

Un procedimiento para materiales dúctiles es considerar que al existir falla completa, se requiere que se barran todas las roscas, es decir, suelen considerarse compartiendo la carga por igual; esto permite que fluyan cada una de las roscas conforme el conjunto empiece a fallar. El área cortante de barrido A_s para una rosca de tornillo, es el área del cilindro de su diámetro menor D_r :

$$A_s = \pi \cdot D_r \cdot w_i \cdot p_r \quad \text{Ecuación 3.58}$$

Donde:

p_r es el paso del sujetador roscado,

w_i es el factor que define el porcentaje del paso ocupado por metal en el diámetro menor, dado por tabla 3.3

El área de un paso de rosca de la ecuación 3.58 se puede multiplicar por todas (optimista), por una (conservador), o por alguna fracción del número total de roscas acopladas (medio), con base al juicio por parte del diseñador.

En el caso de la rosca hembra, que se barre en su diámetro mayor D , el área del cortante A_s de una rosca de tornillo es:

$$A_s = \pi \cdot D \cdot w_o \cdot p_r \quad \text{Ecuación 3.59}$$

Donde:

w_o es el factor que define el porcentaje del paso ocupado por metal en el diámetro mayor, dado en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Factores de área de cortante de barridos de rosca

TIPO DE ROSCA	w _i (menor)	w _o (mayor)
UNS/ISO	0.80	0.88
Square	0.50	0.50
AGME	0.77	0.63
Buttress	0.90	0.83

Fuente: (NORTON, Diseño de máquinas, p. 907)

La fuerza de corte de la rosca F_r , estará dada por la presión de trabajo del expeller aplicada en la zona del dado, es decir:

$$F_r = \frac{\pi}{4} \cdot (D_t^2 - D_d^2) \cdot P \quad \text{Ecuación 3.60}$$

El esfuerzo cortante para el barrido de roscas τ_s se determina a partir de:

$$\tau_s = \frac{F_r}{A_s} \quad \text{Ecuación 3.61}$$

Con el esfuerzo cortante se calcula el factor de seguridad a cortante para los sujetadores roscados, cabe recalcar que para la resistencia de las juntas se debe considerar el material en el cual estas han sido maquinadas.

$$FS_{src} = \frac{Ssy_{sr}}{\tau_s} \quad \text{Ecuación 3.62}$$

3.5.4.2 Esfuerzo de aplastamiento en los sujetadores roscados

La presión interna dentro del expeller, produce en la sección de sujeción un efecto entre las roscas macho y hembra, dado que las roscas se deforman y se aplastan entre sí.

El área de aplastamiento se encuentra mediante:

$$A_a = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - D_r^2) \cdot \frac{H}{p_r} \quad \text{Ecuación 3.63}$$

Donde:

H es la longitud de sujeción entre macho y hembra.

El esfuerzo de aplastamiento σ_a , se calcula usando la fuerza calculada en la ecuación 3.60, aplicada al área de aplastamiento.

$$\sigma_{a_{sr}} = \frac{F_r}{A_a} \quad \text{Ecuación 3.64}$$

Con el esfuerzo de aplastamiento se calcula el factor de seguridad a aplastamiento para los sujetadores roscados.

$$FS_{sra} = \frac{S_{y_{sr}}}{\sigma_{a_{sr}}} \quad \text{Ecuación 3.65}$$

La memoria de cálculo propiamente dicha se presenta en el ANEXO B.

3.5.5 SELECCIÓN DE RODAMIENTOS

Para la selección de rodamientos se utilizará el software online que ofrece el proveedor SKF, el cual calcula la vida útil de los rodamientos en función de los parámetros típicos tales como: estado de carga, velocidad de rotación, temperatura de trabajo, tipo de lubricación, entre otros.

Las hojas de cálculo se muestran en el ANEXO C.

3.5.6 DISEÑO DEL BASTIDOR

Para el diseño del bastidor, se usará un software de análisis estructural, SAP 2000, el cual se encargará de simular en base a un diseño preliminar, el estado de carga del bastidor de la máquina, esto a fin de elegir los elementos estructurales respectivos, la estructura que soporta a la máquina no es un parámetro determinante en el funcionamiento de la misma.

El análisis estructural del bastidor se muestra en el ANEXO D.

3.5.7 DISEÑO DE LA TOLVA

La tolva es el componente del extrusor de diseño más simple, es el lugar donde se almacena el material a procesar. El material debe ser el suficiente para que se tenga una alimentación constante al sistema y este se mantenga trabajando de manera ininterrumpida.

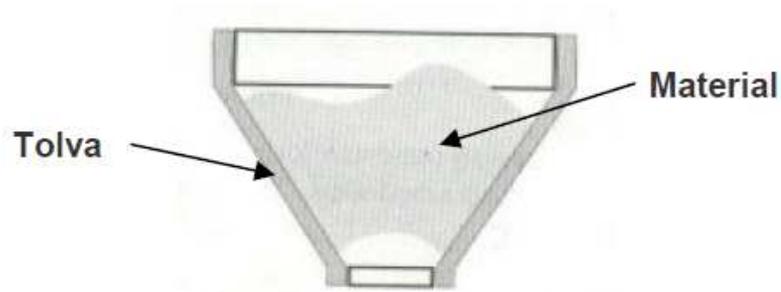


Figura 3.18 Esquema de la tolva de alimentación

Para un buen funcionamiento de la tolva se toma como regla general que la garganta de alimentación debe tener un diámetro igual al diámetro nominal del husillo. La altura total de la tolva dependerá del material que se quiera almacenar y a que intervalo se quiere estar llenando nuevamente.

3.6 RESULTADOS DEL DISEÑO DE ELEMENTOS

Una vez analizados todos los principios y teorías para el funcionamiento y diseño de la máquina expeller, se procede en este numeral a presentar los cálculos numéricos con el fin de elaborar los respectivos planos constructivos.

3.6.1 PARÁMETROS GEOMÉTRICOS

Cuadro 3.1. Parámetros geométricos del tornillo

Símbolo	Variable	Valor	Unidad	Ecuación
D_t	Diámetro del tornillo	66.00	mm	
H_{ct}	Holgura camisa – tornillo	0.50	mm	
H_t	Altura del hilo del tornillo	7.00	mm	
b_t	Ancho del hilo del tornillo	9.00	mm	
p_t	Paso del tornillo	22.00	mm	
L_t	Longitud del tornillo	365.00	mm	
L_t/D_t	Relación L/D (Corte bajo)	5.53	ninguna	
w_t	Ancho del canal del tornillo	15.50	mm	3.1
r_m	Radio medio del tornillo	29.50	mm	3.2
θ_t	Ángulo de hélice del tornillo	6.77	grados	3.3
		0.12	rad	

3.6.2 CÁLCULO DE LA VELOCIDAD

Cuadro 3.2. Parámetros y cálculo de velocidad del tornillo

Símbolo	Variable	Valor	Unidad	Ecuación
R	Flujo másico requerido en libras	440.00	lb/h	
D _{tp}	Diámetro del tornillo en pulgadas	2.60	plg	
H _{tp}	Altura del hilo en pulgadas	0.28	plg	
g _{jp}	Gravedad específica de la jatropha curcas	0.85	ninguna	
N	Velocidad de rotación del tornillo	125.00	rpm	3.15

3.6.3 CÁLCULO DE FLUJO

Cuadro 3.3. Parámetros y cálculo de flujo dentro del expeller

Símbolo	Variable	Valor	Unidad	Ecuación
Q	Caudal volumétrico calculado	205.64	kg/h	3.14
Y _{app}	Razón de corte	387.73	1/s	3.16
m	Índice de flujo (Soya desgrasada)	299	ninguna	
n	Índice de flujo (Soya desgrasada)	0.65	ninguna	
μ _{app}	Viscosidad aparente newtoniana	37.13	Pa.s	3.17
α	Coeficiente para gradiente de presión	2.81 E+5	mm ² /s	
β	Coeficiente para gradiente de presión	17.28	mm	
ΔP	Gradiente de presión en la extrusión	25.00	MPa	3.18
P _{máx}	Presión máxima de extrusión	35.30	MPa	3.19

3.6.4 DETERMINACIÓN DE POTENCIA

Cuadro 3.4. Parámetros y cálculo de potencia del expeller

Símbolo	Variable	Valor	Unidad	Ecuación
a	Relación de aceleración	0.46	ninguna	3.21
E_p	Potencia del motor necesaria para el bombeo	1.28	Kw	3.23
E	Potencia del motor	4.19	Kw	3.26
ε	Eficiencia de bombeo	30.61	ninguna	3.27
E_{\min}	Potencia mínima del motor	1.82	Kw	3.28
E_{\max}	Potencia máxima del motor	6.99	Kw	3.29
E_c	Potencia del motor disipada en calor	2.91	Kw	3.30

3.6.5 CÁLCULO DE FLUJO A TRAVÉS DEL DADO

Cuadro 3.5. Parámetros y cálculo de flujo en el dado

Símbolo	Variable	Valor	Unidad	Ecuación
D_d	Diámetro del dado	20.00	mm	
L_d	Longitud del dado	8.00	mm	
μ_d	Viscosidad de la fusión	222.76	Pa.s	
k_s	Factor de forma del dado	8.61 E-12	ninguna	3.31
Q_x	Velocidad de flujo	168.43	kg/h	3.32
P_e	Presión estática en el dado	6.39	MPa	3.34

3.6.6 SELECCIÓN DE MATERIALES

Cuadro 3.6. Parámetros y estado de carga del tornillo

TORNILLO		Material: Acero V945		
S_{yt}	Resistencia a la fluencia	340 MPa		
Símbolo	Variable	Valor	Unidad	Ecuación
DISEÑO DE LOS HILOS DEL TORNILLO				
W_x	Fuerza axial sobre el hilo	29.8	kN	3.35
n_h	No. hilos del tornillo sometidos a carga	1	ninguna	
S_b	Esfuerzo de flexión en la base del hilo	41.74	MPa	3.36
S_s	Esfuerzo cortante transversal medio en el hilo	17.89	MPa	3.37
σ_{eq_h}	Esfuerzo equivalente en el hilo	51.98	MPa	3.38
FS_h	Factor de seguridad en el hilo	6.54	ninguna	3.39
DISEÑO ESTÁTICO DE LA FLECHA				
$M_{máx_t}$	Momento flector máximo	19.70	N.m	
σ_{bt}	Esfuerzo flector máximo	0.59	MPa	3.40
σ_{ct}	Esfuerzo de compresión	23.00	MPa	3.41
$\sigma_{máx_t}$	Esfuerzo normal máximo	23.60	MPa	3.42
FS_E	Factor de servicio del motor	0.89	ninguna	
T	Torque en la flecha	760.82	N.m	3.43

Cuadro 3.6. Parámetros y estado de carga del tornillo (Continuación)

TORNILLO		Material: Acero V945		
Sy_t	Resistencia a la fluencia	340 MPa		
Símbolo	Variable	Valor	Unidad	Ecuación
D _{cr}	Diámetro crítico en la flecha	70	mm	
τ _{máx_t}	Esfuerzo cortante máximo	11.30	MPa	3.44
σ _{eq_t}	Esfuerzo equivalente	30.60	MPa	3.45
FS _{Et}	Factor de seguridad estático	11.09	ninguna	3.46
CHAVETA		Material: AISI 1010		
Sy_{ch}	Resistencia a la fluencia	180 MPa		
t _{ch}	Ancho de la chaveta	14.00	mm	
FS _{ch}	Factor de seguridad de la chaveta	4	Ninguno	
T _{ch}	Torque en la zona de la chaveta	608.98	N.m	3.43
F _t	Fuerza en la superficie del tornillo	2.44 E+4	N	3.47
Ssy _{ch}	Resistencia al cortante	103.86	MPa	3.48
L _{chc}	Longitud de la chaveta al cortante	67.01	mm	3.49
L _{cha}	Longitud de la chaveta al aplastamiento	77.33	mm	3.50

Cuadro 3.7. Parámetros y estado de carga de las camisas

CAMISAS		Material: Acero SKF 280		
Sy _c	Resistencia a la fluencia	440 MPa		
Símbolo	Variable	Valor	Unidad	Ecuación
DISEÑO DE LAS CAMISAS				
e _c	Espesor de la camisa	18.50	mm	
r _{ic}	Radio interno de la camisa	33.50	mm	
r _{ic} e _c	Relación r/e (pared gruesa)	1.81	ninguna	
Pi	Presión interna en la camisa	23.00	MPa	
σ _t	Esfuerzo tangencial	55.64	MPa	3.53
σ _r	Esfuerzo radial	23.00	MPa	3.54
σ _l	Esfuerzo longitudinal	16.32	MPa	3.55
σ'	Esfuerzo equivalente	68.10	MPa	3.56
FS _c	Factor de seguridad	6.46	ninguna	3.57
DISEÑO DE SUJETADORES ROSCADOS DE LAS CAMISAS				
Diseño al cortante				
D _r	Diámetro de raíz sujetador roscado	84.32	mm	
Ssy _c	Resistencia al cortante de las camisas	253.88	MPa	
p _r	Paso del sujetador roscado	3.00	mm	
F _r	Fuerza de corte de la rosca	78.20	kN	3.60
w _i	Factor de área ISO	0.80	ninguna	
A _{sm}	Área de barrido rosca macho	1,910	mm ²	3.58
T _{sm}	Esfuerzo cortante para el barrido(macho)	41.02	MPa	3.61

Cuadro 3.7. Parámetros y estado de carga de las camisas (Continuación)

CAMISAS		Material: Acero SKF 280		
Resistencia a la fluencia		440 MPa		
Símbolo	Variable	Valor	Unidad	Ecuación
DISEÑO DE SUJETADORES ROSCADOS DE LAS CAMISAS				
Diseño al cortante				
FS_{srcm}	Factor de seguridad al cortante rosca macho	6.19		3.62
D	Diámetro mayor del sujetador roscado	88	mm	
w_o	Factor de área ISO	0.88	ninguna	
A_{sh}	Área del cortante A_s de la rosca hembra	2,190	mm ²	3.59
T_{sh}	Esfuerzo cortante para el barrido(hembra)	35.7	MPa	3.61
FS_{srch}	Factor de seguridad al cortante rosca hembra	7.11		3.62
Diseño al aplastamiento				
H	Longitud de sujeción entre macho y hembra	16.00	mm	
A_a	Área de aplastamiento en los sujetadores roscados	2,660	mm ²	3.63
σ_r	Esfuerzo de aplastamiento en la rosca	29.45	MPa	3.64
FS_{srac}	Factor de seguridad al aplastamiento	14.94		3.65

Cuadro 3.8. Parámetros y estado de carga del dado

DADO		Material: Acero AISI 1045		
Resistencia a la fluencia		313 MPa		
Símbolo	Variable	Valor	Unidad	Ecuación
DISEÑO DEL DADO				
e_d	Espesor del dado	6.00	mm	
r_{intd}	Radio interno del dado	10.00	mm	
P_{int}	Presión interna en el dado	23.00	MPa	
σ_{td}	Esfuerzo tangencial	52.49	MPa	3.53
σ_{rd}	Esfuerzo radial	23.00	MPa	3.54
σ_{lr}	Esfuerzo longitudinal	14.74	MPa	3.55
σ'	Esfuerzo equivalente en sección crítica	68.10	MPa	3.56
FS_d	Factor de seguridad en sección crítica	4.60		3.57
DISEÑO DE SUJETADORES ROSCADOS ENTRE DADO Y PORTADADO				
Diseño al cortante				
D_{rd}	Diámetro de raíz del sujetador roscado	32.32	mm	
Ssy_d	Resistencia al cortante	180.60	MPa	
p_{rd}	Paso de la rosca	3.00	mm	
F_{rd}	Fuerza cortante	12.9	kN	3.60
w_{id}	Factor de área ISO	0.80	ninguna	
A_{sdm}	Área de barrido rosca macho	731.06	mm ²	3.58
T_{sdm}	Esfuerzo cortante para el barrido(macho)	17.67	MPa	3.61

Cuadro 3.8. Parámetros y estado de carga del dado (Continuación)

DADO		Material: Acero AISI 1045		
Resistencia a la fluencia		313 MPa		
Símbolo	Variable	Valor	Unidad	Ecuación
DISEÑO DE SUJETADORES ROSCADOS ENTRE DADO Y PORTADADO				
Diseño al cortante				
FS_{srdm}	Factor de seguridad al cortante rosca macho	10.22		3.62
D_{md}	Diámetro mayor del sujetador roscado	36.00	mm	
w_{od}	Factor de área ISO	0.88		
A_{sdh}	Área del cortante A_s de la rosca hembra	895.73	mm ²	3.59
T_{sdh}	Esfuerzo cortante para el barrido(hembra)	14.42	MPa	3.61
FS_{srdh}	Factor de seguridad al cortante roca hembra	12.52		3.62
Diseño al aplastamiento				
H_d	Longitud de sujeción entre macho y hembra	27.00	mm	
A_{ad}	Área de aplastamiento en los sujetadores roscados	1.78E+3	mm ²	3.63
σ_{rd}	Esfuerzo de aplastamiento en la rosca	7.27	MPa	3.64
FS_{srac}	Factor de seguridad al aplastamiento	43.07		3.65

3.7 PLANOS CONSTRUCTIVOS

Los planos de la máquina expeller contienen la información que se indica a continuación:

Lámina	Descripción	No.
EX-01	Plano conjunto máquina expeller	1/15
EX-02	Despiece máquina expeller	2/15
EX-03	Tornillo extrusor	3/15
EX-04	Alojamiento de rodamientos	4/15
EX-05	Tapa de ajuste de rodamientos	5/15
EX-06	Camisa zona de alimentación	6/15
EX-07	Camisa de extrusión sin agujeros	7/15
EX-08	Camisa de extrusión con agujeros	8/15
EX-09	Portadado	9/15
EX-10	Dado	10/15
EX-11	Anillo chaveta	11/15
EX-12	Arandela retenedor	12/15
EX-13	Retenedor	13/15
EX-14	Tolva de alimentación	14/15
EX-15	Bastidor	15/15

Los planos se detallan en el ANEXO E.

CAPITULO 4

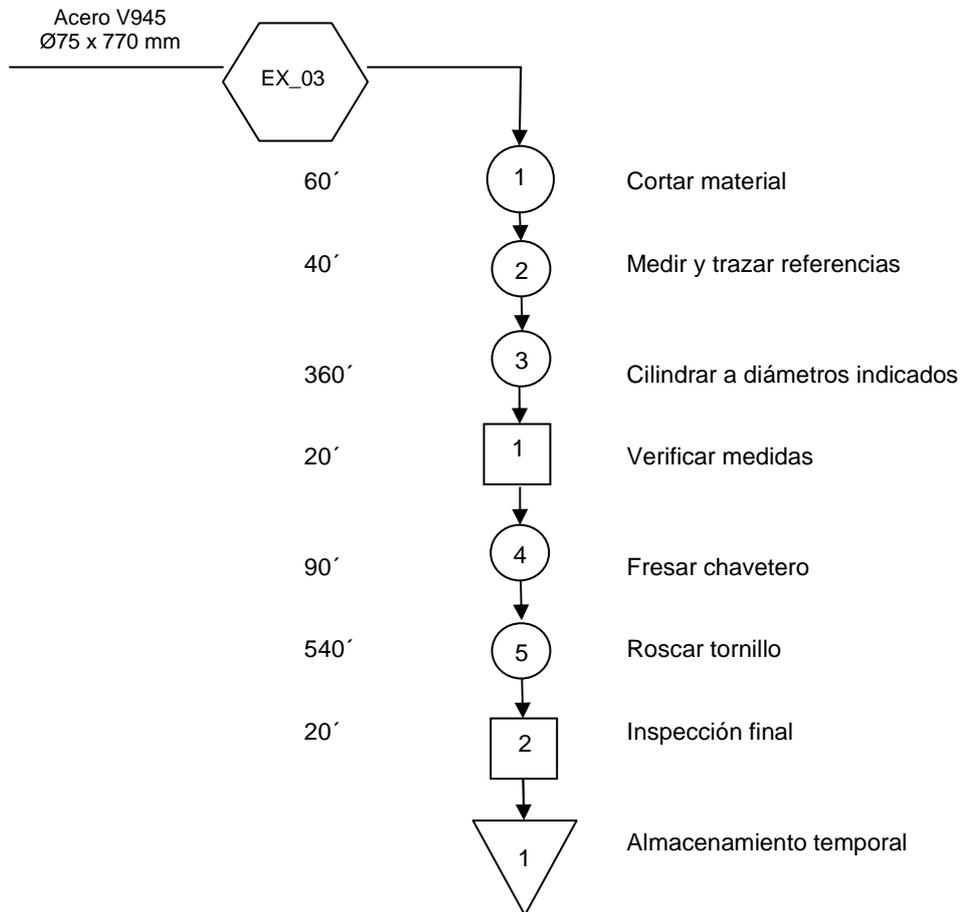
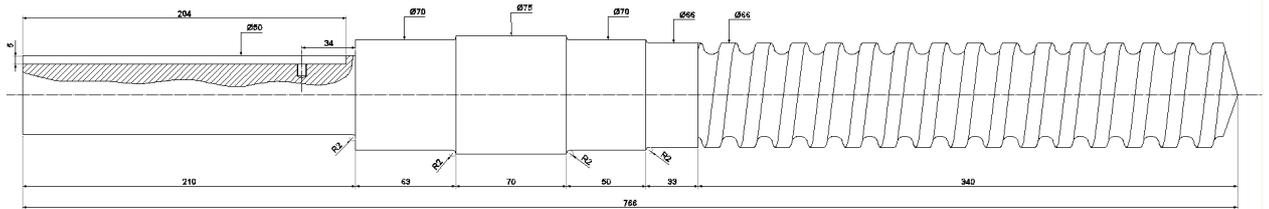
4. CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE

4.1 DIAGRAMAS DE PROCESOS DE FABRICACIÓN

a) Tornillo extrusor

Cantidad: 1

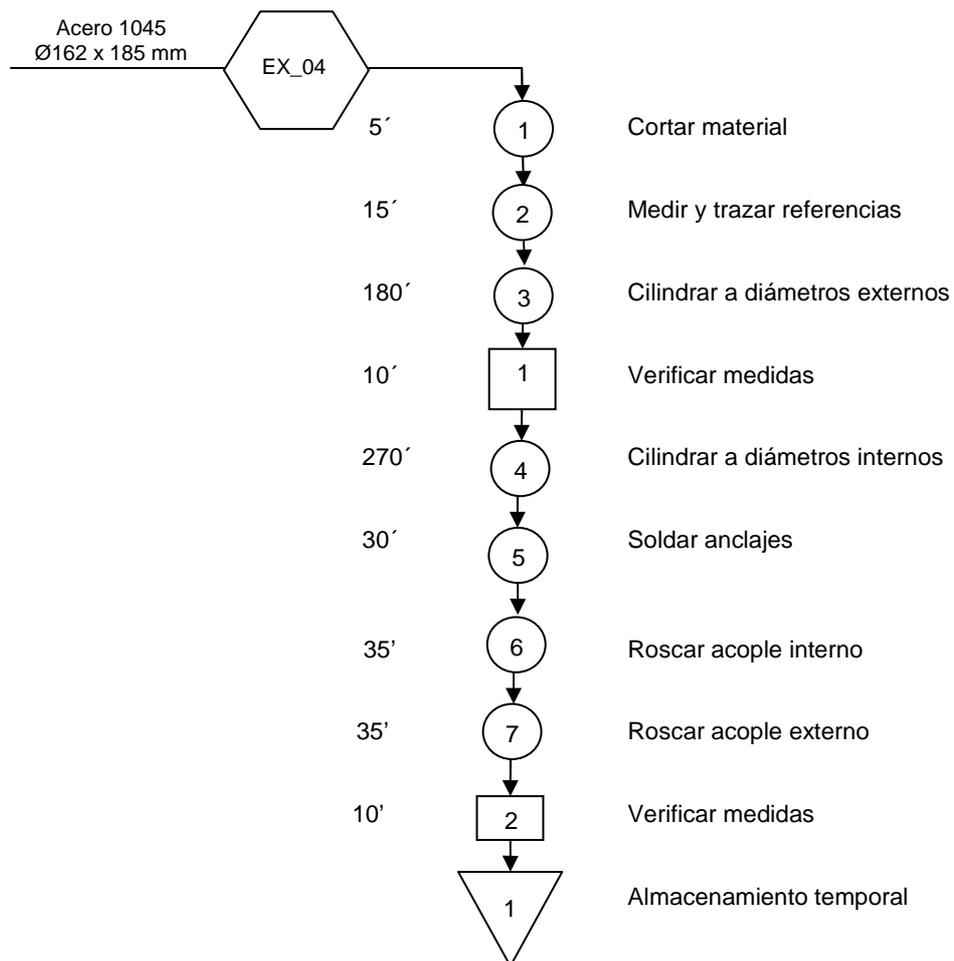
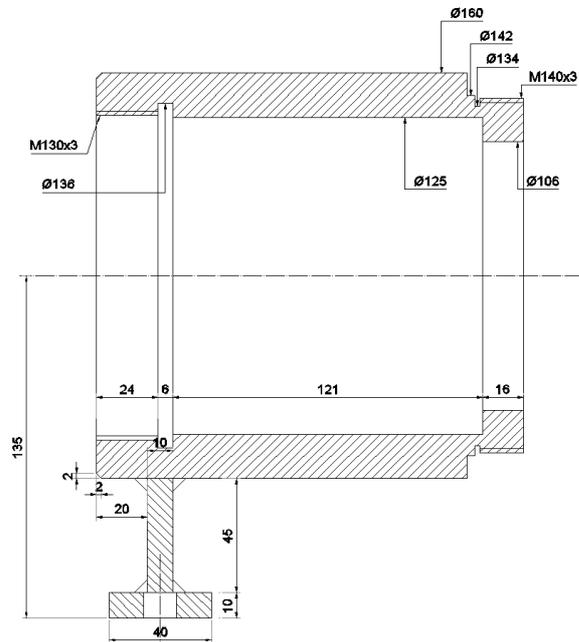
Plano: 3/15



b) Alojamiento de rodamientos

Cantidad: 1

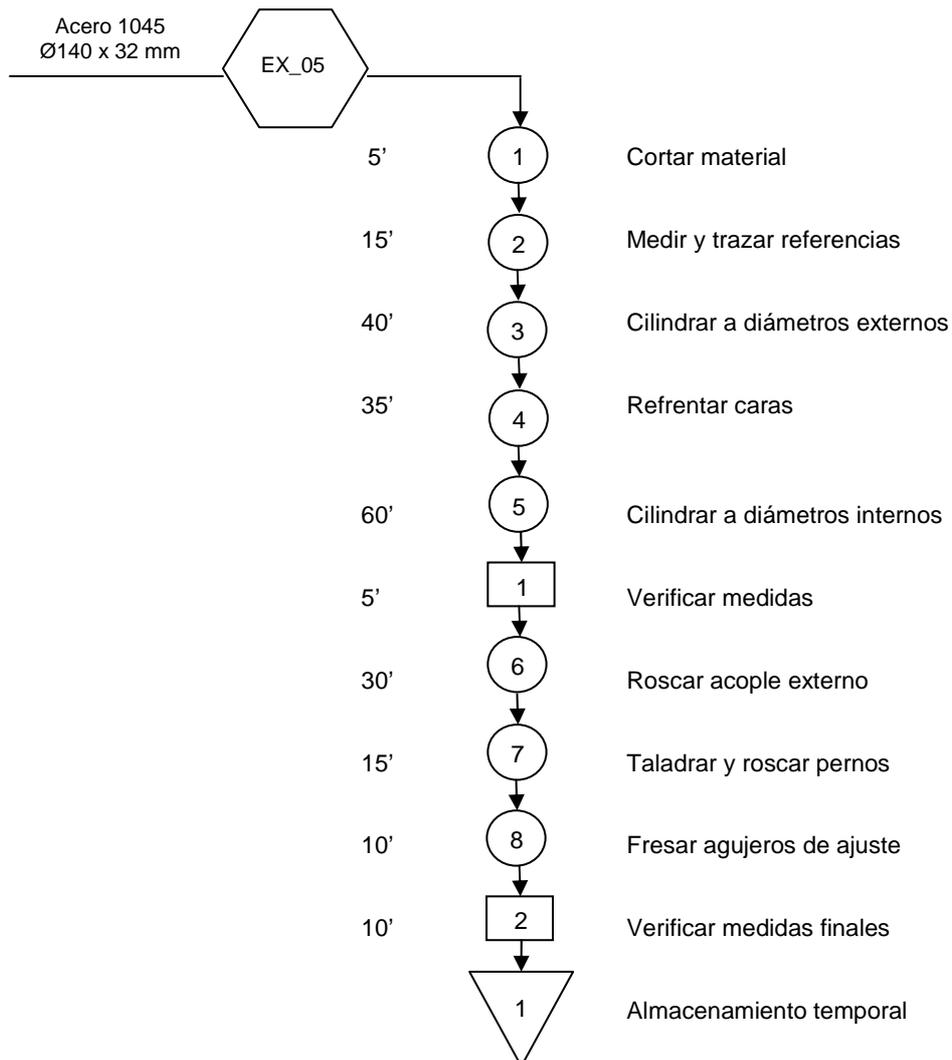
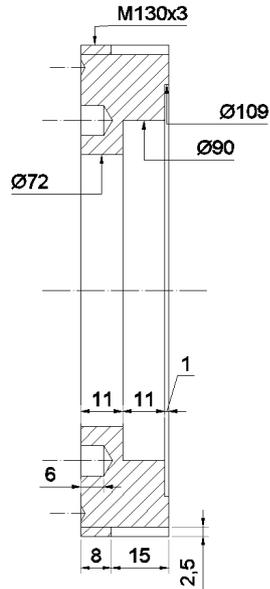
Plano: 4/15



c) Tapa de ajuste de rodamientos

Cantidad: 1

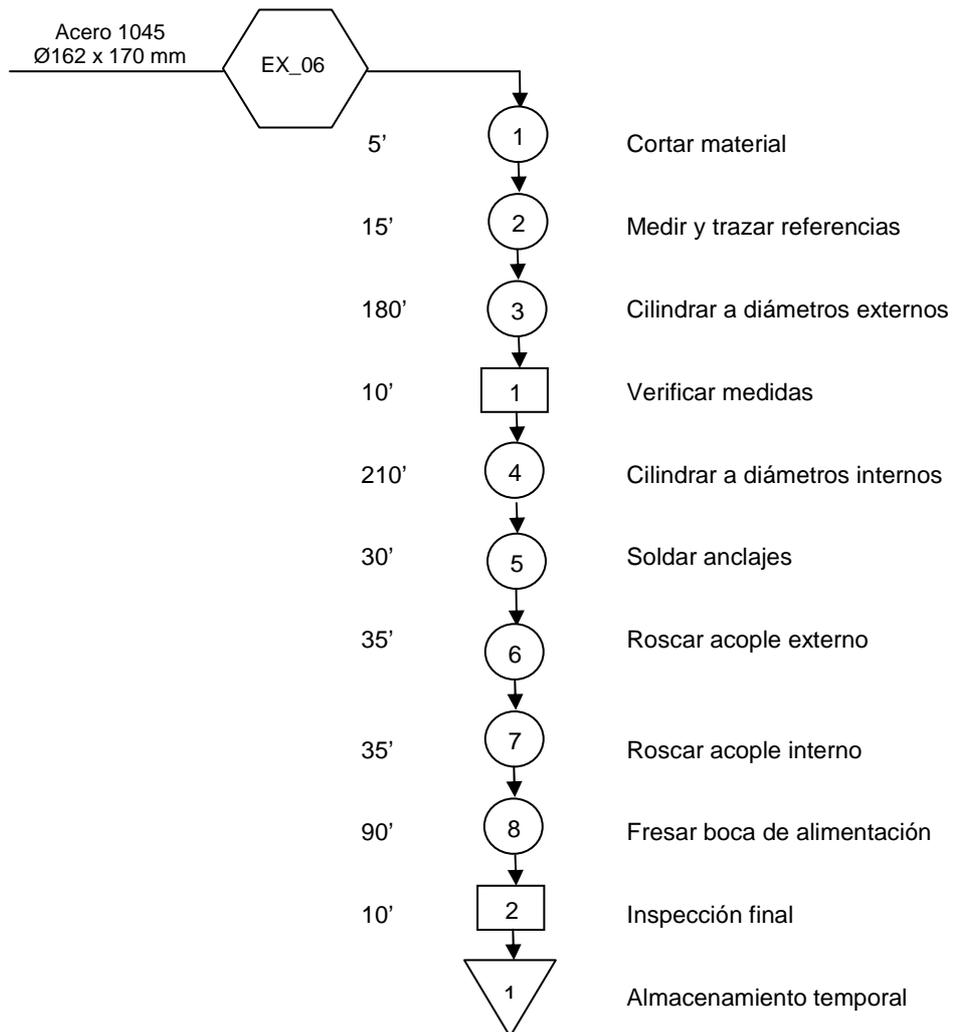
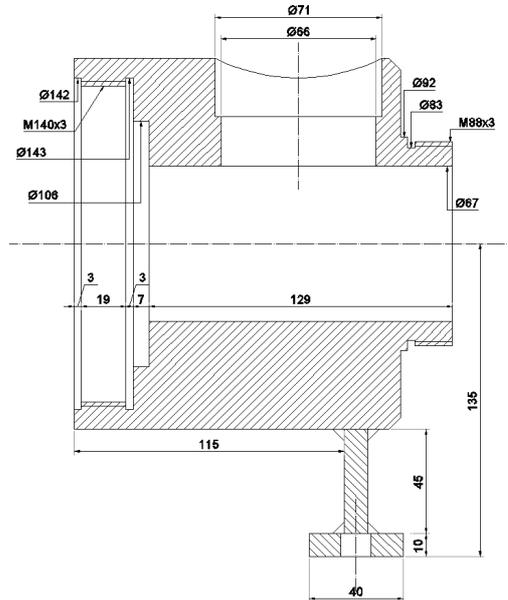
Plano: 5/15



d) Camisa zona de alimentación

Cantidad: 1

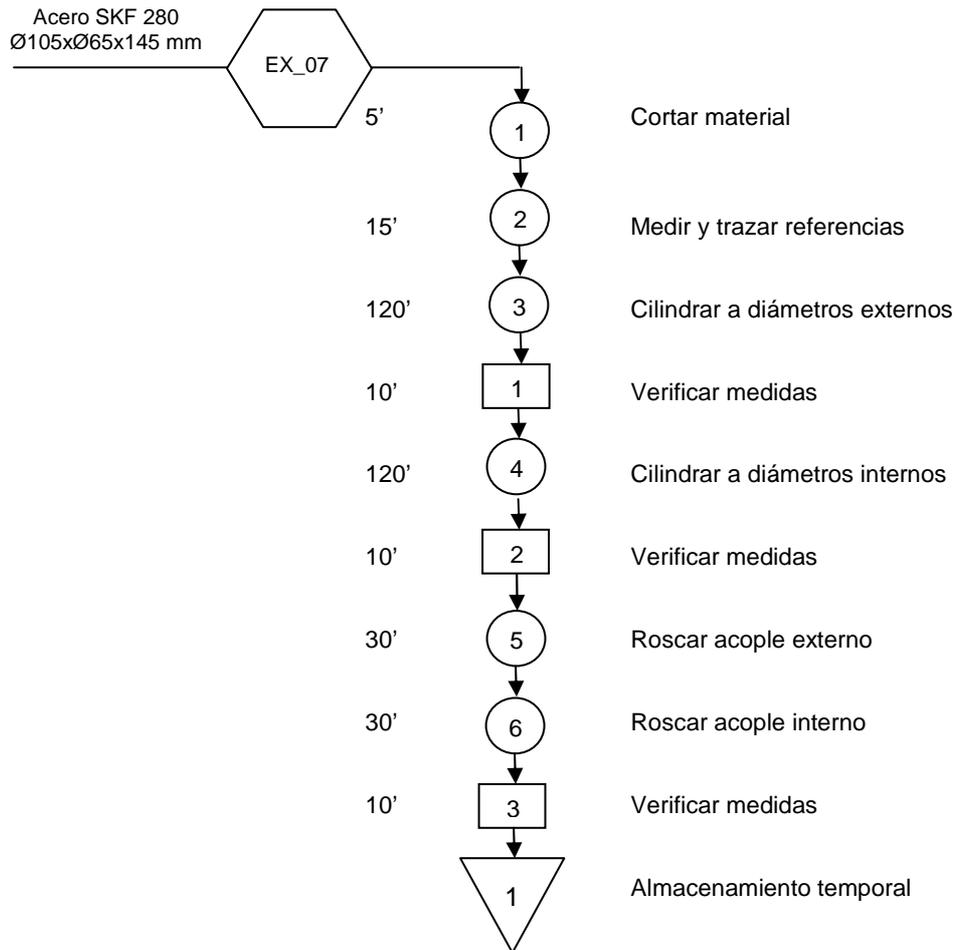
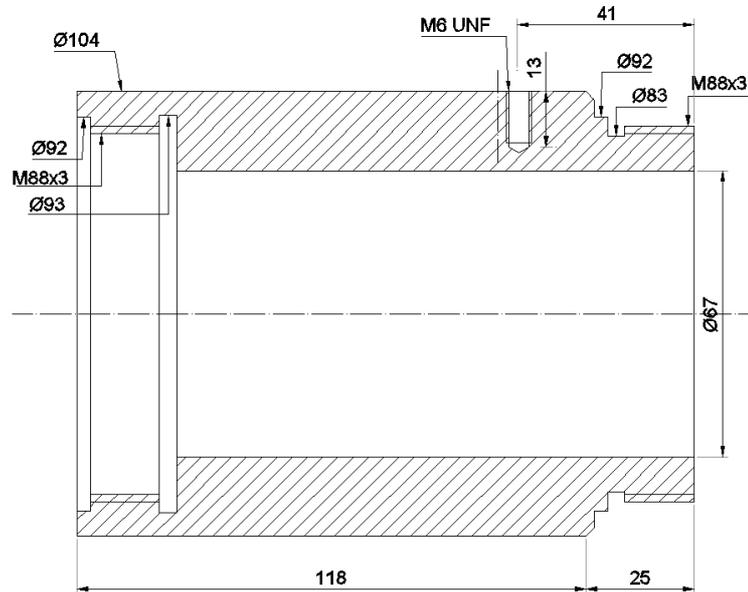
Plano: 6/15



e) Camisa de extrusión sin agujeros

Cantidad: 1

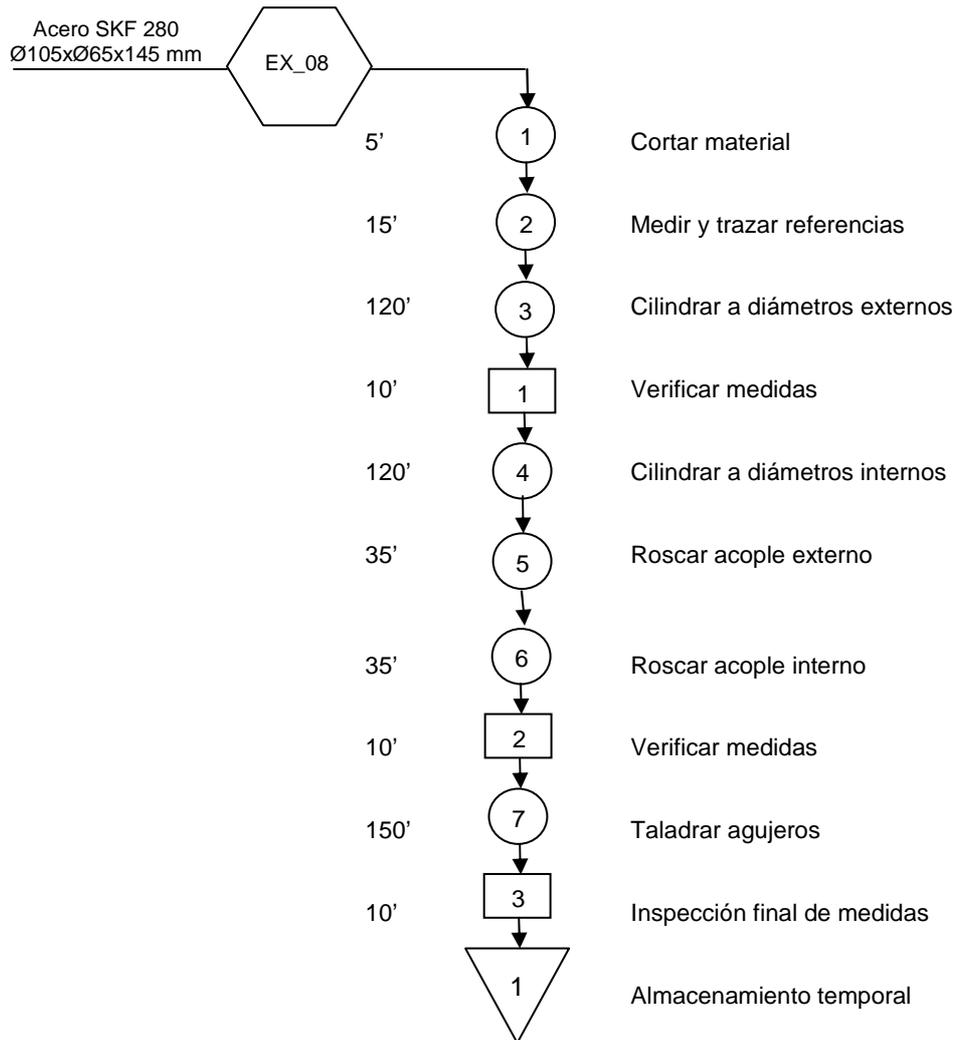
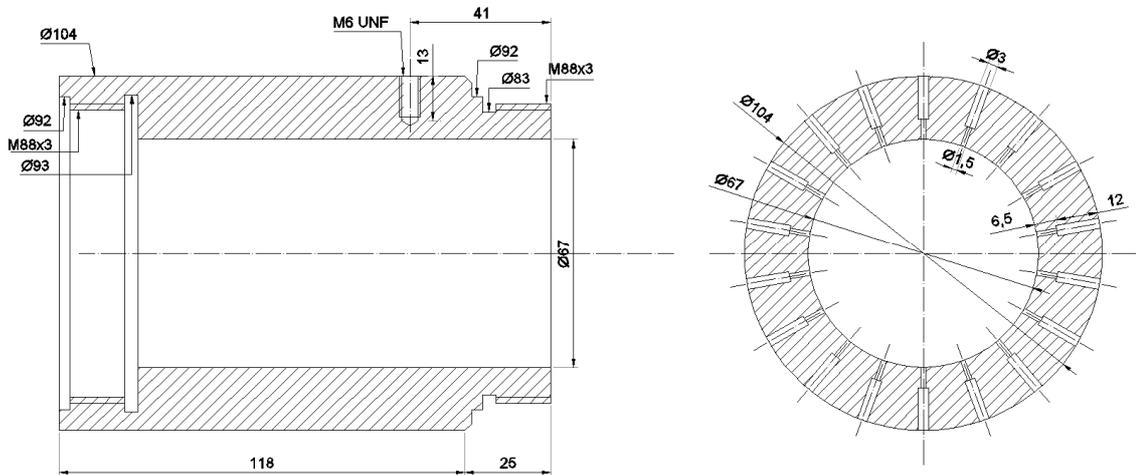
Plano: 7/15



f) Camisa de extrusión con agujeros

Cantidad: 1

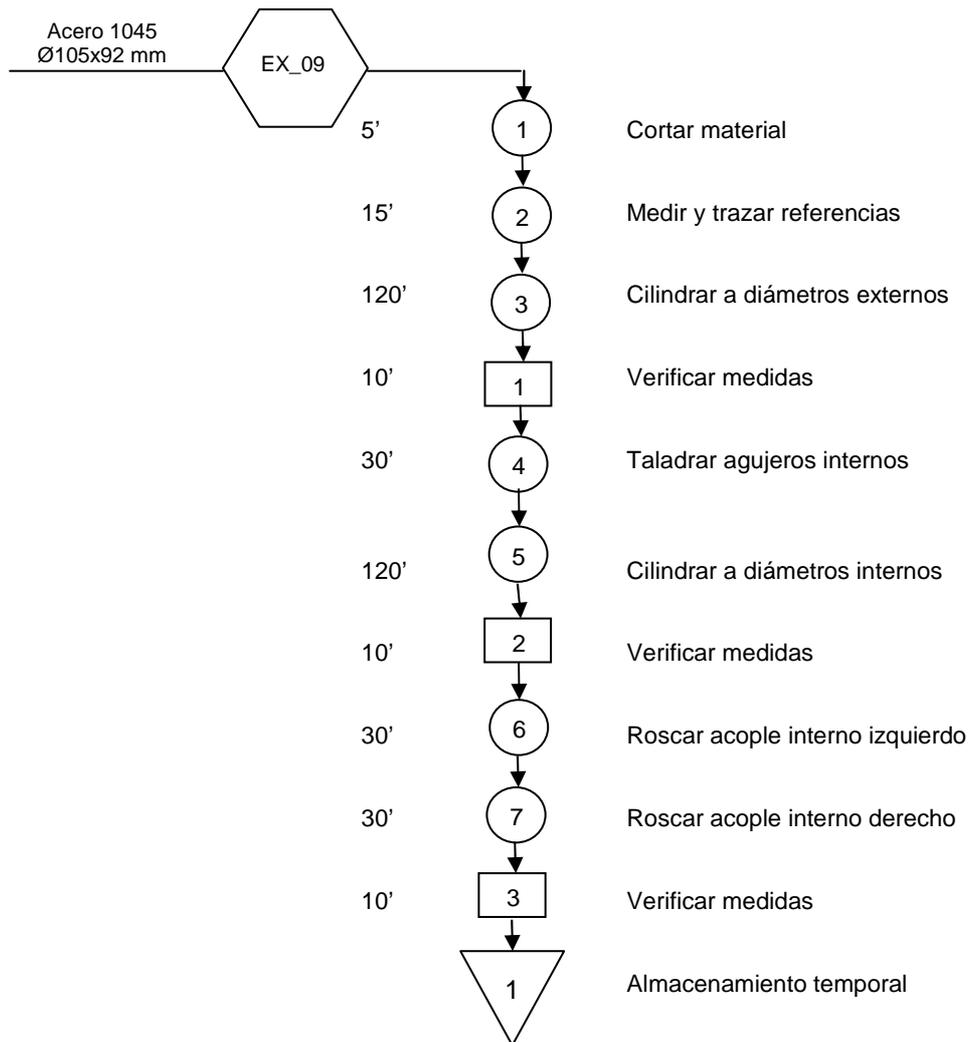
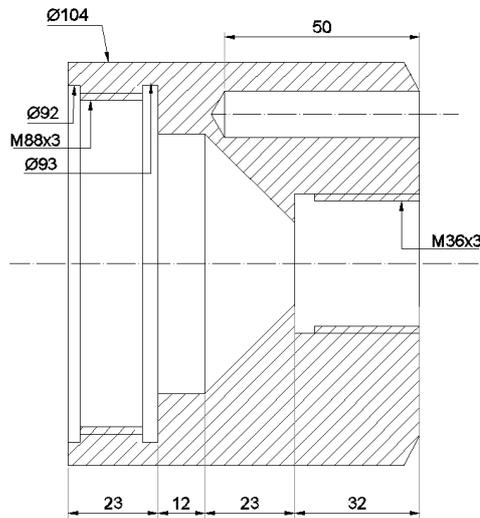
Plano: 8/15



g) Portadado

Cantidad: 1

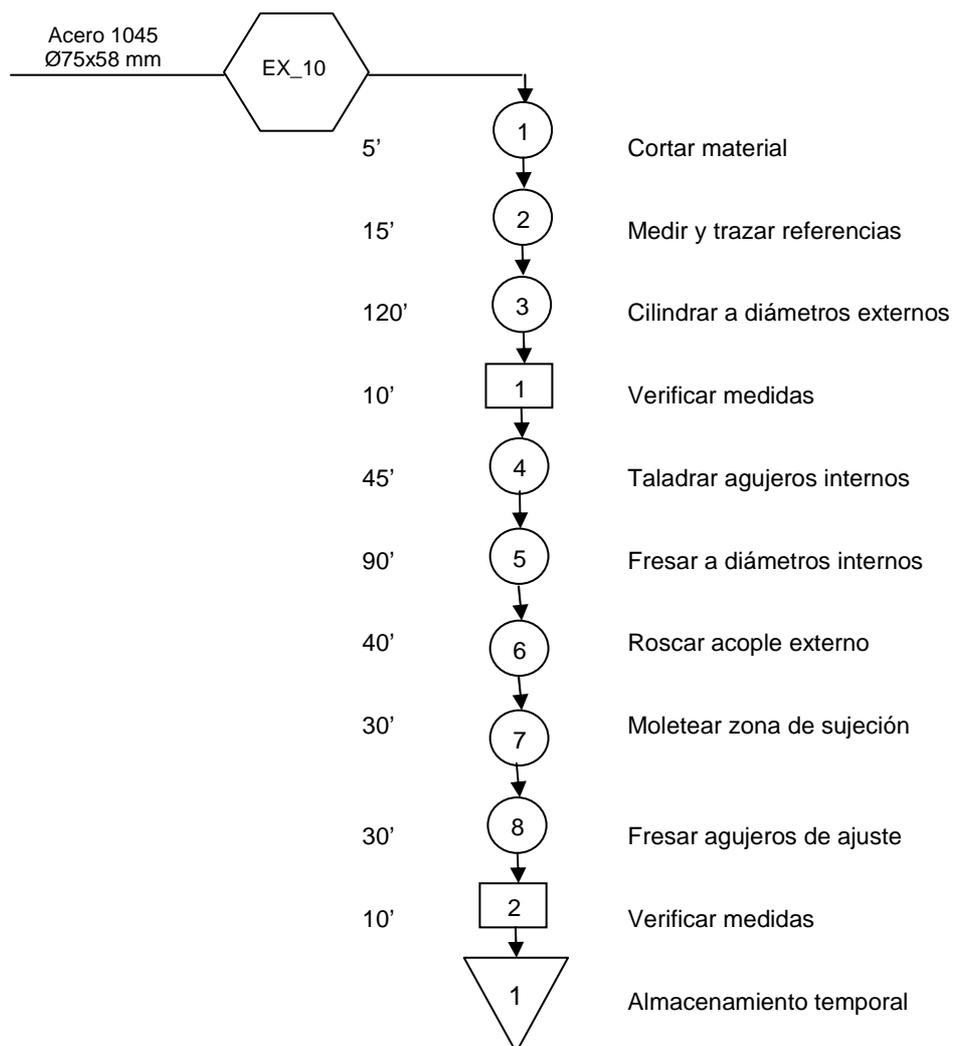
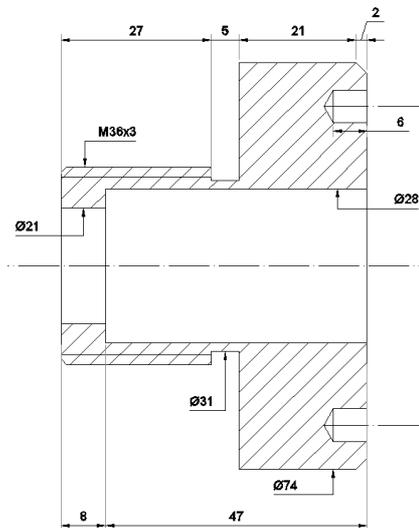
Plano: 9/15



h) Dado

Cantidad: 1

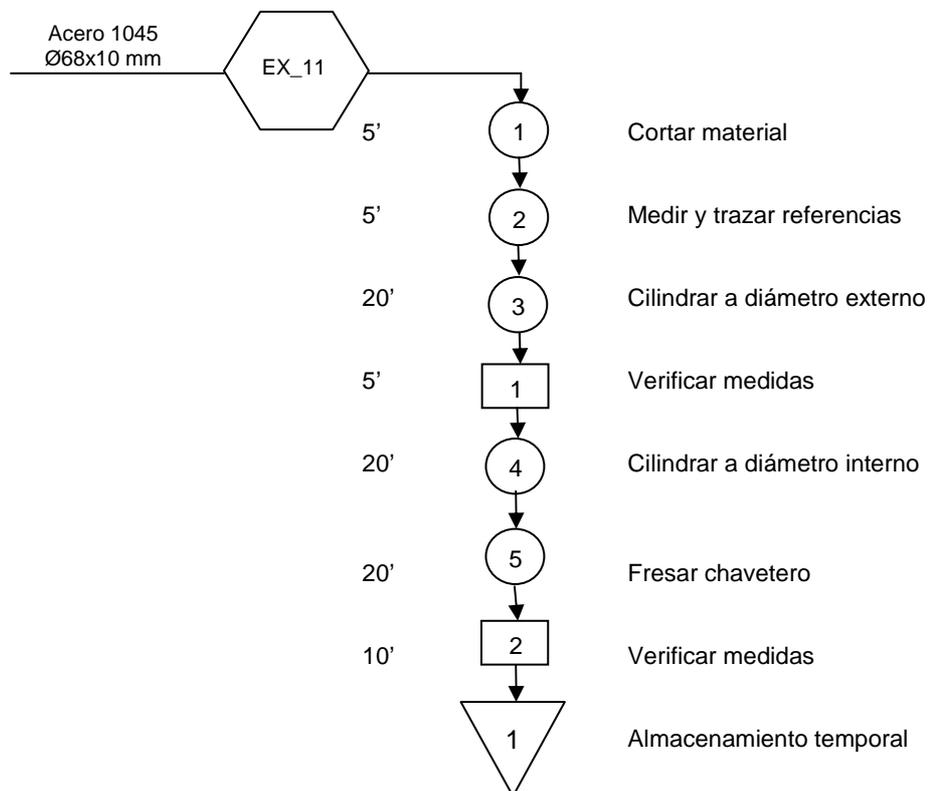
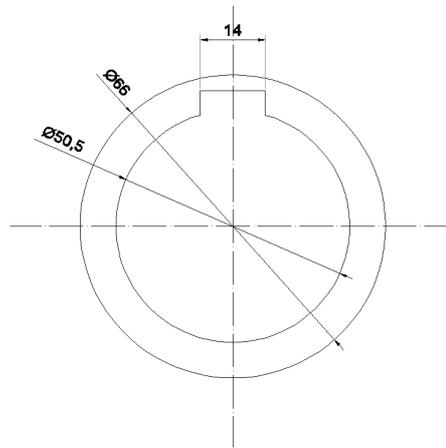
Plano: 10/15



i) Anillo de chaveta

Cantidad: 1

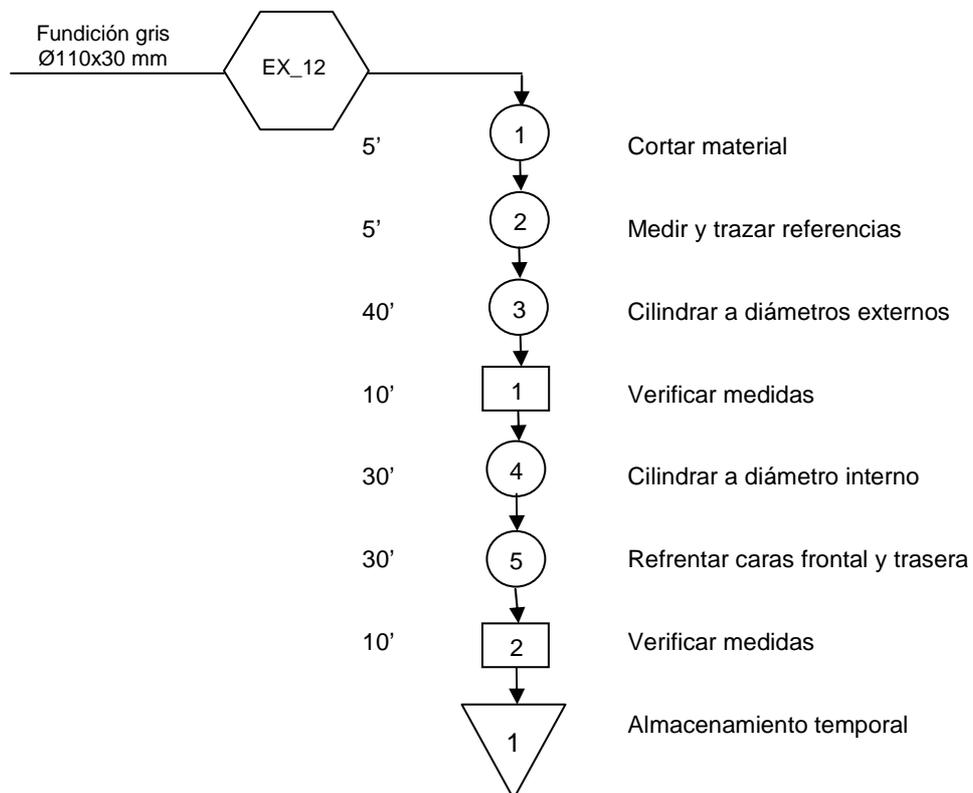
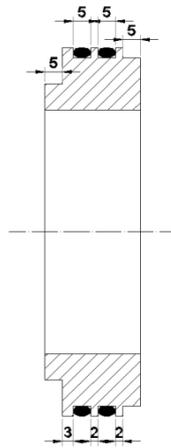
Plano: 11/15



j) Arandela de retenedor

Cantidad: 1

Plano: 12/15



4.2 CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

El cronograma a realizarse para la construcción de la máquina tipo expeller tiene las siguientes actividades:

1. Tornillo simple
2. Alojamiento de rodamientos
3. Tapa de ajuste de rodamientos
4. Camisa zona de alimentación
5. Camisa de extrusión sin agujeros
6. Camisa de extrusión con agujeros
7. Portadado
8. Dado
9. Anillo de chaveta
10. Arandela retenedor
11. Tolva

4.3 RECURSOS DE FABRICACIÓN

En base a los planos de diseño y a los procesos que deben realizarse a los distintos elementos del expeller, el presente punto corresponde a los todos los recursos necesarios para la fabricación de la máquina.

4.3.1 MATERIALES

Los elementos del expeller son construidos con los materiales indicados, debido a que previamente fueron analizados algunos parámetros adicionales a la resistencia tales como la dureza, maquinabilidad y stock.

4.3.1.1 Ejes

4.3.1.1.1 Flecha del tornillo

Debido al diseño y régimen de trabajo del expeller, el tornillo debe tener alta resistencia y dureza para poder resistir los elevados esfuerzos torsionales y el desgaste por fricción, por lo tanto el eje es la barra de acero V945 de Bohlér con las siguientes propiedades mecánicas para diámetros comprendidos entre 16 y 100 mm, el cual es el presente caso de diseño:

Resistencia a la fluencia:	340	MPa
Resistencia a la fractura:	650 - 750	MPa
Dureza:	270	HB

4.3.1.1.2 Camisa zona de alimentación, alojamiento y tapa de ajuste de rodamientos, portadado y dado

Debido a la forma de diseño de los diferentes componentes a maquinar, estos elementos son de un acero AISI 1045, con los diámetros necesarios. Las propiedades mecánicas de esta barra de acero se presentan a continuación:

Resistencia a la tracción:	638	MPa
Resistencia a la fluencia:	313	MPa
Elongación, As:	10	% min
Reducción de área:	40	% min
Dureza:	220 - 235	HB

4.3.1.1.3 Camisas de extrusión

Para facilitar el maquinado y de esta manera disminuir los costos las camisas son de barra perforada SKF 280 con las siguientes propiedades mecánicas:

Resistencia a la tracción: 540 – 608 MPa

Resistencia a la fluencia: 393 - 461 MPa

Elongación, As: 17 % min.

Dureza: 215 HB

4.3.1.2 Rodamientos

Debido a la gran presión que se ejerce dentro del expeller, parte de la fuerza se transmite en sentido axial del tornillo hasta llegar a los apoyos (rodamientos) por efecto de acción – reacción.

Con este preámbulo se escogieron rodamientos cónicos a fin de que estos absorban además de la carga radial por el peso del conjunto, la fuerza axial efecto de la presión interna. Los rodamientos cónicos tienen la siguiente especificación:

Capacidades de carga:

Dinámica (C): 157 kN

Estática (Co): 208 kN

Carga límite de fatiga (Pu): 24.5 kN

Velocidad límite: 5300 rpm

Estas características son determinadas para el rodamiento cónico modelo 32214 J2/Q de SKF.

4.3.1.3 Pernos

4.3.1.3.1 Anclaje de máquina al bastidor

Para el anclaje de la máquina expeller al bastidor se utilizan pernos M12 UNC, SAE grado 8.8, con una longitud $L = 50$ mm.

4.3.1.3.2 Anclaje de motoreductor al bastidor

En el anclaje del motoreductor al bastidor se utilizan pernos M16 UNC, SAE grado 8.8, con una longitud $L = 50$ mm

4.3.1.3.3 Anclaje de tablero eléctrico al bastidor

En el anclaje al bastidor de la estructura metálica que soporta al tablero eléctrico, se utilizan pernos M10 UNF, SAE grado 8.8, con una longitud $L=34$ mm.

4.3.1.3.4 Prisionero ajuste de chaveta

El prisionero que ajusta la chaveta ubica en el eje del tornillo que se conecta al reductor tiene las siguientes especificaciones: M6 UNF, con cabeza hueca hexagonal y una longitud $L = 13$ mm.

4.3.1.3.5 Prisioneros tapa de ajuste de rodamientos

Para graduar el ajuste de los rodamientos y para evitar que la tapa que cumple esta función se desplace en sentido longitudinal se utilizan dos prisioneros con las siguientes especificaciones: M10 UNF, con cabeza hueca hexagonal y una longitud $L = 19$ mm.

4.3.1.3.6 Prisioneros para desmontaje de camisas y dado

Para facilitar el desmontaje de las camisas y dado se han acoplado a cada uno de estos un prisionero con las siguientes especificaciones: M6 UNF, con cabeza hueca hexagonal y una longitud $L = 25$ mm.

4.3.1.4 Soldadura

Para las soldaduras realizadas en el expeller, el bastidor, estructura para el tablero eléctrico se utilizó electrodos E 6011 el cual tiene 60000 lb/pulg² de resistencia y es utilizado para toda posición con revestimiento rutilico.

4.3.1.5 Lámina tolva

Para la construcción de la tolva se utilizó una plancha estándar de 9 x 18 pulgadas, de tol negro con un espesor del 0.9 mm.

4.3.2 MANO DE OBRA

Para la construcción de la máquina tipo expeller se necesita personal técnico capaz de operar maquinas como: torno paralelo, fresa universal, soldadora eléctrica, dobladora de tol, cizalladora, además de personal técnico con conocimiento eléctrico.

4.3.3 EQUIPOS Y HERRAMIENTAS NECESARIOS

4.3.3.1.1 Equipos

- Torno paralelo, con volteo mínimo del 200 mm y distancia entre puntos mínimo de 1 m.
- Fresa universal
- Soldadora eléctrica de corriente continúa.
- Dobladora de longitud mínima de 1 m y espesor de doblado mínimo 6 mm.
- Cizalla manual de longitud mínima 1 m y espesor de corte mínimo de 6 mm.

4.3.3.1.2 Herramientas

- Motortool
- Taladro de mano
- Esmeril
- Cierra de arco
- Machuelos
- Herramienta menor

4.4 MONTAJE

Para el montaje de la máquina expeller se tiene que distinguir 2 sistemas: mecánico y eléctrico.

El lugar en el cual se va a montar y a ubicar la máquina tiene que ser nivelado, amplio y ventilado.

Los pasos y recomendaciones que se describen a continuación son en procura de las buenas prácticas de ingeniería, para mayor detalle de los riesgos que existen en la máquina expeller, se debe consultar el manual de operación y mantenimiento en el ANEXO F.

4.4.1 MONTAJE DE SISTEMA MECÁNICO

El sistema mecánico está conformado por los siguientes elementos: tornillo extrusor, rodamientos cónicos, alojamiento y tapa de rodamientos, retenedores, chaveta, anillo de chaveta, camisa en zona de alimentación, camisas con y sin agujeros, portadado, dado y tolva, estas partes van montadas a un bastidor que soporta al motoreductor.

Para el montaje de las partes se requiere de herramienta menor tal como llaves de boca o de corona # 17 y #19, llaves hexagonales (allen) #5, llave de ajuste de rodamientos (incluida en la máquina), cadena de ajuste de camisas (incluida en la máquina), y lubricantes como grasa clase 2 y aceite liviano.

A continuación se describe el procedimiento de montaje mecánico:

a) Montaje de tornillo extrusor y rodamientos

El tornillo posee en su parte trasera 2 asientos en los que se deben apoyar los rodamientos cónicos, estas superficies deben estar limpias a fin de poder ingresar los cojinetes fácilmente.

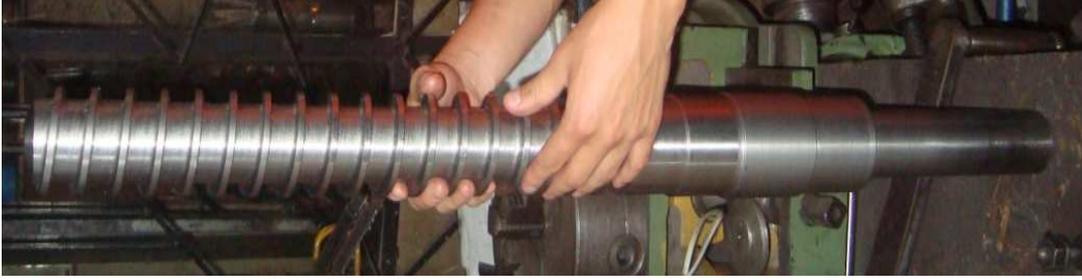


Figura 4.1 Tornillo máquina expeller

Como se observa en la figura 4.2, los rodamientos deben tener opuestas las caras posteriores del cono entre sí. Adicional a los rodamientos, se debe montar el retenedor en el lado de la rosca, este elemento impedirá que cualquier partícula ya sea líquida o sólida producida en la extrusión, ingrese al alojamiento de los rodamientos.



Figura 4.2 Tornillo con rodamientos y retenedor

b) Montaje de tornillo y rodamientos en alojamientos

Una vez montados los rodamientos en el tornillo, se debe engrasar estas partes previo a ingresarlos en el alojamiento, la grasa debe ser clase 2, este procedimiento debe realizarse en un lugar limpio para que no se impregnen partículas en el lubricante y así tener un desempeño correcto de los cojinetes.

El conjunto entra en el alojamiento por la parte posterior a este hasta que el cojinete delantero haga tope en el asiento interno de la camisa. En la figura 4.3 se muestra la parte frontal del alojamiento, se aprecia que en tope delantero ya se halla asentada la pista externa del rodamiento cónico.



Figura 4.3 Alojamiento de rodamientos con pista externa in situ

Una vez ingresado el conjunto tornillo-rodamientos, se debe poner la tapa posterior roscada que regula el ajuste de los rodamientos, la tapa posterior posee muescas en su cara para poder ubicar los puntos en los que se deben apretar los prisioneros que se hallan en la parte externa de la camisa de alojamiento, los cuales evitan que la tapa gire y se afloje cuando la máquina se encuentra en operación. La tapa de ajuste de los rodamientos tiene rosca derecha por lo cual se debe girar en sentido horario para montarla.



Figura 4.4 Ajuste de tapa de regulación de rodamientos

El conjunto debe quedar montado tal y como se muestra en la figura 5.5.



Figura 4.5 Conjunto tornillo - alojamiento rodamientos armado

c) Montaje camisa zona de alimentación

La camisa de la zona de alimentación se acopla al alojamiento de los rodamientos mediante una rosca hembra que tiene en la parte trasera como se aprecia en la figura 4.6.



Figura 4.6 Roscado para acople con alojamiento de rodamientos

Hay que tener cuidado en el montaje de este elemento al momento de pasar el tornillo a fin de evitar golpes que puedan afectar a cualquiera de las dos partes en mención. En el momento de dar el último giro de ajuste entre el alojamiento y la zona de alimentación, se puede sentir un pequeño juego en la rosca ya que esta holgura permite cuadrar la máquina sobre el bastidor. En la figura 4.7 se aprecia el conjunto armado.



Figura 4.7 Camisa de alimentación y alojamiento montados

d) Montaje del conjunto en bastidor y motor

Por facilidad de operación, es mejor montar el conjunto sin camisas de extrusión sobre el tornillo debido a que el peso de las mismas incomoda situar el conjunto en su lugar.

En primer lugar se debe colocar el anillo de la chaveta en su posición, este anillo permitirá luego ubicar a la máquina con los respectivos pernos ubicados en el bastidor, una vez puesta la chaveta y su anillo, se debe insertar la flecha en al agujero que posee el motoreductor, este agujero debe estar limpio y de preferencia lubricado con aceite liviano para un montaje fácil. El juego que tiene la rosca ente la alimentación y el alojamiento permite cuadrar la máquina en la mesa de manera que coincidan los agujeros de los pernos del bastidor.

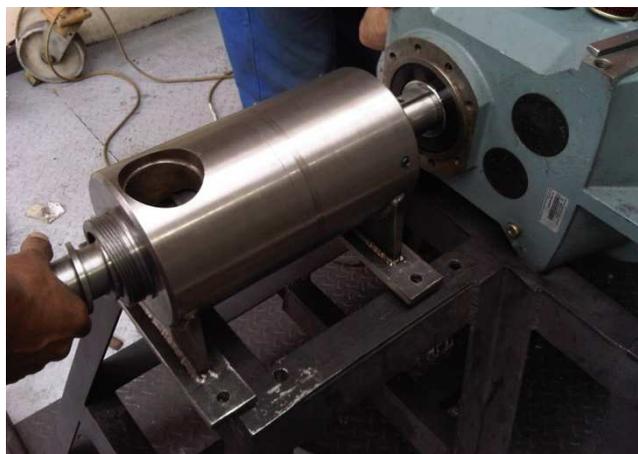


Figura 4.8 Montaje en motor y bastidor

El ajuste de los pernos con las llaves debe ser controlado con un nivel a fin de que la máquina quede alineada lo mejor posible respecto al reductor de velocidad, esta operación evitará el cabeceo del tornillo mismo que pudiera dañar el interior de las camisas de extrusión.

En la figura 4.9 se muestra el conjunto conectado al motoreductor sobre el bastidor.



Figura 4.9 Conjunto montado en motoreductor y bastidor

e) Montaje de camisas y portadado

Las camisas y el portadado disponen de prisioneros roscados en la superficie externa de las mismas, cada camisa tiene un prisionero m5 en el cual se inserta la llave de cadena que se proporciona con la máquina expeller.

Para el montaje se debe introducir la cadena en el prisionero de manera que el espacio que existe entre cada uno de los eslabones quede ajustado, para montar el elemento se debe girar en el sentido horario debido a que los acoples tienen rosca derecha. Para un fácil montaje se debe limpiar de impurezas sólidas las roscas, además se sugiere lubricar las roscas con un poco de aceite liviano.



Figura 4.10 Montaje de camisas de extrusión en máquina expeller

Para desarmar cada camisa, se debe poner la llave de cadena de tal manera de poder hacer girar las piezas en sentido anti horario.

f) Montaje del dado

El dado posee cuatro agujeros en su parte frontal a fin de poder montar una llave que sirva para el montaje y desmontaje de la misma, además en caso de no disponer de la llave, se tiene un moleteado para poder ajustar manualmente. El procedimiento es similar al de las camisas y el portadado, es decir se debe limpiar las roscas de impurezas y también lubricar con un poco aceite liviano.



Figura 4.11 Montaje de dado en máquina expeller

Con todos los elementos montados de la máquina expeller, antes de ponerla en funcionamiento se debe revisar que cada uno de los elementos roscados estén bien apretados, ya que esto evitará fallas cuando este en operación.

En la figura 4.12 se muestran todos los elementos montados en la máquina expeller.



Figura 4.12 Máquina expeller montada

4.4.2 MONTAJE DE SISTEMA ELÉCTRICO

Para el sistema eléctrico se debe contar con una instalación trifásica de 220V tanto para el sistema motriz cuanto para el sistema de calentamiento del extrusor, además de los distintos dispositivos de seguridad de la misma como breakers y/o fusibles.

El sistema eléctrico incluye un tablero eléctrico en el cual se hallan un breaker trifásico de 30 A en cada línea, un arrancador suave, pulsadores on/off, focos indicadores de encendido y falla; además también está el motor eléctrico y el sistema de calentamiento del expeller.

La herramienta necesaria para el sistema eléctrico es menor, entre las cuales están pinzas, desarmadores planos y estrella, llaves de corona #8, y un multímetro para comprobar el correcto funcionamiento.

Los cables con los cuales se conecta el sistema eléctrico son:

- a) Cables AWG 8 para la conexión desde la instalación principal al tablero y desde el tablero hacia el motor (L1, L2, L3).
- b) Cables AWG 16 para las conexiones internas del tablero (cables color café y anaranjado).

c) Cables AWG 12 para las resistencias de calentamiento del expeller (cables verde y celeste).

El diagrama eléctrico se muestra en la figura 4.13.

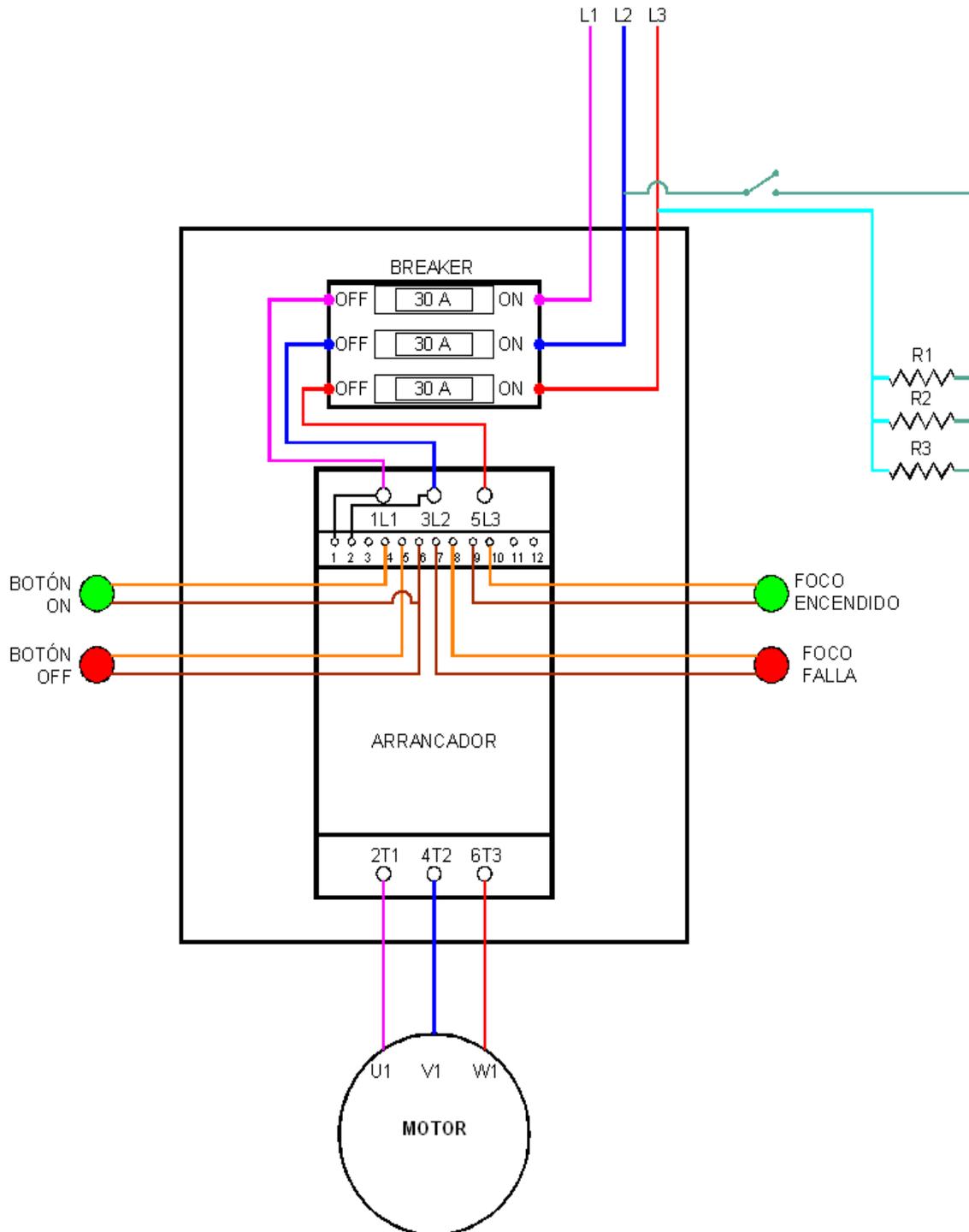


Figura 4.13 Diagrama eléctrico de máquina expeller

La correcta conexión de las líneas de alimentación es necesaria debido a que esta dará el sentido de giro del motor, el sistema motriz debe tener un giro horario para que el material sea empujado en dirección al dado, caso contrario el material quedará girando en la zona de alimentación y no funcionará el sistema en general.

Como se aprecia en la figura 4.13, las resistencias se encuentran en paralelo para que funcionen con el mismo voltaje, además se ubica un interruptor en la línea de energía de las mismas a fin de poder encender el sistema de calentamiento del expeller.

Todas las conexiones se las deberá realizar con la alimentación desconectada para evitar accidentes.

En el arrancador hay un panel para controlar tanto la rampa de encendido cuanto la rampa de parada, es decir, este control permite ajustar el tiempo en el cual va a empezar el motor a correr a plena carga e igualmente el tiempo de apagado.

La tabla de seteo de estos parámetros de ajuste de tiempos se encuentra en el ANEXO G.

Previo al encendido de la máquina expeller hay que revisar que todas las conexiones estén correctas, caso contrario ajustarlas.

El momento de encender el tablero de control se encenderá una luz verde en el arrancador, como se muestra en la figura 4.14.



Figura 4.14 Arrancador encendido

En caso de que haya algún problema de encendido, se encenderá una luz roja en el arrancador, en la figura 4.15 se aprecia esto.



Figura 4.15 Arrancador en falla

Una vez realizadas el montaje mecánico y eléctrico la máquina, la máquina expeller está lista para entrar en operación.

CAPITULO 5

5. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

5.1 PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO

Se deben considerar parámetros que permitan realizar un protocolo de pruebas, con el propósito de tener información necesaria para extrapolar datos que sirvan en estudios de industrialización para la extracción de aceite vegetal con la máquina tipo expeller.

a) Potencia

Se medirá la potencia eléctrica en condiciones de vacío y plena carga, además de la potencia de calentamiento que necesita el sistema de extracción para su funcionamiento.

b) Velocidad

La velocidad es un parámetro definitorio en el proceso debido a que según varíe esta, también se variará la capacidad de extracción, así como también, la temperatura y la presión en el proceso.

c) Masa líquida

Una vez terminado el proceso de extracción de aceite se debe medir la masa de aceite líquido que este logró, en función de conocer el porcentaje de aceite extraído con relación a su masa sólida, que debe estar en un rango de 25 a 30%, como ya se explicó anteriormente.

d) Masa sólida

Es la masa extruida a través del dado, la cual en su estructura contiene una mínima cantidad de aceite remanente, no superior al 5%.

e) Temperatura de trabajo

La máquina cuenta con un sistema de calentamiento, formado por tres resistencias de 400 w cada una, las cuales se encuentran en la zona dosificadora o dado, en el interior del porta dados a distancias equidistantes

entre sí, la función de este sistema es elevar la temperatura que es necesaria para lograr la extracción del aceite, ya que con esto las moléculas del aceite tienen la facilidad de separarse del cuerpo de la semilla.

Es por esto que la toma de temperatura en varias zonas del expeller es necesaria para lograr la estabilidad en el proceso, ya que la temperatura del aceite extraído no debe superar los 90 C, para mantener el rango de fósforo de este dentro de los parámetros correctos para su utilización en la parte energética.

5.2 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

Para la toma de datos en el proceso de extracción de aceite es necesario el uso de instrumentos de medición.

a) Pinza de Corriente

Este debe medir corriente alterna, además se necesita que los cables de la conexión trifásica se encuentren libres entre sí para poder tomar su medición.

b) Tacómetro

El instrumento debe medir un rango de velocidad de entre 0 y 400 rpm.

c) Balanzas

Se necesita una balanza para medir la masa de semilla que se necesita extruir y también al finalizar el proceso se pueda medir la masa de aceite y de torta extraída.

d) Probetas graduadas

Para la medición del volumen extraído de aceite se necesita de probetas en las cuales se pueda medir la cantidad de aceite extraído.

e) Termómetro infrarrojo

El termómetro debe ser capaz de medir temperaturas en metales sin contacto para evitar quemaduras, además el rango de operación deberá ser desde los 0 C hasta los 400 C.

5.3 PROCEDIMIENTO DE PRUEBAS

El protocolo de pruebas para la extracción de aceite vegetal del piñón es el siguiente:

1. Para iniciar las pruebas de funcionamiento de la máquina extractora de aceite, se toman muestras con una balanza romana la medida de 7,5 kg de masa de semilla, la cual debe haber sido previamente limpiada a través de una malla a manera de zaranda, para eliminar la mayor cantidad de impurezas como polvo y cascará seca de esta.
2. Antes de empezar cualquier proceso se debe asegurar que la máquina este en la condiciones óptimas de funcionamiento, es decir completamente limpia y que sus conexiones estén correctamente instaladas.
3. Para procesar la semilla, se debe precalentar la máquina, encendiendo las tres resistencias que la máquina posee, ya que el calor que estas generan es necesario para la extracción de aceite, las temperaturas de precalentamiento promedio para una velocidad en el tornillo de 85 rpm, son: punto 1 = 22 C, punto 2 = 48 C, punto 3 = 106 C, punto 4 = 201 C, punto 5 = 186 C; el tiempo promedio que toma alcanzar estas temperaturas es de 13 minutos. En cuanto a las temperaturas de precalentamiento promedio para una velocidad de 170 rpm, son: punto 1 = 30 C, punto 2 = 52 C, punto 3 = 114 C, punto 4 = 206 C, punto 5 = 196 C; con un tiempo promedio para alcanzar estas temperaturas es de 16 minutos.
4. Una vez precalentada la máquina y comprobada su temperatura en los diferentes puntos, hay que encender el arrancador para de esta manera poner en marcha el motor cuya velocidad irá aumentando progresivamente, es decir en rampa, para evitar que la elevación súbita de potencia afecte las partes eléctricas y también evitar que la elevación de torque afecte la parte mecánica de este.
5. Con la máquina funcionando ya en vacío se coloca la semilla dentro de la tolva conectada a la zona de alimentación del expeller para empezar de esta manera ya la extracción de aceite.
6. Una vez ingresada la semilla, el aceite empieza a aparecer por la camisa con agujeros, así como también, la torta extruida a través del dado, en un tiempo promedio de 40 segundos a una velocidad de 85 rpm y si la máquina funciona a 170 rpm el tiempo promedio que a estos les toma en salir es de 20 segundos. Después de esto, el proceso es continuo, en donde la temperatura

en cada uno de los cinco puntos, es tomada en intervalos de 1 minuto a partir del ingreso de la semilla al sistema.

7. A la temperatura hay que mantenerla constante en cada uno de sus puntos, por lo cual las resistencias deben ser prendidas y apagadas según se las necesiten, por ello en las pruebas se ha establecido que el intervalo de tiempo promedio que las resistencias deben estar prendidas y apagadas respectivamente es de 1 minuto. Esto debido a que si la temperatura desciende en el sistema, el proceso puede afectarse y de esta manera detenerse la extrusión, y si sucede el caso contrario en el que la temperatura ascienda, el aceite extraído no será de buena calidad, ya que no hay que olvidar que la temperatura máxima a la que el aceite debe llegar en la extrusión es de 90 C.

8. Durante la extrusión se mide también la potencia que el sistema necesita para su funcionamiento y la velocidad a la que el motor gira.

9. Una vez terminada la extracción de la semilla seleccionada, se procede a apagar todo el sistema y a medir la masa de aceite y la masa de torta extruida para de esta manera calcular el porcentaje de aceite que el proceso suministró.

10. Para finalizar, hay que desmontar las camisas y el dado del expeller, para realizar la limpieza del mismo a fin de evitar corrosión en el material, para realizar esto hay que tener sumo cuidado ya que las temperaturas en las partes a desmontar son elevadas.

5.4 TOMA DE DATOS

Para la toma de datos de las pruebas de funcionamiento de la máquina expeller, se las realizó a dos velocidades distintas, cuatro pruebas con velocidad de 85 rpm y cuatro pruebas adicionales con una velocidad de 170 rpm, utilizando semilla entera. Aquí se logró medir la temperatura con intervalos de un minuto a partir del primero, así como la comprobación de la velocidad a la que gira el husillo, la potencia eléctrica que el sistema necesita para su funcionamiento, el volumen de aceite extraído y la medida de masa tanto de aceite como de torta extraída.

Finalmente se hizo una prueba con semilla pelada, en la cual se esperaba una mejor calidad de aceite con respecto a las impurezas, sin embargo esta prueba

no dio resultados ya que no pudo ser extruido el producto, es decir, la semilla completa que contiene su cáscara, ofrece la fricción necesaria entre el tornillo y las camisas que facilita la compresión en ellas.

En las siguientes tablas se presentan los datos tomados durante las pruebas de funcionamiento:

Tabla 5.1 Prueba 1

Fecha	05/11/2010
Masa de semilla	7,5kg
Velocidad Tornillo	85 rpm

	Temperatura C															
	inicial	1'	3'	5'	7'	9'	11'	13'	15'	17'	19'	21'	23'	25'	27'	
Punto 1	23	23	25	22	26	26	25	29	25	26	25	27	25	25	27	
Punto 2	41	95	100	93	75	76	81	93	91	80	70	68	60	64	80	
Punto 3	91	87	90	76	84	73	84	80	80	71	79	77	81	82	84	
Punto 4	194	200	209	183	186	175	190	181	182	170	177	178	181	175	184	
Punto 5	180	195	200	165	160	170	180	180	181	176	175	167	180	165	190	

Masa desecho	5,40 kg
Masa de aceite	2,10 kg
Tiempo de precalentamiento	13 min

Tabla 5.2 Prueba 2

Fecha	10/11/2010
Masa de semilla	7,5kg
Velocidad Tornillo	85 rpm

	Temperatura C																	
	inicial	1'	3'	5'	7'	9'	11'	13'	15'	17'	19'	21'	23'	25'	27'	29'	31'	
Punto 1	22	23	23	26	25	23	23	24	23	25	23	23	25	23	25	25	25	
Punto 2	60	62	63	70	80	77	62	65	67	66	64	69	70	69	69	78	74	
Punto 3	125	114	100	112	105	114	97	102	108	105	114	118	102	113	92	115	101	
Punto 4	212	199	180	193	188	186	174	180	184	180	180	193	180	181	160	182	176	
Punto 5	193	155	180	175	177	166	180	184	188	180	177	180	180	165	167	167	165	

Masa desecho	5,70 kg
Masa de aceite	1,80 kg
Tiempo de precalentamiento	13 min

Tabla 5.3 Prueba 3

Fecha	10/11/2010
Masa de semilla	7,5kg
Velocidad Tornillo	85 rpm

	Temperatura C															
	inicial	1'	3'	5'	7'	9'	11'	13'	15'	17'	19'	21'	23'	25'	27'	29'
Punto 1	22	24	25	24	23	24	24	25	25	24	24	24	23	24	25	24
Punto 2	64	46	70	55	59	76	76	80	82	70	71	72	87	89	90	82
Punto 3	127	149	150	129	130	157	157	147	139	132	136	140	135	132	128	131
Punto 4	199	210	214	210	207	222	222	223	215	194	198	205	204	199	193	192
Punto 5	187	204	210	175	128	205	205	215	201	130	135	140	160	175	159	156

Masa desecho	5,55 kg
Masa de aceite	1,95 kg
Tiempo de precalentamiento	13 min

Tabla 5.4 Prueba 4

Fecha	10/11/2010
Masa de semilla	7,5kg
Velocidad Tornillo	85 rpm

	Temperatura C															
	inicial	1'	3'	5'	7'	9'	11'	13'	15'	17'	19'	21'	23'	25'	27'	
Punto 1	25	27	25	24	22	24	27	24	24	25	23	24	26	28	26	
Punto 2	70	86	84	87	93	88	85	89	94	87	88	88	85	89	90	
Punto 3	131	155	157	151	149	143	147	159	154	150	143	138	141	138	143	
Punto 4	199	205	209	215	217	229	224	218	217	209	197	195	198	193	195	
Punto 5	183	287	203	194	187	184	188	209	213	207	199	192	180	174	177	

Masa desecho	5,33 kg
Masa de aceite	2,18 kg
Tiempo de precalentamiento	13 min

Tabla 5.5 Prueba 5

Fecha	25/11/2010
Masa de semilla	15kg
Velocidad Tornillo	170 rpm

	Temperatura C																	
	inicial	1'	3'	5'	7'	9'	11'	13'	15'	17'	19'	21'	23'	25'	27'	29'	31'	
Punto 1	29	26	27	26	26	27	26	24	27	25	26	27	25	23	25	26	28	
Punto 2	71	73	70	69	67	75	68	67	73	67	70	72	68	71	74	69	74	
Punto 3	105	122	102	100	91	89	81	82	80	78	81	84	82	78	81	83	82	
Punto 4	203	190	186	214	162	186	199	200	194	190	195	198	192	189	194	197	193	
Punto 5	196	214	170	174	156	178	144	148	168	160	167	168	164	161	170	172	169	

Masa desecho	11,25 kg
Masa de aceite	3,75 kg
Tiempo de precalentamiento	16 min

	Potencia HP															
	1'	3'	5'	7'	9'	11'	13'	15'	17'	19'	21'	23'	25'	27'	29'	31'
Línea 1	5,82	5,31	5,52	5,36	5,36	5,47	5,41	5,31	5,31	5,41	5,36	5,47	5,47	5,52	5,36	5,36
Línea 2	7,92	5,62	7,71	5,62	7,56	5,62	7,97	5,62	7,56	5,62	7,61	5,62	7,76	5,67	7,87	5,62
Línea 3	6,90	6,64	6,54	6,38	6,64	6,54	6,64	6,49	6,38	6,64	6,64	6,54	6,90	6,54	6,64	6,64

Tabla 5.6 Prueba 6

Fecha	25/11/2010
Masa de semilla	15kg
Velocidad Tornillo	170 rpm

	Temperatura C															
	inicial	1'	3'	5'	7'	9'	11'	13'	15'	17'	19'	21'	23'	25'	27'	
Punto 1	31	30	31	35	33	32	30	33	32	33	30	34	33	35	31	
Punto 2	54	96	94	106	101	84	85	86	88	86	85	91	89	92	89	
Punto 3	107	132	120	110	109	93	89	96	94	92	91	97	95	98	94	
Punto 4	200	220	223	211	196	197	206	212	208	206	205	212	206	207	201	
Punto 5	196	214	214	209	199	185	194	203	201	198	197	204	201	204	198	

Masa desecho	10,95 kg
Masa de aceite	4,05 kg
Tiempo de precalentamiento	16 min

	Potencia HP													
	1'	3'	5'	7'	9'	11'	13'	15'	17'	19'	21'	23'	25'	27'
Línea 1	5,31	5,26	5,21	5,06	5,11	5,26	5,21	5,11	5,26	5,26	5,11	5,31	5,26	5,11
Línea 2	5,47	7,30	7,30	5,31	5,31	7,25	7,36	5,41	5,26	7,15	7,25	5,52	5,31	7,20
Línea 3	6,33	6,49	6,59	6,33	6,33	6,54	6,38	6,33	6,49	6,44	6,49	6,33	6,54	6,49

Tabla 5.7 Prueba 7

Fecha	25/11/2010
Masa de semilla	15kg
Velocidad Tornillo	170 rpm

	Temperatura C															
	inicial	1'	3'	5'	7'	9'	11'	13'	15'	17'	19'	21'	23'	25'	27'	29'
Punto 1	26	28	27	28	25	27	28	26	28	27	25	23	28	27	28	28
Punto 2	76	84	83	81	78	84	87	81	84	79	86	81	85	89	94	89
Punto 3	105	124	101	104	89	91	80	83	81	85	87	94	86	70	75	76
Punto 4	203	189	183	210	157	183	194	198	189	183	191	192	187	183	189	193
Punto 5	196	209	177	169	167	168	137	139	159	157	161	161	159	158	165	183

Masa desecho	11,10 kg
Masa de aceite	3,90 kg
Tiempo de precalentamiento	16 min

	Potencia HP														
	1'	3'	5'	7'	9'	11'	13'	15'	17'	19'	21'	23'	25'	27'	29'
Línea 1	5,87	5,26	5,41	5,31	5,26	5,52	5,26	5,21	5,47	5,52	5,57	5,52	5,52	5,57	5,47
Línea 2	8,02	5,72	7,82	5,67	7,66	5,62	7,87	5,72	7,66	5,62	7,76	5,62	7,87	5,62	8,02
Línea 3	6,95	6,74	6,59	6,33	6,74	6,59	6,64	6,54	6,44	6,69	6,69	6,64	7,00	6,64	6,64

Tabla 5.8 Prueba 8

Fecha	25/11/2010
Masa de semilla	15kg
Velocidad Tornillo	170 rpm

	Temperatura C														
	inicial	1'	3'	5'	7'	9'	11'	13'	15'	17'	19'	21'	23'	25'	
Punto 1	33	32	34	37	38	35	31	34	33	37	32	35	34	35	
Punto 2	54	122	101	102	106	89	81	95	83	89	88	94	86	95	
Punto 3	107	130	125	115	112	91	94	92	91	89	94	98	92	96	
Punto 4	219	226	226	209	199	204	209	218	215	219	225	216	221	216	
Punto 5	197	213	217	212	186	198	188	204	207	203	207	202	207	198	

Masa desecho	10,50 kg
Masa de aceite	4,50 kg
Tiempo de precalentamiento	16 min

	Potencia HP												
	1'	3'	5'	7'	9'	11'	13'	15'	17'	19'	21'	23'	25'
Línea 1	5,36	5,36	5,31	5,21	5,31	5,26	5,21	5,36	5,41	5,47	5,52	5,47	5,36
Línea 2	5,52	7,46	5,57	5,31	5,31	7,51	7,56	5,57	5,47	7,51	7,56	5,57	5,57
Línea 3	6,59	6,59	6,54	6,44	6,59	6,54	6,59	6,54	6,59	6,49	6,59	6,59	6,59

A continuación se presentan algunas fotos del proceso de pruebas con semilla sin descascarar:



Figura 5.1 Puntos de toma de temperatura



Figura 5.2 Puntos de toma de temperatura en operación



Figura 5.3 Extracción de aceite



Figura 5.4 Extracción de aceite y torta



Figura 5.5 Proceso de extracción



Figura 5.6 Torta obtenida



Figura 5.7 Aceite obtenido

Prueba con semilla descascarada:



Figura 5.8 Prueba con semilla descascarada

5.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez tomados los parámetros medibles en el proceso de extracción de aceite, se presentan el promedio de las temperaturas en cada uno de los puntos de toma de datos, así como el porcentaje en masa de aceite extraído en cada una de las pruebas realizadas.

Tabla 5.9 Promedio de temperaturas y porcentaje de extracción en prueba 1 @ 85 rpm

Promedio de temperatura C	
Punto 1	25,27
Punto 2	77,80
Punto 3	81,27
Punto 4	184,33
Punto 5	177,60

Porcentaje extracción	
Desecho	72
Aceite	28

Tabla 5.10 Promedio de temperaturas y porcentaje de extracción en prueba 2 @ 85 rpm

Promedio de temperatura C	
Punto 1	23,88
Punto 2	68,53
Punto 3	108,06
Punto 4	184,00
Punto 5	175,24

Porcentaje extracción	
Desecho	76
Aceite	24

Tabla 5.11 Promedio de temperaturas y porcentaje de extracción en prueba 3 @ 85 rpm

Promedio de temperatura C	
Punto 1	23,98
Punto 2	73,06
Punto 3	138,69
Punto 4	206,69
Punto 5	174,06

Porcentaje extracción	
Desecho	74
Aceite	26

Tabla 5.12 Promedio de temperaturas y porcentaje de extracción en prueba 4 @ 85 rpm

Promedio de temperatura C	
Punto 1	24,93
Punto 2	86,87
Punto 3	146,60
Punto 4	208,00
Punto 5	198,47

Porcentaje extracción	
Desecho	71
Aceite	29

Tabla 5.13 Promedio de temperaturas, porcentaje de extracción y promedio de potencia en prueba 5 @ 170 rpm

Promedio de temperatura C	
Punto 1	26,06
Punto 2	70,47
Punto 3	88,29
Punto 4	193,06
Punto 5	169,35

Porcentaje extracción	
Desecho	75
Aceite	25

Promedio de potencia HP	
Línea 1	5,43
Línea 2	6,68
Línea 3	6,61

Tabla 5.14 Promedio de temperaturas, porcentaje de extracción y promedio de potencia en prueba 6 @ 170 rpm

Promedio de temperatura C	
Punto 1	32,20
Punto 2	88,40
Punto 3	101,13
Punto 4	207,33
Punto 5	201,13

Porcentaje extracción	
Desecho	73
Aceite	27

Promedio de potencia HP	
Línea 1	5,20
Línea 2	6,32
Línea 3	6,44

Tabla 5.15 Promedio de temperaturas, porcentaje de extracción y promedio de potencia en prueba 7 @ 170 rpm

Promedio de temperatura C	
Punto 1	26,81
Punto 2	83,81
Punto 3	89,44
Punto 4	189,00
Punto 5	166,56

Porcentaje extracción	
Desecho	74
Aceite	26

Promedio de potencia HP	
Línea 1	5,45
Línea 2	6,82
Línea 3	6,66

Tabla 5.16 Promedio de temperaturas, porcentaje de extracción y promedio de potencia en prueba 8 @ 170 rpm

Promedio de temperatura C	
Punto 1	34,29
Punto 2	91,79
Punto 3	101,86
Punto 4	215,86
Punto 5	202,79

Porcentaje extracción	
Desecho	70
Aceite	30

Promedio de potencia HP	
Línea 1	5,36
Línea 2	6,27
Línea 3	6,56

El promedio general de temperaturas, masas y porcentajes de extracción para una velocidad de 85 rpm en el tornillo se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 5.17 Promedio de parámetros para velocidad de extrusión 85 rpm

Promedio de temperaturas (C) @ 85 rpm	
Punto 1	24,52
Punto 2	76,56
Punto 3	118,65
Punto 4	195,76
Punto 5	181,34

Promedio de masa de extrusión (kg) y porcentajes @ 85 rpm	
Masa desecho	5,49
Masa de aceite	2,01
% desecho	73,25
% aceite	26,75

Promedio de tiempo de extracción (min) @ 85 rpm, m=7,5 kg	
28,50	

En la siguiente tabla se muestra los promedios generales de temperaturas, masa y porcentajes de extracción, además de la potencia promedio requerida en el proceso de extrusión a una velocidad de 170 rpm.

Tabla 5.18 Promedio de parámetros para velocidad de extrusión 170 rpm

Promedio de temperaturas (C) @ 170 rpm	
Punto 1	29,84
Punto 2	83,62
Punto 3	95,18
Punto 4	201,31
Punto 5	184,96

Promedio de masa de extrusión (kg) y porcentajes @170 rpm	
Masa desecho	10,95
Masa de aceite	4,05
% desecho	73,00
% aceite	27,00

Promedio de tiempo de extracción (min) @170 rpm, m=15 kg	
28,00	

Promedio de potencia (HP) @170 rpm	
Línea 1	5,36
Línea 2	6,52
Línea 3	6,56

Como se puede mostrar en las tablas 5.17 y 5.18, se han determinado los parámetros de funcionamiento con los cuales se ha extraído el aceite, respecto a la temperatura se aprecia que su variación en el punto 2, por el cual sale el aceite, es mínima teniendo un 8% de aumento con la mayor velocidad, por lo que el aceite no ha superado el límite de temperatura máxima.

Respecto a la velocidad de producción, en las pruebas con motor @85 rpm se obtuvo en promedio 7.5 kg en 28 minutos, mientras que, a @170 rpm, se alcanzó la capacidad promedio de 15 kg en el mismo lapso de tiempo.

La potencia necesaria para la extrusión se aproxima a los 7 HP, por lo cual el tamaño de motor usado se podrá reducir a fin de abaratar costos del sistema, en el caso de reproducir esta máquina.

5.6 MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

En el manual de operación y mantenimiento se detallan los parámetros con los cuales debe funcionar el expeller, así como también los riesgos y peligros que existen en el uso de la misma, además se menciona el mantenimiento que dará una vida útil aceptable a la máquina.

El manual de operación y mantenimiento se muestra en el ANEXO F.

CAPITULO 6

6. ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO

6.1 ANÁLISIS ECONÓMICO

6.1.1 COSTOS DIRECTOS

6.1.1.1 Personal

Tabla 6.1 Pago de personal

Función	Meses	Costo mensual	Valor total
Director	6	390.00	2.340.00
Codirector	6	300.00	1.800.00
Estudiante CIME	6	188.33	1.130.00
Estudiante CIME	6	188.33	1.130.00
Total 1			6.400.00

6.1.1.2 Máquina expeller

6.1.1.2.1 Materiales y accesorios

Tabla 6.2 Costos de materiales y accesorios

No.	Descripción	Cantidad	Valor unitario	Valor total
1	Motoreductor 15 HP	1	2.400.00	2.400.00
2	Arrancador suave 15 HP	1	1.250.00	1.250.00
3	Eje acero V945, Ø75 x 770 mm	1	89.05	89.05
4	Eje acero 1045, Ø162 x 355 mm	1	214.71	214.71
5	Eje acero 1045, Ø140 x 32 mm	1	17.75	17.75

Tabla 6.2 Costos de materiales y accesorios (Continuación)

No.	Descripción	Cantidad	Valor unitario	Valor total
6	Barra perforada SKF 280 Ø105 x Ø65 x 290 mm	1	127.67	127.67
7	Eje acero 1045, Ø105 x 92 mm	1	26.29	26.29
8	Eje acero 1045, Ø75 x 58 mm	1	6.87	6.87
9	Eje acero 1045, Ø68 x 10 mm	1	1.43	1.43
10	Fundición gris, Ø68 x 30 mm	1	6.25	6.25
11	Lámina tol negro e=0.90 mm	Global		15.00
12	Rodamientos SKF 32214 J2/Q	2	45.35	90.37
13	“O” rings, Ø105 x Ø105 mm	2	3.75	7.50
14	Retenedor de caucho, Ø90 x Ø70 x 10 mm	1	11.80	11.80
15	Ángulo 2”, longitud 6 m	2	22.70	45.40
16	Tablero eléctrico, 40x30x20 cm	1	27.50	27.50
17	Braker 3 líneas 30 A	1	32.70	32.70
18	Luces piloto	2	1.85	3.70
19	Pulsadores	2	2.30	4.60
20	Cable sucre	Global		8.90
21	Cable AWG 16	Global		2.80
22	Resistencias tipo cartucho, 220V, potencia 400w, Ø1/2” x 50mm	3	20.02	60.06

Tabla 6.2 Costos de materiales y accesorios (Continuación)

No.	Descripción	Cantidad	Valor unitario	Valor total
23	Cable AWG 12	Global		3.20
24	Interruptor	1	4.30	4.30
25	Pernos m16, UNC, G8.8, L=50 mm	4	1.60	6.40
26	Pernos m12, UNC, G8.8, L=50 mm	4	0.80	3.20
27	Pernos m10, UNF, G8.8, L=34 mm	4	0.30	1.20
28	Prisionero m10, UNF, L=19 mm	2	0.27	0.54
29	Prisionero m6, UNF, L=13 mm	1	0.18	0.18
30	Prisionero m6, UNF, L=25 mm	3	0.24	0.72
31	Material menudo (Tuercas, arandelas planas, arandelas de presión)	Global		5.50
			Subtotal	4.475.59
			IVA 12%	537.07
			Total 2	5.012.66

6.1.1.2.2 Trabajos / Mano de obra

Tabla 6.3 Costos de mano de obra

No.	Descripción	Cantidad	Valor unitario	Valor total
1	Trabajo tornillo extrusor en torno	1	700.00	700.00
2	Trabajo camisas de extrusión en torno	2	250.00	500.00
3	6.1.1.2.3 Perforaciones en camisa de extrusión	1	80.00	80.00
4	Construcción alojamiento de rodamientos	1	400.00	400.00
5	Construcción zona de alimentación	1	350.00	350.00
6	Tapa de ajuste de rodamientos	1	800.00	80.00
7	Construcción portadado	1	150.00	150.0
8	Construcción dado	1	100.00	100.00
9	Construcción patas de máquina	2	60.00	120.00
10	Construcción bastidor	1	150.00	150.00
11	Construcción tolva de alimentación	1	60.00	60.00
12	Trabajo eléctrico	1	30.00	30.00
			Subtotal	2.720.00
			IVA 12%	326.40
			Total 3	3.046.40

TOTAL COSTOS DIRECTOS (USD) 14.459.06

6.1.2 COSTOS INDIRECTOS

6.1.2.1 Misceláneos

Tabla 6.4 Gastos varios

Descripción	Valor total
Copias bibliográficas	60.00
Útiles de oficina	150.00
Movilización, fletes	200.00
Subtotal	410.00
IVA 12%	49.20
Total 4	459.20

TOTAL COSTOS INDIRECTOS (USD) 459.20

6.1.3 RESUMEN DE COSTOS

Tabla 6.5 Resumen de costos

Descripción	Valor total
Costos directos	14.459.06
Costos indirectos	459.20
Imprevistos	200.00
TOTAL GLOBAL	15.118.26

6.2 ANÁLISIS FINANCIERO

El presente proyecto de tesis “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA TIPO EXPELLER PARA LA EXTRACCIÓN DE ACEITE VEGETAL A PARTIR DE LA SEMILLA DE LA JATROPHA CURCAS CON CAPACIDAD DE 200 KILOGRAMOS/HORA PARA LA E.S.P.E - IASA II”, ha sido financiado en su totalidad por la Escuela Politécnica del Ejército en coordinación con la Unidad de Gestión de la Investigación, como parte del proyecto “Planta piloto para la extracción de aceite vegetal a partir de la jatropha curcas”.

La certificación de aprobación de fondos para el proyecto fue emitida en junio del 2009, con el No. 2249 para el proyecto No. 16, con un valor de 20300,00 USD. Ver ANEXO H.

Dicho proyecto a cargo del Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica de la ESPE, tiene como Director y Codirector al Ing. Carlos Naranjo y al Ing. Carlos Suntaxi respectivamente, y como ayudantes de investigación a los Srs. Santiago Gómez V. y Santiago Villegas Z.

El análisis del costo – beneficio de la implementación de la máquina para uso industrial se resume a continuación:

El costo de diseño y construcción de la máquina es de 15.118.26 USD.

La máquina trabajando a un régimen de 16 horas al día en doble turno, obtendría 139 kg de aceite diarios, logrando un total de 3.333 kg al mes; la semilla necesaria para producir esta cantidad de aceite es de 12.343 kg mensuales.

El precio de venta del aceite de jatropha curcas en bruto es de 1.500.00 USD por tonelada métrica.

Un resumen de los costos de operación mensuales de la máquina se presenta a continuación:

Mano de obra:	528.00	USD
Materia prima:	2.116.00	USD
Energía:	150.34	USD
Costos directos (I):	2794.25	USD
Costos indirectos (II):	560.00	USD
Amortización máquina (5 años) (III):	251.97	USD
Costo mensual de operación de la máquina (I+II+III):	3.606.22	USD

Los ingresos por venta del aceite de piñón con el volumen de producción estimado mensualmente llegan a los 4.998.86 USD.

Con los valores de los costos y el precio de venta, se obtiene una utilidad neta de 1.645.75 USD mensuales.

CAPITULO 7

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

1. El diseño y construcción de la máquina se logró obtener mediante todo el material consultado, logrando así concatenar teoría y práctica a fin de cumplir el objetivo principal el cual es extraer aceite vegetal a partir de la *Jatropha curcas*.
2. El proceso de extracción de aceite mediante el uso de la máquina expeller fue el más adecuado, debido a que se extrajo un porcentaje aceptable de líquido, además que el funcionamiento continuo de este artefacto facilita su operación, en comparación con a otras formas de extraer aceites vegetales.
3. La masa extraída de aceite promedio obtenido en las diferentes pruebas fue del 26%, sin embargo en el proceso se obtuvo con un mínimo de contaminación sólida que en masa es del 5%.
4. En el proceso de extracción de aceite por medio del expeller se llegó a procesar hasta 30 kg de semilla por hora, la producción planteada de 200 kg/h no fue posible debido a que en los cálculos se asumió factores propios de otras semillas oleaginosas como es el caso de la soya, los cuales no fueron los indicados para el caso particular de la *Jatropha curcas*, ya que un mínimo en el cambio de estos factores varían en gran magnitud la viscosidad de la semilla a extraer y esto produce que tanto el caudal, la presión de extrusión y la potencia necesaria en el sistema, varíen de manera abrupta, afectando así el diseño total de la máquina.
5. La velocidad del tornillo influye de manera directa en la capacidad de producción, a mayor velocidad existe mayor producción y viceversa; sin embargo al tener un tornillo con velocidad mayor también se requiere incrementar la temperatura de extrusión alrededor del 10% si el incremento es del doble de la velocidad.
6. La potencia real medida en el proceso de extrusión llegó a ser de 6.56 HP, para el cálculo de potencia, se utilizó datos de semillas similares al igual que en el caso de la capacidad de producción, teniendo como resultado un motor de 15

HP, sin embargo estos datos no fueron lo suficientemente adecuados ya que la variabilidad de los datos asumidos influye de manera abrupta en el cálculo de los parámetros.

7. En el desarrollo del presente proyecto se ha puesto en práctica, la enseñanza teórica y práctica, que se ha obtenido durante la formación universitaria, teniendo como principales aplicaciones los conocimientos de diseño de elementos de máquinas, mecánica de fluido, procesos de manufactura, dibujo técnico industrial y mecánica de materiales, entre las más importantes.

7.2 RECOMENDACIONES

1. El uso de máquinas de este tipo puede ayudar al desarrollo de muchas zonas rurales de nuestro país, ya que es una alternativa viable de generación energética, por lo cual es necesario que se siga investigando y aportando ideas al desarrollo de este tipo de tecnologías tanto por instituciones gubernamentales cuanto por la empresa privada.
2. Debido a que el aceite se extrae con una pequeña cantidad de partículas sólidas, se precisa filtrarlo a través de tamices o bombas filtrantes a fin de elevar su calidad.
3. Con los parámetros de velocidad y temperatura dados en el presente proyecto, se pueden extrapolar a fin de poder llegar a mayores capacidades.
4. La inclusión de un variador de frecuencia para poder modificar la velocidad, además de un controlador de temperatura para fijar el calentamiento en la extrusión, son necesarios a fin de poder llegar a un punto de equilibrio entre la capacidad procesada y la temperatura de trabajo, de esta se obtendrá un aceite de calidad.
5. Debido a que la potencia del motor medida en las pruebas registra valores que son del 50% de la potencia nominal del motor adquirido, se sugiere que, en el caso de reproducción de la presente máquina se use un motor apropiado.
6. Con el fin de obtener parámetros certeros sobre el comportamiento de la *jatropha curcas* en procesos de extrusión, se debe realizar estudios particulares a esta semilla a fin de poder diseñar máquinas con mayor volumen de producción.

7. Con el aceite obtenido se deben realizar las respectivas pruebas físicas y químicas con el propósito de determinar la calidad del aceite para su uso como biocombustible.
8. Se recomienda fortalecer la enseñanza universitaria, en temas relacionados a la práctica en taller, para tener un criterio técnico profundo en procesos de planificación y construcción de máquinas.

BIBLIOGRAFÍA

LIBROS

- BAILE. ALTON. Aceite y grasas industriales. Reverté, s.f. pp 422 – 450
- CASTRO, Paula. Opciones para la producción y uso del biodiesel en el Perú. Primera ed. Soluciones Prácticas ITDG. 2007. pp 93 – 97
- ECUADOR, INSTITUTO NACIONAL AUTONOMO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS. Tecnologías para el aprovechamiento del piñón. Boletín técnico No. 136. 2009. pp 1 - 6
- MERCIER, D. LINKO, P. HARPER, JM. Extrusion cooking. s.e, s.f. pp 17 – 38
- KOKINI. TANG HO. KARWE. Food extrusion science and technology. s.e, 1992. pp 140 - 145
- HELDMAN, Dennis. LUND, Daryl. Handbook of food engineering. Board. 1992. pp 621 - 639
- HALL. HOLOWENKO. LAUGHLIN. Diseño de máquinas. MacGraw Hill, 1971. p.147
- GROOVER, Mikell. Fundamentos de manufactura moderna. Primera ed. Prentice Hall. 1196. pp 311 – 320
- SCHEY, John. Procesos de manufactura. 3ra ed. MacGraw Hill. 2002. pp 576 – 580
- SHIGLEY, Joseph. MISCHKE, Charles. Diseño en ingeniería mecánica. 6ta ed. MacGraw Hill. 2002. pp 133 – 135
- NORTON, Robert. Diseño de máquinas. Primera ed. Prentice Hall. 1999. pp 347 – 350

DIRECCIONES DE INTERNET

- <http://www.epn.edu.ec/bio2008/Documentos/Enrique%20Heinemann%20-%20DED.pdf>
- <http://www.epn.edu.ec/bio2008/Documentos/Oswaldo%20Proa%F1o%20-%20EPN.pdf>

- <http://materias.fcyt.umss.edu.bo/tecno-II/PDF/cap-23.pdf>
- http://web.catie.ac.cr/Siad_1/doc_pdf/c6%20arboles%20sistemas%20agricolas.pdf
- http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/tello_c_vr/capitulo3.pdf
- <http://www.skf.com/skf/productcatalogue/jsp/calculation/calculationIndex.jsp?&maincatalogue=1&lang=es>
- http://64.8.120.101/user/data/file/lubricantes/esso/grasas/Esso_RONEX_MP_es.pdf

ANEXO A - ÍNDICES DE FLUJO M Y N

ÍNDICES DE FLUJO M Y N

Table 1 Reported Power Law models [Eq. (2)] for Food Extrudates

Material	m_0	n	Temperature range (°C)	Moisture range (%)	A (K)	B (1/% M_{DB})	Reference
Cooked cereal dough (80% corn grits, 20% oat flour)	78.5	0.51	67–100	25–30	2500	-7.9 ^a	Harper et al., 1971
Pregelatinized corn flour	36.0	0.36	90–150	22–35	4390	-14	Cervone and Harper, 1978
Soy grits	0.79	0.34	35–60	32	3670	—	Remsen and Clark, 1978
Hard wheat dough	1,885	0.41	35–52	27.5–32.5	1800	-6.8	Levine, 1982
Corn grits	28,000	≈0.5	177	13	—	—	Van Zuilichem et al., 1974
	17,000	≈0.5	193	13	—	—	
	7,600	≈0.5	207	13	—	—	
Full-fat soybeans	3,440	0.3	120	15–30	—	—	Fricke et al., 1977
Moist food product	223	0.78	95	35	—	—	Tsao et al., 1978
Pregelatinized corn flour	17,200	0.34	88	32	—	—	Harmann and Harper, 1974
Sausage emulsion	430	0.21	15	63	—	—	Toledo et al., 1977
Semolina flour	20,000	0.50	45	30	—	—	Nazarov et al., 1971
Defatted Soy	110,600	0.05	100	25	—	—	Jao et al., 1978
	15,900	0.40	130	25	—	—	
	671	0.75	160	25	—	—	
	78,400	0.13	100	28	—	—	
	23,100	0.34	130	28	—	—	
	299	0.65	160	28	—	—	
	28,800	0.19	100	35	—	—	
	28,600	0.18	130	35	—	—	
	17,800	0.16	160	35	—	—	
Wheat flour	4,450	0.35	33	43	—	—	Launay and Bure, 1973
Defatted soy dough	1,210	0.49	54	25	—	—	Luxenburg et al., 1985
	868	0.45	54	50	—	—	
	700	0.43	54	75	—	—	
	1,580	0.37	54	85	—	—	
	2,360	0.31	54	100	—	—	
	2,270	0.31	54	110	—	—	

^aWet basis moisture used.

ANEXO B - MEMORIA DE CÁLCULO

MEMORIA DE CÁLCULO

PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DEL TORNILLO

Diámetro del tornillo $D_t := 66 \text{ mm}$

Holgura camisa - tornillo $H_{ct} := 0.5 \text{ mm}$

Altura del hilo del tornillo $H_t := 7 \text{ mm}$

Ancho del hilo del tornillo $b_t := 9 \text{ mm}$

Paso del tornillo $p_t := 22 \text{ mm}$

Longitud del tornillo $L_t := 340 \text{ mm}$

Relación L/D $\frac{L_t}{D_t} = 5.15$ *Extrusor de Corte*
Bajo (5 - 8)

Radio medio del tornillo

$$r_m := \frac{D_t}{2} - \frac{H_t}{2} \quad \text{Ecuación 3.2}$$

$$r_m = 29.5 \text{ mm}$$

Ángulo de hélice del tornillo

$$\theta_t := \text{atan}\left(\frac{p_t}{2\pi \cdot r_m}\right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

$$\theta_t = 6.77^\circ$$

Ángulo del tornillo en radianes

$$\theta_{tr} := \frac{\theta_t \cdot \pi}{180}$$

$$\theta_{tr} = 0.12 \text{ rad}$$

Ancho del canal del tornillo

$$W_t := (\pi \cdot D_t \tan(\theta_{tr}) - b_t) \cdot \cos(\theta_{tr}) \quad \text{Ecuación 3.1}$$

$$W_t = 15.5 \text{ mm}$$

CÁLCULO DE LA VELOCIDAD

Flujo másico requerido en libras/hora

$$R := 440 \frac{\text{lb}}{\text{h}}$$

Diámetro del tornillo en pulgadas

$$D_{\text{tp}} := \frac{D_t}{25.4} = 2.6 \text{ plg}$$

Altura del hilo en pulgadas

$$H_{\text{tp}} := \frac{H_t}{25.4} = 0.28 \text{ plg}$$

Gravedad específica de la *jatropha curcas*

$$g_j := 0.85$$

Velocidad de rotación del tornillo

$$N_{\text{rpm}} := \frac{R}{2.3 \cdot D_{\text{tp}}^2 \cdot H_{\text{tp}} \cdot g_j}$$

Ecuación 3.15

$$N_{\text{rpm}} = 120.95 \text{ rpm}$$

Velocidad de giro del motoreductor pendular

$$N := 125 \text{ rpm}$$

Velocidad de rotación del motor en radianes/segundo

$$N_{\text{rad}} := \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot N$$

$$N_{\text{rad}} = 13.09 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

CÁLCULO DE FLUJO

Hand Book of Food Engineering P. 628

Razón de corte

$$\gamma_{app} := \frac{\pi \cdot N_{rad} \cdot D_t}{H_t} \quad \text{Ecuación 3.16}$$

$$\gamma_{app} = 387.73 \frac{1}{s}$$

En tablas se indican los índices de flujo existentes para varios valores de la soya desgrasada.

Factor n para soya desgrasada

$$n := 0.65$$

Factor m para soya desgrasada

$$m := 299$$

Viscosidad aparente

$$\mu_{app} := m \cdot \gamma_{app}^{n-1} \quad \text{Ecuación 3.17}$$

Viscosidad Escogida

$$\mu_{app} = 37.13 \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

Caudal másico a procesar

$$Q_{kg} := 200 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Densidad de la jatropha curcas

$$\rho_j := 850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Caudal volumétrico deseado

$$Q_1 := \frac{Q_{kg} \cdot 10^9}{3600 \cdot \rho_j}$$

$$Q_1 = 6.54 \times 10^4 \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}$$

Coefficiente para gradiente de presión α

$$\alpha := 0.5\pi^2 \cdot D_t^2 \cdot N_{\text{rad}}$$

$$\alpha = 2.81 \times 10^5 \frac{\text{mm}^2}{\text{s}}$$

Coefficiente para gradiente de presión β

$$\beta := \frac{\pi \cdot D_t}{12}$$

$$\beta = 17.28 \text{ mm}$$

Gradiente de presión en la extrusión en longitud efectiva del tornillo:

$$\Delta P := \int_0^{318} \frac{[\alpha \cdot (H_t) \cdot \sin(\theta_{\text{tr}}) \cdot \cos(\theta_{\text{tr}}) - Q_1] \cdot \mu_{\text{app}}}{\beta \cdot (H_t)^3 \cdot \sin(\theta_{\text{tr}}) \cdot \sin(\theta_{\text{tr}})} dx \quad \text{Ecuación 3.18}$$

$$\Delta P := 23.7 \text{ MPa}$$

Presión de trabajo escogida

$$P := 23 \text{ MPa}$$

Presión máxima en extrusión:

$$P_{\text{máx}} := \frac{6\pi \cdot D_t \cdot N_{\text{rad}} \cdot L_t \cdot \mu_{\text{app}} \cdot \cot(\theta_{\text{tr}})}{H_t^2} \quad \text{Ecuación 3.19}$$

$$P_{\text{máx}} = 3.53 \times 10^7 \text{ Pa}$$

Caudal volumétrico calculado

Hand Book of Food Engineering P. 644

$$Q := Q_d - Q_p$$

$$Q := \frac{\pi D_t N_{\text{rad}} \cos(\theta_{\text{tr}}) \cdot W_t \cdot H_t}{2} - \frac{W_t \cdot H_t^3 \cdot \sin(\theta_{\text{tr}}) \cdot P}{12 \cdot \mu_{\text{app}} \cdot 10^{-6} \cdot L_t}$$

$$Q = 5.11 \times 10^4 \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}$$

Caudal másico calculado

$$Q_{kg1} := \frac{Q \cdot 3600 \cdot \rho_j}{10^9}$$

$$Q_{kg1} = 156.29 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Para corregir la fórmula del caudal volumétrico se utiliza los factores f_d y f_p que resultan de la relación H_t/W_t . (Ver figura 3.7)

$$\frac{H_t}{W_t} = 0.45$$

Factor según Levine para arrastre:

$$F_d := 0.85$$

Factor según Levine para presión:

$$F_p := 0.60$$

Ecuación general corregida del caudal volumétrico

$$Q := \frac{\pi D_t^3 N_{\text{rad}} \cos(\theta_{\text{tr}}) \cdot W_t \cdot H_t}{2} \cdot F_d - \frac{W_t \cdot H_t^3 \cdot \sin(\theta_{\text{tr}}) \cdot P}{12 \cdot \mu_{\text{app}} \cdot 10^{-6} \cdot L_t} \cdot F_p \quad \text{Ecuación 3.14}$$

$$Q = 6.72 \times 10^4 \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}$$

Caudal másico teórico corregido

$$Q_{tc} := \frac{Q \cdot 3600 \cdot \rho_j}{10^9}$$

$$Q_{tc} = 205.64 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Por lo tanto con las condiciones tanto geométricas cuanto de operación, el caudal másico teórico es igual al caudal másico deseado de 200 kg/h

DETERMINACIÓN DE LA POTENCIA

Extrusion Cooking P. 23

Flujo de arrastre

$$Q_d := \frac{\pi D_t \cdot N_{rad} \cdot \cos(\theta_{tr}) \cdot W_t \cdot H_t}{2} \cdot F_d$$

$$Q_d = 1.24 \times 10^5 \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}$$

Flujo de presión

$$Q_p := \frac{W_t \cdot H_t^3 \cdot \sin(\theta_{tr}) \cdot P}{12 \cdot \mu_{app} \cdot 10^{-6} \cdot L_t} \cdot F_p$$

$$Q_p = 5.71 \times 10^4 \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}$$

Radio de aceleración

$$a := \frac{Q_p}{Q_d}$$

Ecuación 3.21

$$a = 0.46$$

Potencia del motor necesaria para el bombeo

$$E_p := \frac{3 \cdot \mu_{app} \cdot \left(\pi \cdot N_{rad} \cdot \frac{D_t}{10^3} \right)^2 \cdot \frac{W_t}{10^3} \cdot \frac{L_t}{10^3}}{\frac{H_t}{10^3} \cdot \sin(\theta_{tr})} \cdot [a \cdot (1 - a) \cdot \cos(\theta_{tr}) \cdot \cos(\theta_{tr})]$$

Ecuación 3.23

$$E_p = 1.28 \times 10^3 \text{ w}$$

Eficiencia de bombeo

$$\varepsilon := \frac{3 \cdot a \cdot (1 - a)}{1 + 3 \cdot a + 4 \cdot (\tan(\theta_{tr}))^2} \cdot 100$$

Ecuación 3.27

$$\varepsilon = 30.61 \%$$

Potencia del motor eléctrico requerido

$$E := \frac{\mu_{\text{app}} \cdot \left(\pi \cdot N_{\text{rad}} \cdot \frac{D_t}{10^3} \right)^2 \cdot \frac{W_t}{10^3} \cdot \frac{L_t}{10^3}}{\frac{H_t}{10^3} \cdot \sin(\theta_{\text{tr}})} \cdot \left[(\cos(\theta_{\text{tr}}))^2 + 4 \cdot (\sin(\theta_{\text{tr}}))^2 + 3 \cdot a \cdot (\cos(\theta_{\text{tr}}))^2 \right]$$

Ecuación 3.26

$$E = 4.19 \times 10^3 \text{ w}$$

$$E_{\text{hp}} := \frac{E}{746} = 5.62 \text{ hp}$$

Potencia perdida por transferencia de calor

$$E_c := E - E_p = 2.91 \times 10^3 \text{ w} \quad \text{Ecuación 3.30}$$

Según el libro de Principles of Polymer Processing la fórmula necesaria para el cálculo de potencia es:

$$P_w := \frac{\mu_{\text{app}} \cdot \left(\pi \cdot N_{\text{rad}} \cdot \frac{D_t}{10^3} \right)^2 \cdot \frac{W_t}{10^3} \cdot \frac{L_t}{10^3}}{\frac{H_t}{10^3} \cdot \sin(\theta_{\text{tr}})} \cdot \left[4 - 3 \left(\cos(\theta_{\text{tr}}) \right)^2 \cdot \left(\frac{Q}{Q_d} \right) \right]$$

$$P_w = 4.19 \times 10^3 \text{ w}$$

$$P_{\text{whp}} := \frac{P_w}{746} = 5.62 \text{ hp}$$

Según la misma bibliografía, la potencia mínima será alcanzada cuando $Q = Q_d$ y la potencia máxima cuando $Q=0$, por lo tanto:

Potencia mínima del motor

Principles of Polymer Processing P.454

$$E_{\text{mín}} := \frac{\mu_{\text{app}} \cdot \left(\pi \cdot N_{\text{rad}} \cdot \frac{D_t}{10^3} \right)^2 \cdot \frac{W_t}{10^3} \cdot \frac{L_t}{10^3}}{\frac{H_t}{10^3} \cdot \sin(\theta_{\text{tr}})} \cdot \left[4 - 3 \left(\cos(\theta_{\text{tr}}) \right)^2 \right]$$

Ecuación 3.28

$$E_{\text{mín}} = 1.82 \times 10^3 \text{ w}$$

Potencia máxima del motor

$$E_{\text{máx}} := \frac{\mu_{\text{app}} \cdot \left(\pi \cdot N_{\text{rad}} \cdot \frac{D_t}{10^3} \right)^2 \cdot \frac{W_t}{10^3} \cdot \frac{L_t}{10^3}}{\frac{H_t}{10^3} \cdot \sin(\theta_{\text{tr}})} \quad (4)$$

Ecuación 3.29

$$E_{\text{máx}} = 6.99 \times 10^3 \text{ w}$$

CÁLCULOS DE FLUJO A TRAVÉS DEL DADO

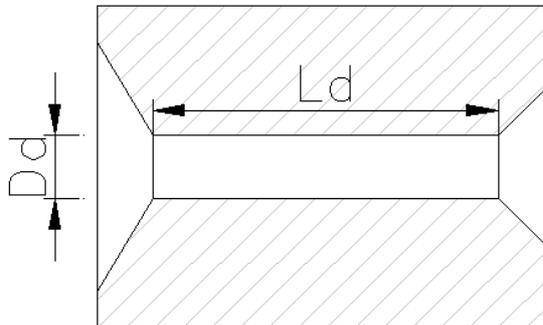
Dimensiones generales del dado:

Diámetro del dado:

$$D_d := 20 \text{ mm}$$

Longitud de la abertura del dado:

$$L_d := 8 \text{ mm}$$



Debido a que en el dado el material triturado está extruido con un mínimo de aceite, la viscosidad de éste aumentará de 3 a 6 veces con respecto a la que existía en el proceso de extrusión.

Viscosidad de la función:

$$\mu_d := 6\mu_{\text{app}} = 222.76 \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

Cálculo del factor de forma para el dado:

Factor de forma del dado

$$k_s := \frac{\pi \cdot \left(\frac{D_d}{1000} \right)^4}{128 \cdot \mu_d \cdot \frac{L_d}{1000}} \quad \text{Ecuación 3.31}$$

$$k_s = 8.61 \times 10^{-12} \frac{\text{m}^5}{\text{N} \cdot \text{s}}$$

Flujo de arrastre

$$Q = 6.72 \times 10^4 \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}$$

Caudal máximo

$$Q_{\text{máx}} := \frac{Q}{1000^3} = 6.72 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Cálculo del punto de operación del extrusor:

$$Q_x := k_s \cdot P_e \quad \text{Ecuación 3.32}$$

$$Q_x := Q_{\text{máx}} - \frac{Q_{\text{máx}}}{P_{\text{máx}}} \cdot P_e \quad \text{Ecuación 3.33}$$

Presión de operación

$$P_e := \frac{Q_{\text{máx}}}{k_s + \frac{Q_{\text{máx}}}{P_{\text{máx}}}} \quad \text{Ecuación 3.34}$$

$$P_e = 6.39 \times 10^6 \text{ Pa}$$

Caudal de operación del extrusor

$$Q_x := k_s \cdot P_e$$

$$Q_x = 5.5 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$Q_x \cdot \rho_j \cdot 3600 = 168.43 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

DISEÑO DE LOS HILOS DEL TORNILLO

Se calcula considerando que la rosca, es una viga corta en voladizo proyectada desde el núcleo; así:

Área de la rosca que soporta la carga axial.

$$A_t := \frac{\pi}{4} \left[D_t^2 - (D_t - 2 \cdot H_t)^2 \right]$$

$$A_t = 1.3 \times 10^3 \text{ mm}^2$$

Fuerza axial sobre el hilo del tornillo.

$$W_x := P \cdot A_t \quad \text{Ecuación 3.35}$$

$$W_x = 2.98 \times 10^4 \text{ N}$$

Con estas hipótesis el esfuerzo de flexión en la base al número de roscas n_h sometidas a la carga (die zone) es:

Diseño de Máquinas Shawn P. 147

$$n_h := 1$$

$$S_b := \frac{3 \cdot W_x \cdot H_t}{2 \cdot \pi \cdot n_h \cdot r_m \cdot b_t^2} \quad \text{Ecuación 3.36}$$

$$S_b = 41.74 \text{ MPa}$$

El esfuerzo cortante transversal medio es:

$$S_s := \frac{W_x}{2 \cdot \pi \cdot n_h \cdot r_m \cdot b_t} \quad \text{Ecuación 3.37}$$

$$S_s = 17.89 \text{ MPa}$$

Esfuerzo equivalente en el hilo utilizando la teoría del esfuerzo cortante máximo

$$\sigma_{eq_h} := \sqrt{(S_b^2 + 3 \cdot S_s^2)}$$

$$\sigma_{eq_h} = 51.98 \text{ MPa} \quad \text{Ecuación 3.38}$$

$$S_{yt} := 340 \text{ MPa}$$

Factor de seguridad estático

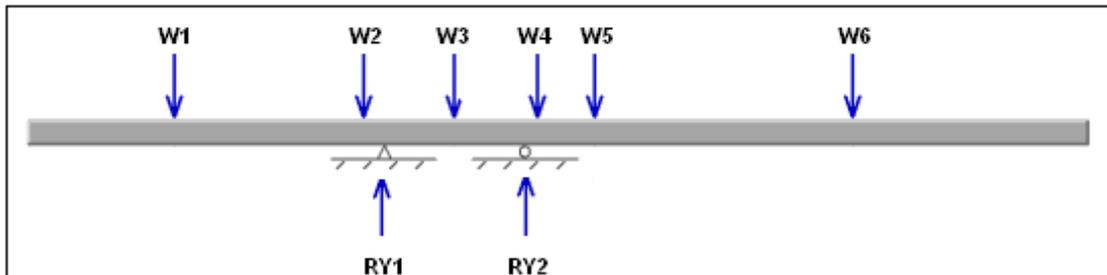
$$FS_h := \frac{S_{yt}}{\sigma_{eq_h}} \quad \text{Ecuación 3.39}$$

$$FS_h = 6.54$$

DISEÑO ESTÁTICO DE LA FLECHA DEL TORNILLO

La flecha está sometida a las siguientes fuerzas, para lo cual se usará un diagrama de cuerpo libre:

DIBUJO D.C.L



$d_{\text{int.rod1}} := 70$	mm	Diámetro interno del rodamiento 1
$d_{\text{int.rod2}} := 70$	mm	Diámetro interno del rodamiento 2
$L_{f,1} := 210$	mm	Longitud de flecha sección 1
$L_{f,2} := 63$	mm	Longitud de flecha sección 2
$L_{f,3} := 70$	mm	Longitud de flecha sección 3
$L_{f,4} := 50$	mm	Longitud de flecha sección 4
$L_{f,5} := 33$	mm	Longitud de flecha sección 5
$L_t = 340$	mm	Longitud del tornillo

$$\delta_{\text{acero}} := 7.8 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Kg}}{\text{mm}^3}$$

Densidad del acero

Peso sección 1:

$$w_1 := \left(\pi \cdot \frac{50^2}{4} \cdot L_{f.1} \right) \cdot \delta_{\text{acero}} \cdot 9.8$$

$$w_1 = 31.52 \text{ N}$$

Peso sección 2:

$$w_2 := \left(\pi \cdot \frac{d_{\text{int.rod1}}^2}{4} \cdot L_{f.2} \right) \cdot \delta_{\text{acero}} \cdot 9.8$$

$$w_2 = 18.53 \text{ N}$$

Peso sección 3:

$$w_3 := \left(\pi \cdot \frac{75^2}{4} \cdot L_{f.3} \right) \cdot \delta_{\text{acero}} \cdot 9.8$$

$$w_3 = 23.64 \text{ N}$$

Peso sección 4:

$$w_4 := \left(\pi \cdot \frac{d_{\text{int.rod2}}^2}{4} \cdot L_{f.4} \right) \cdot \delta_{\text{acero}} \cdot 9.8$$

$$w_4 = 14.71 \text{ N}$$

Peso sección 5:

$$w_5 := \left(\pi \cdot \frac{66^2}{4} \cdot L_{f.5} \right) \cdot \delta_{\text{acero}} \cdot 9.8$$

$$w_5 = 8.63 \text{ N}$$

Peso del tornillo:

$$w_{\text{tornillo}} := \left(\pi \cdot \frac{66^2}{4} \cdot L_t - 8 \cdot \pi^2 \cdot 7^2 \cdot 29.5 \right) \cdot \delta_{\text{acero}} \cdot 9.8$$

$$w_{\text{tornillo}} = 80.19 \text{ N}$$

DIAGRAMAS DE FUERZA CORTANTE Y MOMENTO FLECTOR

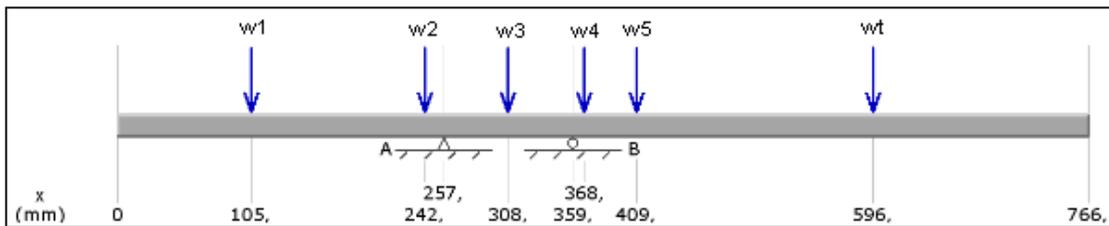


DIAGRAMA DE FUERZA CORTANTE

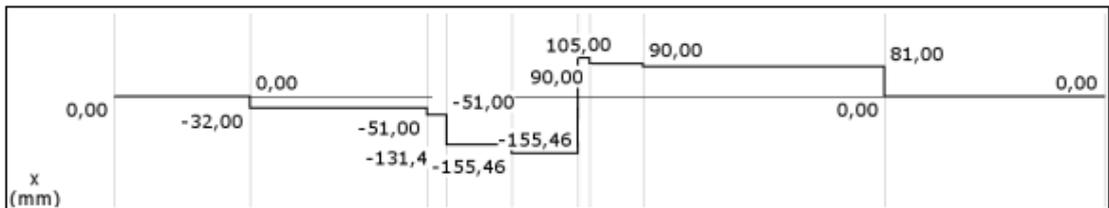
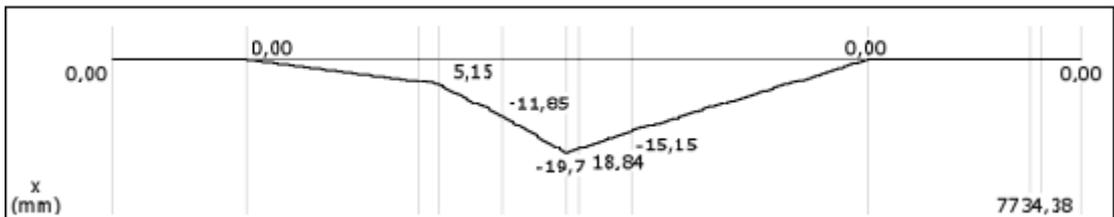


DIAGRAMA DE MOMENTO FLECTOR



Momento flector máximo en la flecha

$$M_{\text{máx}_t} := 19.7 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Cálculo del factor de seguridad de la flecha por análisis estático:

Diámetro crítico en la flecha

$$D_{cr} := 70 \text{ mm}$$

Esfuerzo flector máximo

$$\sigma_t := \frac{32 \cdot M_{\max_t}}{\pi \cdot \left(\frac{D_{cr}}{1000} \right)^3} \quad \text{Ecuación 3.40}$$

$$\sigma_t = 5.85 \times 10^5 \text{ Pa}$$

Esfuerzo de compresión, debido a la presión de trabajo

$$\sigma_c := P \cdot 10^6 \quad \text{Ecuación 3.41}$$

$$\sigma_c = 2.3 \times 10^7 \text{ Pa}$$

Esfuerzo máximo

$$\sigma_{\max_t} := \sigma_t + \sigma_c \quad \text{Ecuación 3.42}$$

$$\sigma_{\max_t} = 2.36 \times 10^7 \text{ Pa}$$

Para el cálculo del torque se necesita el valor real de la potencia generada por el motor comercial, el cual es de 15 hp. Además se debe considerar las pérdidas por instalaciones eléctricas y las generadas por el reductor, quedando la potencia real así:

Factor de servicio del motor

$$FS_E := 0.89$$

Potencia real del motor

$$E := 15.746 \text{ w}$$

Torque en la flecha

$$T := \frac{E \cdot FS_E}{N_{rad}} \quad \text{Ecuación 3.43}$$

$$T = 760.82 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Esfuerzo cortante máximo

$$\tau_{\text{máx}_t} := \frac{16 \cdot T}{\pi \cdot \left(\frac{D_{cr}}{1000} \right)^3} \quad \text{Ecuación 3.44}$$

$$\tau_{\text{máx}_t} = 1.13 \times 10^7 \text{ Pa}$$

Teoría de la energía de distorsión máxima:

Esfuerzo equivalente según la teoría de la energía de la distorsión

$$\sigma_{eq_t} := \sqrt{\left(\sigma_{\text{máx}_t}^2 + 3 \cdot \tau_{\text{máx}_t}^2 \right)} \quad \text{Ecuación 3.45}$$

$$\sigma_{eq_t} = 3.06 \times 10^7 \text{ Pa}$$

Resistencia a la fluencia, Acero V945

Manual de Aceros Especiales Böhler 2008

$$S_{y_t} := 340 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

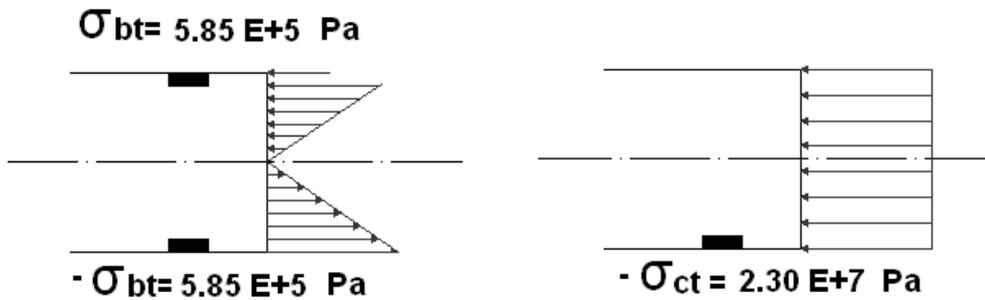
Factor de seguridad estático

$$FS_{Et} := \frac{S_{y_t}}{\sigma_{eq_t}} \quad \text{Ecuación 3.46}$$

$$FS_{Et} = 11.09$$

DISEÑO A FATIGA DE LA FLECHA DEL TORNILLO

Se hace el análisis de carga de la flecha para demostrar que se encuentra en compresión pura.



Esfuerzo máximo

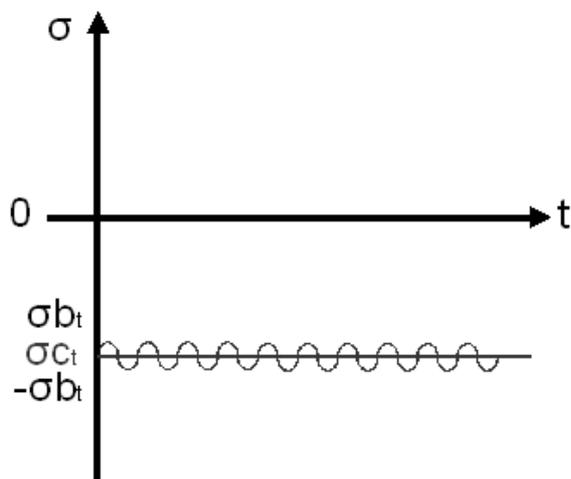
$$\sigma_{\text{máx}} := \sigma_{bt} - \sigma_{ct}$$

$$\sigma_{\text{máx}} = -2.24 \times 10^7 \text{ Pa}$$

Esfuerzo mínimo

$$\sigma_{\text{mín}} := -\sigma_{bt} - \sigma_{ct}$$

$$\sigma_{\text{mín}} = -2.36 \times 10^7 \text{ Pa}$$



Esfuerzo medio

$$\sigma_m := \frac{\sigma_{\text{máx}} + \sigma_{\text{mín}}}{2}$$

$$\sigma_m = -2.3 \times 10^7 \text{ Pa}$$

Esfuerzo alternante

$$\sigma_a := \frac{\sigma_{\text{máx}} - \sigma_{\text{mín}}}{2}$$

$$\sigma_a = 5.85 \times 10^5 \text{ Pa}$$

Ya que la flecha se encuentra en compresión pura no existe formación de grietas, es por lo que el diseño a fatiga no será analizado

DISEÑO DE CHAVETA PARA LA SALIDA DEL REDUCTOR

Radio del tornillo en zona de acople con el reductor

$$r_t := 25 \text{ mm}$$

Resistencia a la fluencia, Acero AISI 1010

$$S_{y_{ch}} := 180 \text{ MPa}$$

Ancho de la chaveta

$$t_{ch} := 14 \text{ mm}$$

Factor de seguridad de la chaveta propuesto

$$FS_{ch} := 4$$

Velocidad de Salida del Motor

$$n_m := 3550 \text{ rpm}$$

Relación de Transmisión del Reductor

$$i_R := 20.23$$

Velocidad de salida en el reductor

$$n_r := \frac{n_m}{i_R}$$

$$n_r = 175.48 \text{ rpm}$$

Torque del Motor

Shigley, P.518

$$T_{ch} := \frac{E \cdot 9550}{n_r}$$

Ecuación 3.43

$$T_{ch} = 6.09 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Fuerza en la superficie del tornillo

$$F_t := \frac{T_{ch}}{r_t}$$

Ecuación 3.47

$$F_t = 2.44 \times 10^4 \text{ N}$$

Resistencia al cortante mediante teoría de la energía de la distorsión

$$S_{sy_{ch}} := 0.577 \cdot S_{y_{ch}}$$

Ecuación 3.48

$$S_{sy_{ch}} = 103.86 \text{ MPa}$$

Longitud de la chaveta al cortante

$$L_{chc} := \frac{F_t \cdot F_{S_{ch}}}{t_{ch} \cdot S_{sy_{ch}}}$$

Ecuación 3.49

$$L_{chc} = 67.01 \text{ mm}$$

Longitud de la chaveta al aplastamiento

$$L_{cha} := \frac{2F_t \cdot FS_{ch}}{t_{ch} \cdot S_{ych}} \quad \text{Ecuación 3.50}$$

$$L_{cha} = 77.33 \text{ mm}$$

DISEÑO DE LAS CAMISAS

Espesor de la camisa

$$e_c := 18.5 \text{ mm}$$

Diámetro de la camisa exterior

$$D_c := 104 \text{ mm}$$

Radio interno de la camisa

$$r_{ic} := \frac{D_c - 2 \cdot e_c}{2}$$

$$r_{ic} = 33.5 \text{ mm}$$

Relación r/e

Shigley, P. 133

$$\frac{r_{ic}}{e_c} = 1.81$$

Debido a que la relación $r/e < 10$, se considera que el barril para la extrusora, es un cilindro de pared gruesa, por lo tanto se utilizan las siguientes ecuaciones:

Radio externo de la camisa

$$r_o := r_{ic} + e_c$$

$$r_o = 52 \text{ mm}$$

Presión interna en la camisa

$$P_i := P$$

$$P_i = 23 \text{ Mpa}$$

Esfuerzo tangencial

$$\sigma_t := \frac{r_{ic}^2 \cdot Pi}{r_o^2 - r_{ic}^2} \cdot \left(1 + \frac{r_o^2}{r_{ic}^2} \right) \quad \text{Ecuación 3.53}$$

$$\sigma_t = 55.64 \text{ MPa}$$

Esfuerzo radial

$$\sigma_r := \frac{r_{ic}^2 \cdot Pi}{r_o^2 - r_{ic}^2} \cdot \left(1 - \frac{r_o^2}{r_{ic}^2} \right) \quad \text{Ecuación 3.54}$$

$$\sigma_r = -23 \text{ Mpa}$$

Esfuerzo longitudinal

$$\sigma_l := \frac{Pi \cdot r_{ic}^2}{r_o^2 - r_{ic}^2} \quad \text{Ecuación 3.55}$$

$$\sigma_l = 16.32 \text{ MPa}$$

Debido a que el flujo en el interior del barril es constante, el análisis a fatiga no es requerido, por lo tanto, solo se calcula el factor de seguridad en base a la teoría de distorsión máxima, así:

Esfuerzo equivalente

$$\sigma' := \sqrt{\sigma_t^2 + \sigma_l^2 + \sigma_r^2 - \sigma_t \cdot \sigma_r - \sigma_l \cdot \sigma_r - \sigma_l \cdot \sigma_t} \quad \text{Ecuación 3.56}$$

$$\sigma' = 68.1 \text{ MPa}$$

Resistencia a la fluencia de la barra perforada de Acero SKF 280

$$S_{yC} := 440 \text{ MPa} \quad \text{Catálogo Ivan Bohman, P.36}$$

Factor de seguridad de pared de las camisas

$$FS_C := \frac{S_{yC}}{\sigma} \quad \text{Ecuación 3.57}$$

$$FS_C = 6.46$$

DISEÑO DE SUJETADORES ROSCADOS DE LAS CAMISAS Y PORTA DADO

Esfuerzo cortante en los sujetadores roscados

Diámetro de raíz del sujetador roscado

$$D_r := 84.32 \quad \text{mm}$$

Resistencia al cortante de las camisas

$$S_{syC} := 0.577 \cdot S_{yC}$$

$$S_{syC} = 253.88 \quad \text{MPa}$$

Paso del sujetador roscado

$$p_r := 3 \quad \text{mm}$$

Fuerza de corte de la rosca

$$F_r := \frac{\pi}{4} \cdot (D_t^2 - D_d^2) \cdot P \quad \text{Ecuación 3.60}$$

$$F_r = 7.82 \times 10^4 \quad \text{N}$$

Factor de porcentaje del paso ocupado por metal en el diámetro menor para rosca macho

$$w_i := 0.80 \quad \text{Norton P.907}$$

Área de barrido de la rosca macho:

$$A_{sm} := 3 \cdot \pi \cdot D_r \cdot w_i \cdot p_r \quad \text{Ecuación 3.58}$$

$$A_{sm} = 1.91 \times 10^3 \text{ mm}^2$$

Esfuerzo cortante para el barrido del sujetador roscado macho

$$\tau_{sm} := \frac{F_r}{A_{sm}} \quad \text{Ecuación 3.61}$$

$$\tau_{sm} = 41.02 \text{ MPa}$$

Factor de seguridad a cortante para los sujetadores roscados machos de las camisas

$$FS_{srcm} := \frac{S_{sy_c}}{\tau_{sm}} \quad \text{Ecuación 3.62}$$

$$FS_{srcm} = 6.19$$

Diámetro mayor del sujetador roscado

$$D := 88 \text{ mm}$$

Factor de porcentaje del paso ocupado por metal en el diámetro mayor para la rosca hembra

$$w_o := 0.88 \quad \text{Norton P.907}$$

Área del cortante A_s de la rosca hembra

$$A_{sh} := 3 \cdot \pi \cdot D \cdot w_o \cdot p_r \quad \text{Ecuación 3.59}$$

$$A_{sh} = 2.19 \times 10^3 \text{ mm}^2$$

Esfuerzo cortante para el barrido del sujetador roscado hembra

$$\tau_{sh} := \frac{F_r}{A_{sh}} \quad \text{Ecuación 3.61}$$

$$\tau_{sh} = 35.73 \text{ MPa}$$

Factor de seguridad a cortante para los sujetadores roscados hembra de las camisas

$$FS_{srch} := \frac{Ssyc}{\tau_{sh}} \quad \text{Ecuación 3.62}$$

$$FS_{srch} = 7.11$$

Esfuerzo de aplastamiento en los sujetadores roscados

Longitud de sujeción entre macho y hembra

$$H := 16 \text{ mm}$$

Área de aplastamiento en los sujetadores roscados

$$A_a := \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - D_r^2) \cdot \frac{H}{p_r} \quad \text{Ecuación 3.63}$$

$$A_a = 2.66 \times 10^3 \text{ mm}^2$$

Esfuerzo de aplastamiento en la rosca de los sujetadores roscados

$$\sigma a_r := \frac{F_r}{A_a} \quad \text{Ecuación 3.64}$$

$$\sigma a_r = 29.45 \text{ MPa}$$

Factor de seguridad de aplastamiento para los sujetadores roscados de las camisas

$$FS_{\text{srac}} := \frac{S_{y_c}}{\sigma_{a_r}} \quad \text{Ecuación 3.65}$$

$$FS_{\text{srac}} = 14.94$$

CÁLCULO DEL DADO

Shigley, P. 133

Espesor del dado

$$e_d := 6 \text{ mm}$$

Radio interno del dado

$$r_{\text{intd}} := 10 \text{ mm}$$

Relación r/e

$$\frac{r_{\text{intd}}}{e_d} = 1.67$$

Debido a que la relación $r/e < 10$, se considera que el dado para la extrusora es un cilindro de pared gruesa, por lo tanto se utilizan las siguientes ecuaciones:

Resistencia mínima de fluencia AISI 1045

Catálogo Ivan Bohman, P.25

$$S_{y_d} := 313 \text{ MPa}$$

Dimensiones del dado

$$r_i := r_{\text{intd}} = 10 \text{ mm}$$

$$r_o := r_{\text{intd}} + e_d$$

$$r_o = 16 \text{ mm}$$

Presión interna en el dado

$$P_{\text{int}} := P = 23 \text{ Mpa}$$

Esfuerzo tangencial

$$\sigma_{td} := \frac{r_i^2 \cdot P_{int}}{r_o^2 - r_i^2} \left(1 + \frac{r_o^2}{r_i^2} \right) \quad \text{Ecuación 3.53}$$

$$\sigma_{td} = 52.49 \text{ MPa}$$

Esfuerzo radial

$$\sigma_{rd} := \frac{r_i^2 \cdot P_{int}}{r_o^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{r_o^2}{r_i^2} \right) \quad \text{Ecuación 3.54}$$

$$\sigma_{rd} = -23 \text{ MPa}$$

Esfuerzo longitudinal

$$\sigma_{lr} := \frac{P_{int} \cdot r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \quad \text{Ecuación 3.55}$$

$$\sigma_{lr} = 14.74 \text{ MPa}$$

Debido a que el flujo en el interior del dado es constante, el análisis a fatiga no es requerido por lo tanto solo, se calculará el factor de seguridad, en base a la teoría de distorsión máxima, así:

Esfuerzo Equivalente en la sección crítica del dado

$$\sigma' := \sqrt{\sigma_t^2 + \sigma_l^2 + \sigma_r^2 - \sigma_t \cdot \sigma_r - \sigma_l \cdot \sigma_r - \sigma_l \cdot \sigma_t}$$

$$\sigma' = 68.1 \text{ MPa} \quad \text{Ecuación 3.56}$$

Factor de Seguridad en la sección crítica del dado

$$FS_d := \frac{S_{y_d}}{\sigma'} = 4.6 \quad \text{Ecuación 3.57}$$

$$FS_d = 4.6$$

DISEÑO DE SUJETADORES ROSCADOS ENTRE EL DADO Y PORTADADO

Esfuerzo cortante en los sujetadores roscados

Diámetro de raíz del sujetador roscado dado

$$D_{rd} := 32.32 \text{ mm}$$

Resistencia al cortante dado - portadado

$$S_{sy_d} := 0.577 \cdot S_{y_d}$$

$$S_{sy_d} = 180.6 \text{ MPa}$$

Paso de la rosca

$$p_{rd} := 3 \text{ mm}$$

Fuerza de corte de la rosca dado - portadado

$$F_{rd} := \frac{\pi}{4} \cdot (34^2 - 21^2) \cdot P \quad \text{Ecuación 3.60}$$

$$F_{rd} = 1.29 \times 10^4 \text{ N}$$

Factor de porcentaje del paso ocupado por metal en el diámetro menor para rosca macho

$$w_{id} := 0.80 \quad \text{Norton P.907}$$

Área de barrido de la rosca macho:

$$A_{sdm} := 3 \cdot \pi \cdot D_{rd} \cdot w_{id} \cdot p_{rd} \quad \text{Ecuación 3.58}$$

$$A_{sdm} = 731.06 \text{ mm}^2$$

Esfuerzo cortante para el barrido del sujetador roscado macho

$$\tau_{sdm} := \frac{F_{rd}}{A_{sdm}} \quad \text{Ecuación 3.61}$$

$$\tau_{sdm} = 17.67 \text{ MPa}$$

Factor de seguridad a cortante para los sujetadores roscados machos del dado

$$FS_{srdm} := \frac{Ssy_d}{\tau_{sdm}} \quad \text{Ecuación 3.62}$$

$$FS_{srdm} = 10.22$$

Diámetro mayor del sujetador roscado

$$D_{md} := 36 \text{ mm}$$

Factor de porcentaje del paso ocupado por metal en el diámetro mayor para la rosca hembra

$$w_{od} := 0.88 \quad \text{Norton P.907}$$

Área del cortante de la rosca hembra

$$A_{sdh} := 3 \cdot \pi \cdot D_{md} \cdot w_{od} \cdot P_{rd} \quad \text{Ecuación 3.59}$$

$$A_{sdh} = 895.73$$

Esfuerzo cortante para el barrido del sujetador roscado hembra

$$\tau_{sdh} := \frac{F_{rd}}{A_{sdh}} \quad \text{Ecuación 3.61}$$

$$\tau_{sdh} = 14.42 \text{ MPa}$$

Factor de seguridad a cortante para los sujetadores roscados hembra de las camisas

$$FS_{srdh} := \frac{Ssy_d}{\tau_{sdh}} \quad \text{Ecuación 3.62}$$

$$FS_{srdh} = 12.52$$

Esfuerzo al aplastamiento en los sujetadores roscados

Longitud de sujeción entre macho y hembra

$$H_d := 27 \text{ mm}$$

Área de aplastamiento en los sujetadores roscados dado - portadado

$$A_{ad} := \frac{\pi}{4} \cdot (D_{md}^2 - D_{rd}^2) \cdot \frac{H_d}{p_{rd}} \quad \text{Ecuación 3.63}$$

$$A_{ad} = 1.78 \times 10^3 \text{ mm}^2$$

Esfuerzo de aplastamiento en la rosca de los sujetadores roscados

$$\sigma_{a_{rd}} := \frac{F_{rd}}{A_{ad}} \quad \text{Ecuación 3.64}$$

$$\sigma_{a_{rd}} = 7.27 \text{ MPa}$$

Factor de seguridad de aplastamiento para los sujetadores roscados de las camisas

$$FS_{srad} := \frac{S_{yd}}{\sigma_{a_{rd}}} \quad \text{Ecuación 3.65}$$

$$FS_{srad} = 43.07$$

ANEXO C - SELECCIÓN DE RODAMIENTOS

SELECCIÓN DE RODAMIENTOS

Para el cálculo de la vida útil de los rodamientos se ha usado el programa en línea que ofrece el fabricante, esto se debe a que SKF tiene sus propios factores de vida de los componentes que fabrica.

De esta manera se presenta el cálculo en base a los requerimientos propios del expeller y los parámetros de entrada que el programa necesita.

En la siguiente gráfica se aprecia que los parámetros a introducir son las cargas radiales y axiales que los rodamientos soportarán en el momento de estar en operación.

Para la fuerza radial se ha usado el valor obtenido del diagrama de cuerpo libre del capítulo 3; este valor es de 160 N.

Para la fuerza axial se ha tomado la fuerza horizontal generada en los dientes del tornillo en el momento alcanzar la presión de trabajo; este valor es de 29.800 N.

SKF

[Datos de los productos](#) [Imprimir](#) [?](#) [Cálculos](#) [Cerrar](#)

Cargas equivalentes y vida nominal

Se ha tenido el máximo cuidado para garantizar la exactitud de este cálculo, pero no se acepta ninguna responsabilidad por pérdidas o daños, ya sean directos, indirectos o consecuentes, que se produzcan como resultado del uso de dicho cálculo.
Véase la sección "Carga dinámica equivalente del rodamiento"
Véase la sección "Carga estática equivalente"

Rodamiento	30214 J2/G		
C [kN]	<input type="text" value="125"/>		
C ₀ [kN]	<input type="text" value="156"/>		
F _r [kN]	<input type="text" value="0.16"/>		
F _a [kN]	<input type="text" value="29.8"/>		
	<input type="button" value="Calcular"/>		
e	<input type="text" value="0.43"/>		
X	<input type="text" value="0.4"/>	X ₀	<input type="text" value="0.5"/>
Y	<input type="text" value="1.4"/>	Y ₀	<input type="text" value="0.8"/>
P [kN]	<input type="text" value="41.8"/>	P ₀ [kN]	<input type="text" value="23.9"/>
L ₁₀ [Mrev]	<input type="text" value="39"/>		

Otro de los parámetros es la viscosidad de la grasa lubricante de los rodamientos, para este caso se usan los datos propios de la grasa clase #2 con una temperatura de trabajo de 50C.

SKF

[Datos de los productos](#) [Imprimir](#) [?](#) [Cálculos](#) [Cerrar](#)

Viscosidad

Se ha tenido el máximo cuidado para garantizar la exactitud de este cálculo, pero no se acepta ninguna responsabilidad por pérdidas o daños, ya sean directos, indirectos o consecuentes, que se produzcan como resultado del uso de dicho cálculo.

Viscosidad a la temperatura de funcionamiento para un lubricante determinado
 Inserte la viscosidad del lubricante a utilizar

para un índice de viscosidad VI=95
 cuando se conocen dos puntos de viscosidad/temperatura

Temperatura, °C	Viscosidad, mm ² /s
40	150

[Especificaciones de la grasa](#)
[Grasas SKF](#)
[Grasas SKF para rodamientos obturados + rodamientos de rodillos a rótula SKF E2](#)
[Rodamientos rígidos de bolas](#)
[Rodamientos rígidos de bolas de acero inoxidable](#)
[Rodamientos Y, rodamientos de bolas](#)
[Rodamientos de dos hileras de bolas de contacto angular](#)
[Rodamientos de bolas a rótula](#)
[Rodamientos de dos hileras completamente llenos de rodillos cilíndricos](#)
[Rodamientos de rodillos a rótula](#)
[Rodamientos de rodillos a rótula SKF energéticamente eficientes \(E2\)](#)
[Rodamientos de rodillos](#)

Véase la sección "Condiciones de lubricación - relación de viscosidad k"

Viscosidad requerida

Rodamiento	30214 J2/G
d [mm]	70
D [mm]	125
n [r/min]	170
Temperatura de funcionamiento [°C]	90
Temperatura de referencia para la viscosidad [°C]	40
	Calcular
Viscosidad requerida a la temperatura de funcionamiento v_1 [mm ² /s]	55
Viscosidad requerida a la temperatura de referencia para un lubricante con VI=95 para obtener $\kappa=1$ a la temperatura de funcionamiento	636

Temperatura de funcionamiento [°C]
50
Calcular

Viscosidad de funcionamiento v [mm ² /s]	89.4
$\kappa (v/v_1)$	1.63

El grado de contaminación del alojamiento de los rodamientos es otro parámetro importante en el cálculo de la vida útil, por lo tanto hay que considerarlo en base a la siguiente información que proporciona SKF.

Basándose en dicha información la condición de limpieza para el caso particular corresponde a una limpieza normal, por lo tanto el valor de η_c es de 0.6.

Tabla 4: Valores orientativos del factor de ajuste η_c para diferentes grados de contaminación

Condición	Factor η_c ¹⁾ para rodamientos con un diámetro	
	$d_m < 100$ mm	$d_m \geq 100$ mm
Limpieza extrema Tamaño de las partículas del orden del espesor de la película de lubricante Condiciones de laboratorio	1	1
Gran limpieza Aceite filtrado a través de un filtro extremadamente fino Condiciones típicas de los rodamientos engrasados de por vida y obturados	0,8 ... 0,6	0,9 ... 0,8
Limpieza normal Aceite filtrado a través de un filtro fino Condiciones típicas de los rodamientos engrasados de por vida y con placas de protección	0,6 ... 0,5	0,8 ... 0,6
Contaminación ligera Contaminación ligera del lubricante	0,5 ... 0,3	0,6 ... 0,4
Contaminación típica Condiciones típicas de los rodamientos sin obturaciones integrales, filtrado grueso, partículas de desgaste y entrada de partículas del exterior	0,3 ... 0,1	0,4 ... 0,2
Contaminación alta Entorno del rodamiento muy contaminado y disposición de rodamientos con obturación inadecuada	0,1 ... 0	0,1 ... 0
Contaminación muy alta (bajo valores de contaminación extremos, η_c puede estar fuera de la escala produciendo una reducción mayor de la vida útil de lo establecido por la ecuación L_{nm})	0	0

¹⁾ La escala para η_c se refiere sólo a contaminantes sólidos típicos. La disminución de la vida del rodamiento por contaminación por agua u otros fluidos no está incluida. En caso de contaminación muy alta ($\eta_c = 0$), el fallo estará causado por el desgaste, y la vida útil del rodamiento puede ser menor que la vida nominal.

Una vez obtenidos todos los datos de entrada, se procede a calcular la vida útil de los rodamientos.

[Datos de los productos](#) [Imprimir](#) [?](#) [Cálculos](#) [Cerrar](#)

Vida del rodamiento

Se ha tenido el máximo cuidado para garantizar la exactitud de este cálculo, pero no se acepta ninguna responsabilidad por pérdidas o daños, ya sean directos, indirectos o consecuentes, que se produzcan como resultado del uso de dicho cálculo.

Véase la sección "Vida nominal SKF"

Rodamiento 30214 J2/Q

Seleccionar η_c

d [mm]

D [mm]

C [kN]

P_u [kN]

P [kN]

n [r/min]

v [mm²/s]

K

v_1

a_{SKF}

L_{10}

L_{10h}

L_{10m}

L_{10mh}

Método antiguo a_{23} para una comparación

a_{23}

L_{10a}

L_{10ah}

Para los rodamientos lubricados con grasa, compruebe la vida de la grasa. Véase la sección "Lubricación con grasa"

Para el cálculo de dos rodamientos en un eje, consulte el programa "SKF Bearing Select"

Para calcular el factor de contaminación η_c , consulte el programa "SKF Bearing Select"

donde

L_{nm} = vida nominal SKF (con un $100 - n^1$) % de fiabilidad), millones de revoluciones

L_{nmh} = vida nominal SKF (con un $100 - n^1$) % de fiabilidad), horas de funcionamiento

L_{10} = vida nominal básica (con un 90 % de fiabilidad), millones de revoluciones

a_1 = factor de ajuste de la vida para una mayor fiabilidad ([tabla 1](#))

a_{SKF} = Factor de ajuste de la vida SKF, (diagramas [1](#), [2](#), [3](#) y [4](#))

C = capacidad de carga dinámica, kN

P = carga dinámica equivalente del rodamiento, kN

n = velocidad de giro, rpm

p = exponente de la ecuación de la vida

3 para los rodamientos de bolas

10/3 para los rodamientos de rodillos

¹) El factor n representa la probabilidad de fallo, es decir, la diferencia entre la fiabilidad requerida y 100%.

En algunas ocasiones resulta preferible expresar la vida del rodamiento en unidades distintas a millones de revoluciones u horas. Por ejemplo, la vida de los rodamientos de los ejes de automóviles y ferrocarriles se suele expresar en kilómetros recorridos. La [tabla 2](#) ofrece los factores de conversión normalmente utilizados para facilitar el cálculo de la vida del rodamiento en diferentes unidades.

Por medio del cálculo presentado, se determina que los rodamientos elegidos cumplen con los requerimientos para su uso en la máquina expeller.

ANEXO D - DISEÑO DEL BASTIDOR (SAP 2000)

**ANEXO F - MANUAL DE OPERACIÓN Y
MANTENIMIENTO**

MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

El presente manual de operación y mantenimiento tiene los siguientes temas:

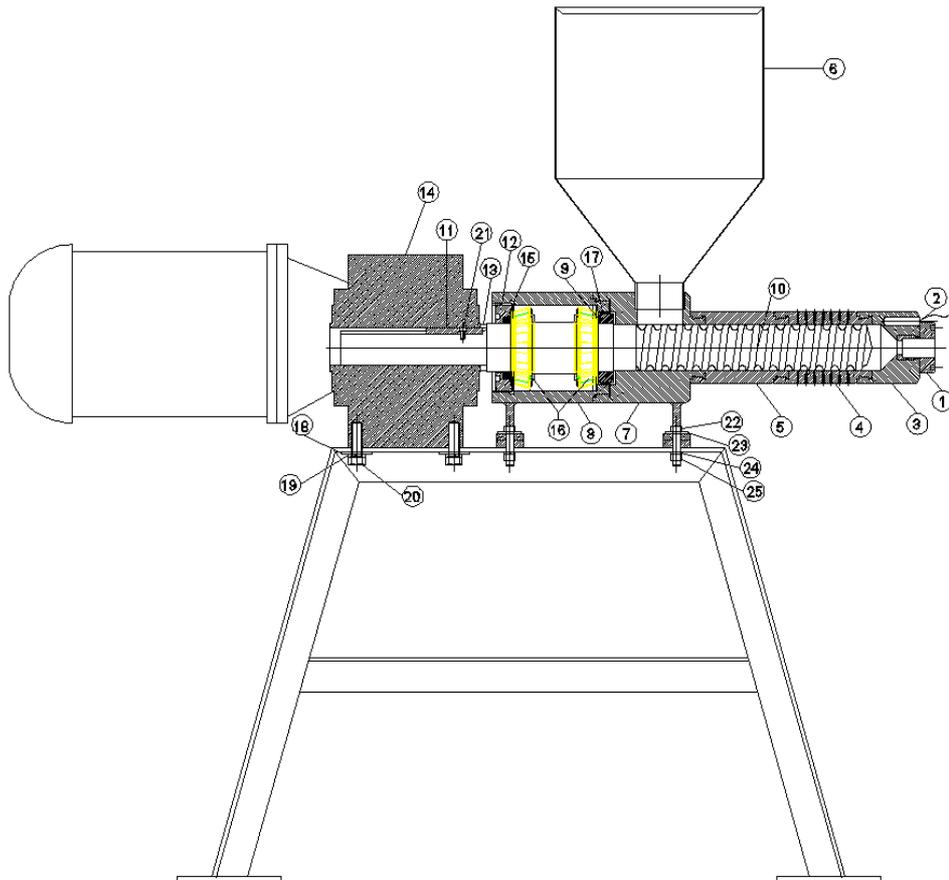
- a) Breve descripción de la máquina
- b) Riesgos
- c) Instalación
- d) Procedimiento de operación
- e) Mantenimiento
- f) Localización y solución de problemas

El manual aquí descrito debe ser leído por el operador previo al encendido de la máquina tipo expeller.

a) **Breve descripción de la máquina**

La máquina de extracción de aceite vegetal de jatropha curcas básicamente es una bomba que consiste en un tornillo que eleva presión interna contra las camisas que lo envuelven. Las semillas aparte de tener gran presión, necesitan de elevación de temperatura para poder extruirse y así drenar el aceite contenido dentro de sus moléculas.

En el presente esquema se presentan las partes que conforman la máquina expeller.



27	3	Prisionero m6 cabeza perdida	PR-EX-06
26	2	Prisionero m10 cabeza perdida	PR-EX-10
25	4	Tuerca hexagonal M12	TH-EX-01
24	4	Arandela de presión 12R	AP-EX-12
23	4	Arandela plana 12R	AA-EX-12
22	4	Perno m12-UNC-G 8.8	M12-EX-02
21	1	Perno m6-UNF cabeza hueca	M6-EX-01
20	4	Perno m16-UNC-G 8.8	M16-EX-01
19	4	Arandela de presión 16R	AP-EX-16
18	4	Arandela plana 16R	AA-EX-16
17	2	Retenedor tipo "O" ring	RO-EX-01
16	2	Rodamientos cónicos	RC-EX-01
15	1	Retenedor	RE-EX-01
14	1	Motorreductor 15 HP	MR-EX-01
13	1	Anillo de chaveta	ACH-EX-01
12	1	Tapa de ajuste rodamientos	TR-EX-01
11	1	Chaveta	CH-EX-01
10	1	Tornillo extrusor	TE-EX-01
9	1	Arandela retenedores	AR-EX-01
8	1	Alojamiento de rodamientos	CR-EX-02
7	1	Camisa zona de alimentación	CA-EX-01
6	1	Tolva de alimentación	TA-EX-01
5	1	Camisa sin agujeros	CS-EX-01
4	1	Camisa con agujeros	CC-EX-01
3	1	Portadado	PD-EX-01
2	3	Resistencia eléctrica 400 w	RE-EX-01
1	1	Dado	DA-EX-01
ORDEN	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	CÓDIGO

Como se puede apreciar, todos los elementos de la máquina son desmontables, lo cual facilita el montaje, la operación y la detección de posibles problemas que se puedan encontrar en plena operación.

b) **Riesgos**

La máquina expeller presenta los siguientes riesgos que pueden afectar al operador de la misma:

Riesgo eléctrico

Debido a que el motor es eléctrico, puede haber riesgo de descarga en caso de tener una mala conexión ya sea en el montaje de la máquina o en la instalación que alimenta de energía a la misma. Por lo tanto se debe ser cauteloso en revisar que todas las instalaciones estén bien conectadas.

Riesgo de quemaduras

Debido a que en la zona del dado la temperatura se eleva a aproximadamente 200 C, es necesario procurar que el operador sea capacitado y guarde cuidado en el funcionamiento de la máquina.

Riesgo de impacto

Debido a que la máquina es desmontable, existe la posibilidad de caída de los elementos, por lo cual se deberá ser muy cuidadoso en estas actividades.

Riesgos tóxicos

Debido a que la masa que se comprime en el interior del tornillo está sometido a calor, la máquina desprende gases de combustión por la parte del dado, los cuales pueden ser nocivos al operador.

Por los antecedentes antes descritos se recomienda que el operador utilice los siguientes implementos de seguridad:

- Mascarilla
- Overol
- Guantes
- Botas de seguridad

c) **Instalación**

La máquina expeller debe ser instalada en un lugar con los siguientes requerimientos:

Piso

El piso en el cual se va a situar la máquina debe ser nivelado a fin de que en operación no se pueda dar el caso de cabeceo por parte del tornillo dentro de las camisas que lo contienen.

Cada una de las patas dispone de 4 pernos m12 para el anclaje al piso, antes de ajustar los pernos se debe verificar nivel tomando como referencia la parte superior del reductor de velocidad. En caso de no poder nivelar bien el bastidor, se sugiere usar alzas en cada pata hasta llegar a una ubicación aceptable.

Energía eléctrica

El lugar donde operará la máquina expeller deberá estar energizado con corriente trifásica con 220V, la instalación en general deberá tener un breaker exclusivo para el uso del artefacto, esto a pesar de que en el tablero eléctrico se hallan las protecciones eléctricas debidas.

Ventilación

El lugar donde estará operando el expeller deberá tener ventilación adecuada debido a la emanación de gases que en gran concentración pueden ser nocivos para el operador. En caso de que el lugar donde se ubique carezca de espacio, se sugiere instalar un sistema de extracción de aire.

d) **Procedimiento de operación**

El operador para hacer funcionar de una manera correcta la máquina expeller tiene que seguir el siguiente procedimiento antes de poner en marcha la producción:

- I. Revisar que todas las partes estén bien sujetas, es decir, tanto los pernos de sujeción de la máquina al bastidor como las camisas de extrusión deben ajustarse con la herramienta debida.

La máquina al bastidor se acopla mediante 4 pernos m12, los cuales deben ser apretados con una llave de boca o de corona milimétrica #19.

Las camisas de extrusión y el portadado se ajustan con la llave de cadena que se proporciona con la máquina.

El dado se ajusta mediante una llave tipo compás, esta llave tiene dos patas, con una muesca en el extremo de cada una, que pivotan en un pin a manera de compás, en caso de no poseer esta llave, el dado tiene un moleteado para hacer el ajuste manualmente.

NOTA: Todos los elementos de la máquina expeller tienen rosca derecha, por lo tanto el ajuste se lo hace en sentido horario.

- II. Revisar las conexiones eléctricas de los siguientes elementos: tablero eléctrico, resistencias, motor y línea de energía de suministro.
- III. Revisar que no se encuentre ningún objeto en la cavidad de alimentación del expeller, pues en caso de que se introduzca algún material como piedras, clavos, tornillos o similares, causará que el tornillo se trabe y la máquina quedará deshabilitada permanentemente.

Una vez realizadas las 3 actividades previas se puede proceder con la operación de la máquina expeller. A continuación se detalla el procedimiento estándar practicado en las pruebas de funcionamiento:

- I. Precalear la máquina expeller mediante las resistencias ubicadas en el portadado, para este paso se las debe encender con el interruptor, la temperatura debe llegar a 180 C en la parte frontal del dado, el tiempo estimado es de 15 minutos de precalentamiento.
- II. Encender el motor con el pulsador ON ubicado en el tablero de control, dejar que la velocidad del motor llegue al tope de la rampa de arranque, el tiempo es variable según el ajuste que tenga el arrancador.
- III. Colocar los recipientes tanto para el aceite cuanto para el desecho por debajo y al frente de la máquina, respectivamente. El recipiente del aceite deberá estar limpio para evitar contaminarlo.
- IV. Colocar en la tolva de alimentación la semilla de *Jatropha curcas*, la capacidad es de 10 kg. Se sugiere limpiar la semilla mediante una zaranda a fin de

eliminar la mayor cantidad de tierra posible pues, de no hacerlo, el aceite que se extrae saldrá con gran cantidad de sedimento.

La alimentación continua de la máquina es necesaria para evitar que cese el proceso de extracción, por lo cual el operador deberá fijarse que la tolva esté siempre con material.

El tiempo en que se consumen los 10 kg de semilla es de 18 a 20 minutos.

NOTA: la temperatura debe ser controlada con el encendido y apagado periódico de las resistencias con el interruptor. En caso de disminuirse la temperatura bajo la mínima de operación, el expeller no seguirá extruyendo por lo cual dejará de funcionar.

Después de terminar la jornada de producción se deben realizar las siguientes actividades:

- I. Dejar enfriar el sistema hasta una temperatura que permita su manipulación.
- II. Con la llave de cadena desramar las camisas de extrusión para poder limpiar el material que no ha sido extruído, generalmente queda un pequeño cono en la zona del dado.
- III. Limpiar tanto el tornillo cuanto las camisas, poniendo especial énfasis a la camisa con agujeros ya que se deben limpiar los agujeros del material acumulado en ellas, este proceso permitirá que en la siguiente puesta en operación la extracción sea más eficiente.
- IV. Montar los elementos en su lugar y limpiar el sitio de trabajo.

e) **Mantenimiento**

El mantenimiento del sistema es relativamente fácil debido a que no existen elementos complejos en su estructura, para ello se deben realizar las siguientes actividades:

- I. Limpiar cada vez que se utilice la máquina evita que en los elementos empiecen a ser afectados por la corrosión.

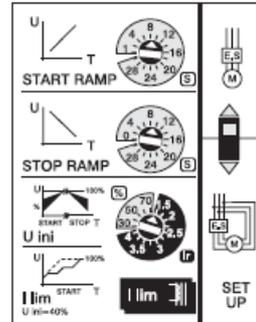
- II. Revisar periódicamente las instalaciones eléctricas, verificando que los cables se encuentren flojos ya que esto evitará el recalentamiento de los mismos.
- III. En el montaje de las camisas es necesario poner un cantidad de lubricante para evitar el contacto directo metal con metal.
- IV. Evitar la manipulación excesiva de los cables de las resistencias debido a que estas tienden a cristalizarse por el hecho de la variación de temperatura continua.

ANEXO G - PARÁMETROS DE SETEO DEL ARRANCADOR

PARÁMETROS DE SETEO DEL ARRANCADOR

4. Setting

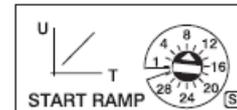
The softstarter has three rotating switches as well as one 2-position switch. Basic settings for different applications are listed in the tables on page 11.



Picture 4.1

4.1 Start ramp

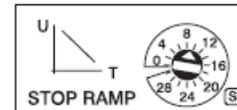
Sets the time for how fast the voltage shall be increased during start. Adjustable in 16 steps between 1 and 30 seconds. See picture 4.2.



Picture 4.2

4.2 Stop ramp

Sets the time for how fast the voltage shall be decreased during stop. Adjustable in 16 steps between 0 and 30 seconds. See picture 4.3.



Picture 4.3

4.3 Initial voltage (UINI) / Current limit function (ILIM)

4.3.1 Initial voltage (UINI)

WHITE scale

Sets the starting voltage level for the start ramp, as well as the end voltage of the stop ramp.

Adjustable in 5 steps between 30% and 70% of full voltage.

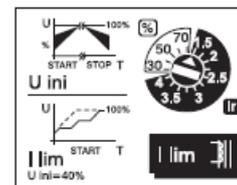
4.3.2 Current limit function (ILIM)

A softstarter always reduces starting current. The current limit function allows you to pre-set a maximum starting current which will never be exceeded.

BLUE scale

The same rotating switch as for initial voltage (UINI). Sets the current limit, if a current transformer T2 is connected to terminals 11 and 12.

Adjustable in 11 steps between 1,5 and 4 times the current transformers ratio. When setting the parameter (ILIM) on the blue scale, the initial voltage (UINI) will always be a fixed value of 40%.

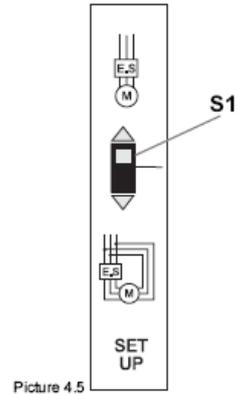


Picture 4.4

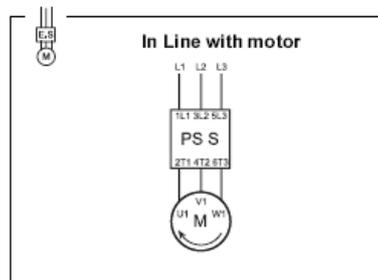
4. Setting

4.4 Switch for selection of connection type, Line/Delta switch S1

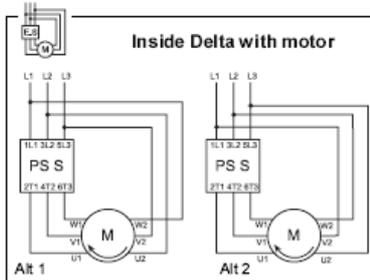
The softstarter can be connected to the main circuit in several different ways. "In Line" with the motor (see picture 4.6) or "Inside Delta" with the motor (see picture 4.7). Set this switch in the position corresponding to the chosen connection type.



Picture 4.5



Picture 4.6



Picture 4.7

4. Setting

4.5 Basic settings for different applications

4.5.1 Without current transformer T2 connected

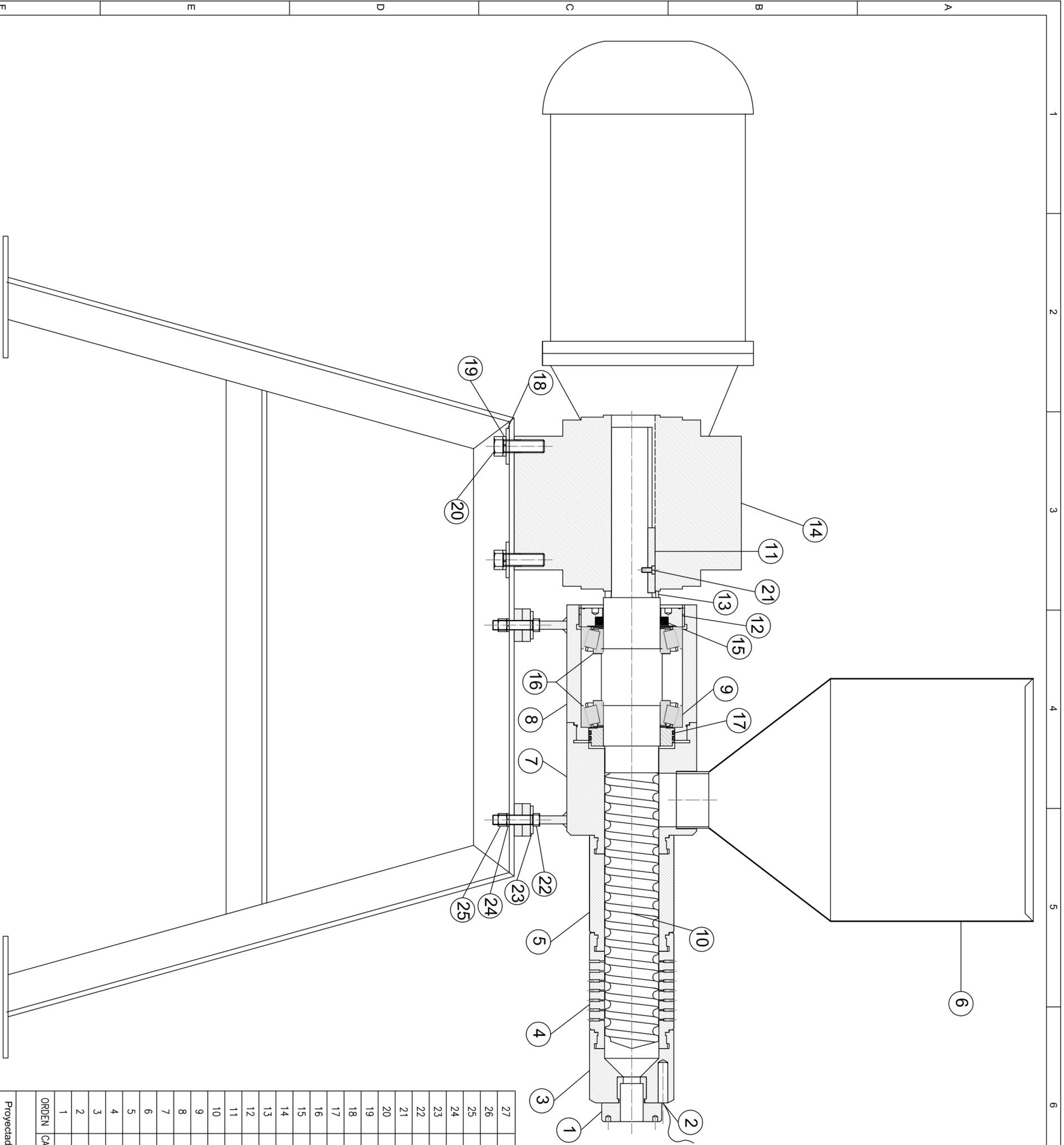
Type of load	Ramp time for start (sec)	Ramp time for stop (sec)	Initial voltage U _{INI}	
Bow thruster	10	0	30%	
Centrifugal fan	10	0	30%	
Centrifugal pump	10	20	30%	
Piston compressor	10	0	30%	
Lifting equipment	10	10	60%	
Rotary converter	10	0	30%	
Stirrer, Mixer	10	0	60%	
Scraper	10	10	40%	
Screw compressor	10	0	40%	
Screw conveyor	10	10	40%	
Unloaded motor	10	0	30%	
Conveyor belt	10	10	40%	
Heat pump	10	20	30%	
Escalator	10	0	30%	
Hydraulic pump	10	0	30%	

4.5.2 With current transformer T2 connected

Tab 4.2

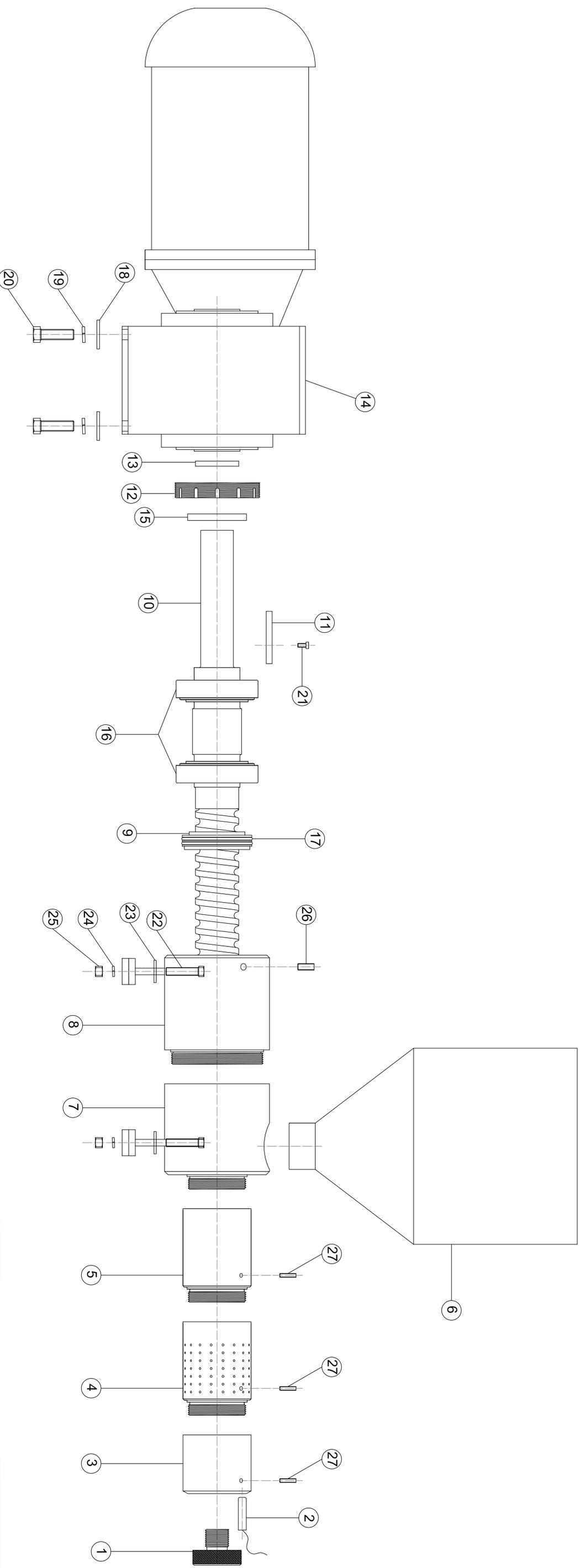
Type of load	Ramp time for start (sec)	Ramp time for stop (sec)	Initial voltage U _{INI} (Fixed value)	Current limit I _{LM} (xI _e) (start)
Bow thruster	10	0	(40%)	2,5
Centrifugal fan	10	0	(40%)	3,5
Centrifugal pump	10	20	(40%)	3
Piston compressor	10	0	(40%)	3
Lifting equipment	10	10	(40%)	3,5
Rotary converter	10	0	(40%)	2,5
Stirrer, Mixer	10	0	(40%)	3,5
Scraper	10	10	(40%)	3,5
Screw compressor	10	0	(40%)	3,5
Screw conveyor	10	10	(40%)	3,5
Unloaded motor	10	0	(40%)	2,5
Conveyor belt	10	10	(40%)	3,5
Heat pump	10	20	(40%)	3
Escalator	10	0	(40%)	3
Hydraulic pump	10	0	(40%)	2,5

ANEXO E – PLANOS CONSTRUCTIVOS



ORDEN	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	CÓDIGO	NORMA	OBSERVACIÓN
1	1	Dado	DA-EX-01		
2	3	Resistencia eléctrica 400 w	RE-EX-01		
3	1	Portado	PD-EX-01		
4	1	Camisa con agujeros	CC-EX-01		
5	1	Camisa sin agujeros	CS-EX-01		
6	1	Tolva de alimentación	TA-EX-01		
7	1	Camisa zona de alimentación	CA-EX-01		
8	1	Alojamiento de rodamientos	CR-EX-02		
9	1	Arandela retenedores	AR-EX-01		
10	1	Tornillo extrusor	TE-EX-01		
11	1	Choveta	CH-EX-01		
12	1	Tapa de ajuste rodamientos	TR-EX-01		
13	1	Anillo de choveta	ACH-EX-01		
14	1	Motorreductor 15 HP	MR-EX-01		
15	1	Retenedor	RE-EX-01		
16	2	Rodamientos cónicos	RC-EX-01		
17	2	Retenedor tipo "O" ring	RO-EX-01		
18	4	Arandela plana 16R	AA-EX-16		
19	4	Arandela de presión 16R	AP-EX-16		
20	4	Perno m16-UNC-G 8.8	M16-EX-01		
21	1	Perno m6-UNF cabeza hueca	M6-EX-01		
22	4	Perno m12-UNC-G 8.8	M12-EX-02		
23	4	Arandela plana 12R	AA-EX-12		
24	4	Arandela de presión 12R	AP-EX-12		
25	4	Tuerca hexagonal M12	TH-EX-01		
26	2	Pisónero m10 cabeza perdida	PR-EX-10		
27	3	Pisónero m6 cabeza perdida	PR-EX-06		

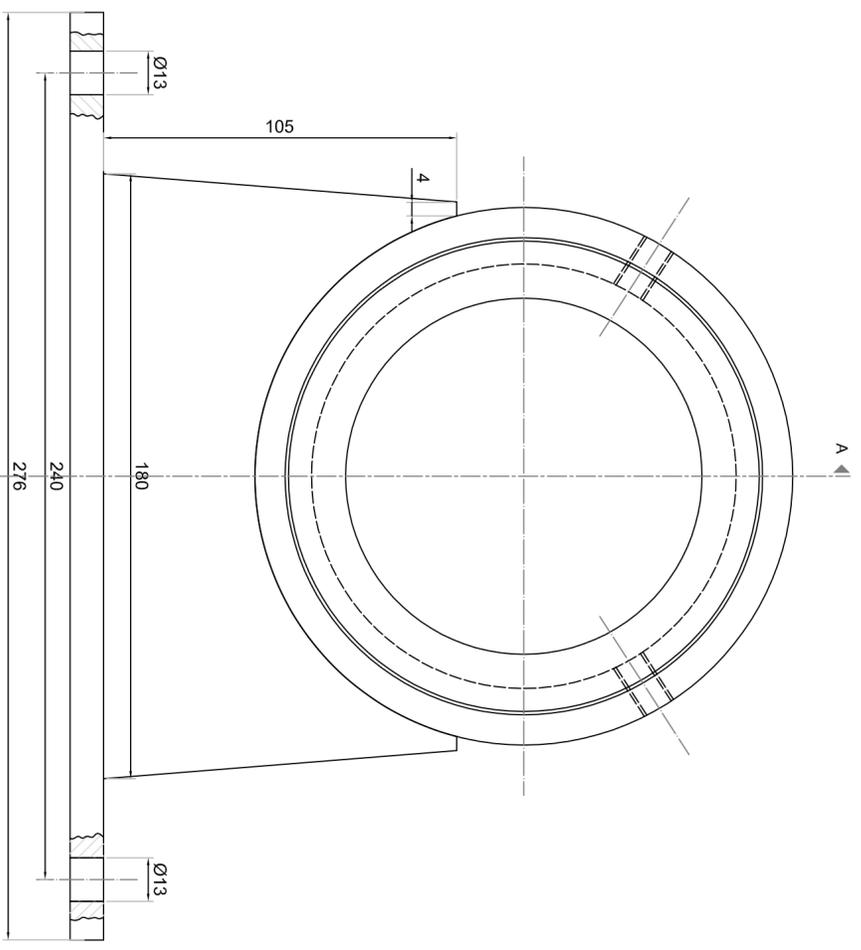
PROYECTADO	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIAL	INDICADOS	CANTIDAD
Proyectado		Gomez/Villegas				1
Revisado		Ing. Surtaxi C.		Contiene:	MAQUINA EXPELLER	
Dibujado		Gomez/Villegas			CONJUNTO ARMADO	
Aprobado		Ing. Naranjo C.		Código:	TE-EX-01	
ESQUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO				Sustituye a:		
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA						



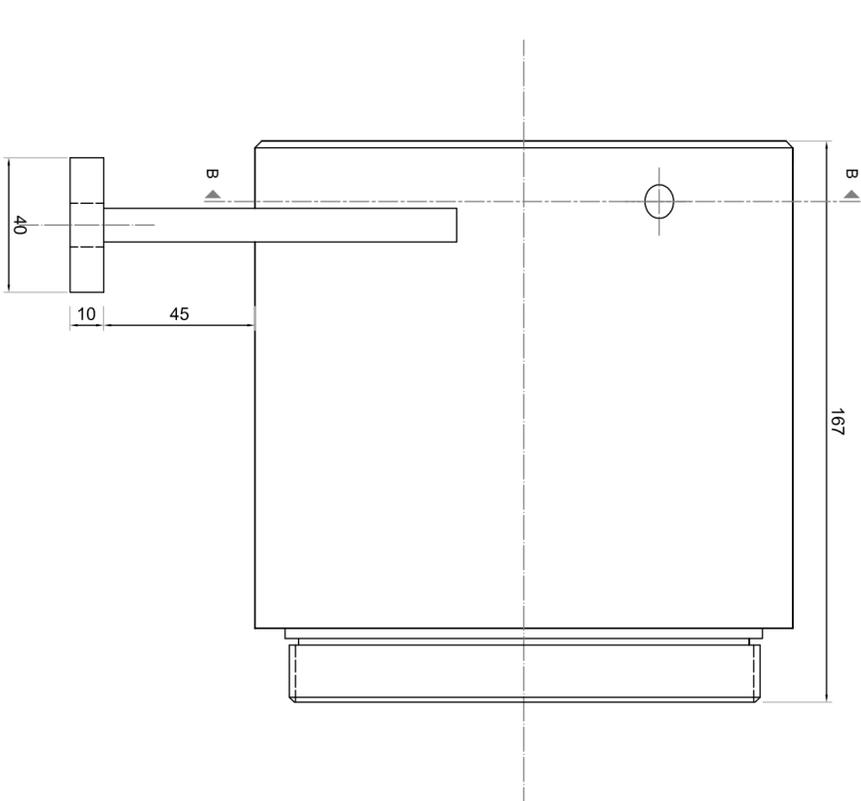
ORDEN (CANTIDAD)	DESCRIPCION	POSICION	CODIGO	NORMA	OBSERVACION
1	Dado	D12	DA-EX-01		
2	Resistencia electrica 400 w	D12	RE-EX-01		
3	Portado	D12	PD-EX-01		
4	Comisa con agujeros	D11	CC-EX-01		
5	Comisa sin agujeros	D10	CS-EX-01		
6	Tolco de alimentacion	B9	TA-EX-01		
7	Comisa zona de alimentacion	B9	CA-EX-01		
8	Alojamiento de rodamientos	B8	CR-EX-02		
9	Arandela retenedores	B7	AR-EX-01		
10	Tornillo extrusor	D5	TE-EX-01		
11	Chaveta	D5	CH-EX-01		
12	Topo de ajuste rodamientos	D4	TR-EX-01		
13	Anillo de chaveta	D4	AQI-EX-01		
14	Motorreductor 15 HP	D3	MR-EX-01		
15	Retenedor	D4	RE-EX-01		
16	Rodamientos cónicos	D6	RC-EX-01		
17	Retenedor tipo "O" ring	D7	RO-EX-01		
18	Arandela plana 16R	E4	AA-EX-16		
19	Arandela de presión 16R	E4	AP-EX-16		
20	Perno m16-UNC-G 8.8	E4	M16-EX-01		
21	Perno m12-UNC-G 8.8	D8	M12-EX-02		
22	Arandela plana 12R	D8	AA-EX-12		
23	Arandela de presión 12R	D8	AP-EX-12		
24	Tuerca hexagonal M12	E8	TH-EX-01		
25	Prisionero m10 cabeza perdida	D10	PR-EX-06		
26	Prisionero m10 cabeza perdida	E8	PR-EX-10		
27	Housing				

Proyectado	Gomez/Milegas	Fecha		Nombre		Firma	
Revisado	Ing. Sumaxi C.						
Dibujado	Gomez/Milegas						
Aprobado	Ing. Naranjo C.						

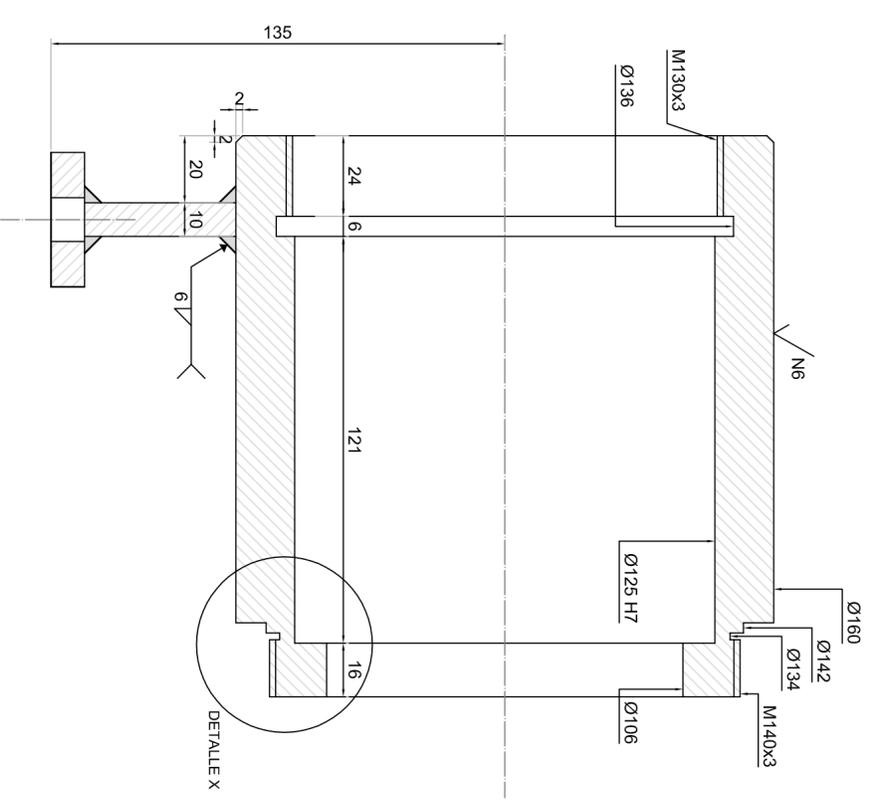
ESCUOLA POLITECNICA DEL EJERCITO
 CARRERA DE INGENIERIA MECANICA
 Contiene: MAQUINA EXPULSOR DESPIECE
 Escala: 1:3
 Código: EX-02
 Sustituye a:
 Hoja: 2/15



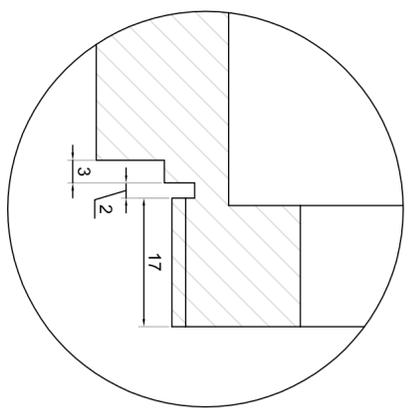
ALojAMIENTO DE RODAMIENTOS - VISTA FRONTAL
ESCALA 1:1.5



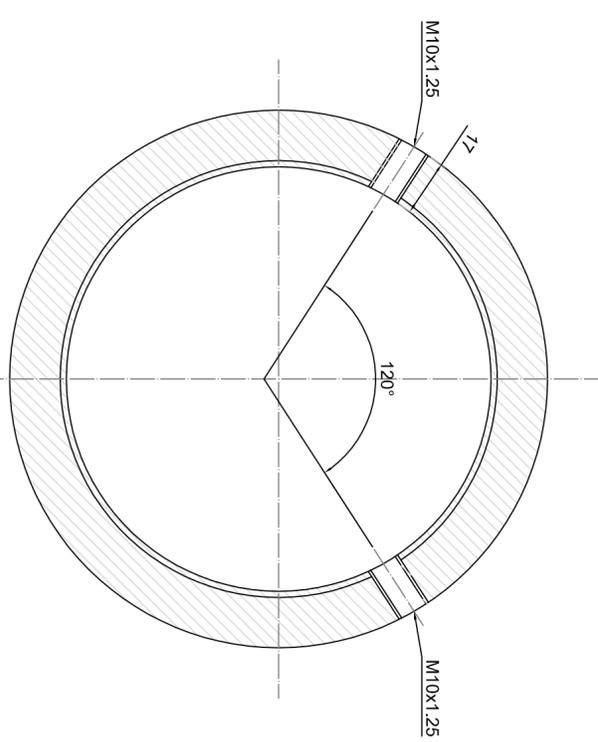
ALojAMIENTO DE RODAMIENTOS - VISTA LATERAL
ESCALA 1:1.5



CORTE A - A
ESCALA 1:1.5



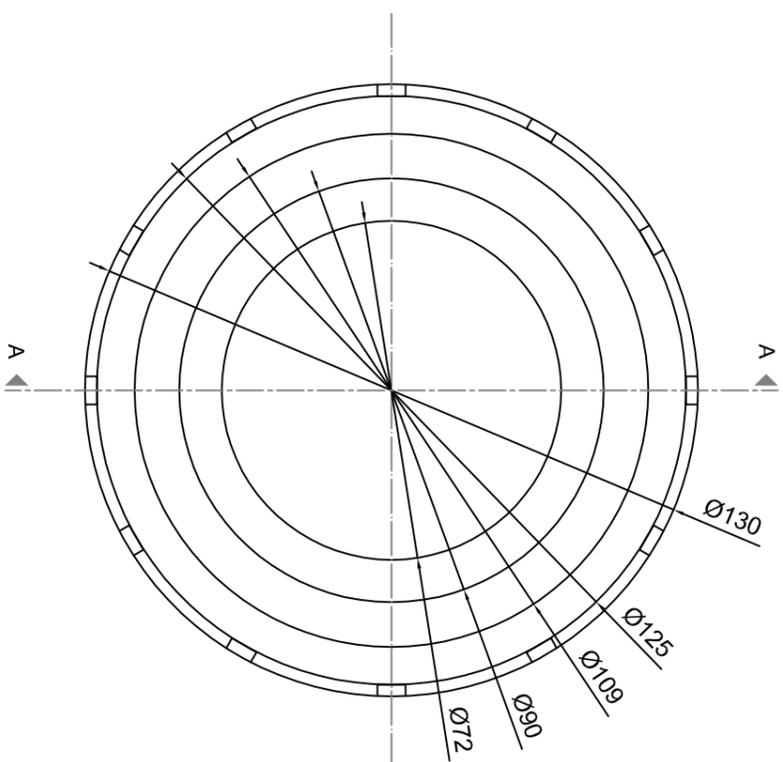
DETALLE X
ESCALA 1.5:1



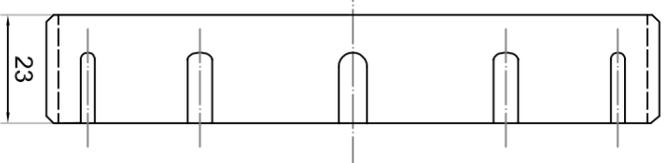
CORTE B - B
ESCALA 1:1.5

NOTA: Todas las roscas son derechas

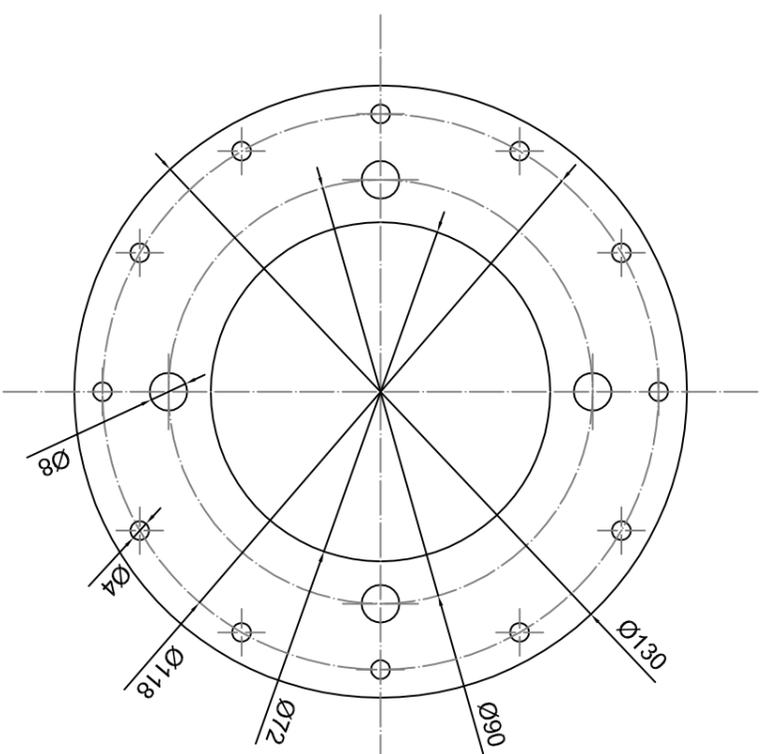
Proyectado	Fecha	Nombre	Firma	Material:	Cantidad:
		Gomez/Villegas		AlSI 1045	1
Revisado		Ing. Surtaxi C.		Contiene:	ESCALA:
Dibujado		Gomez/Villegas		ALojAMIENTO DE RODAMIENTOS	1:1.5
Aprobado		Ing. Naranjo C.		Código:	
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO				Código:	EX-04
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA				Sustituye a:	
				Hoja:	4/15



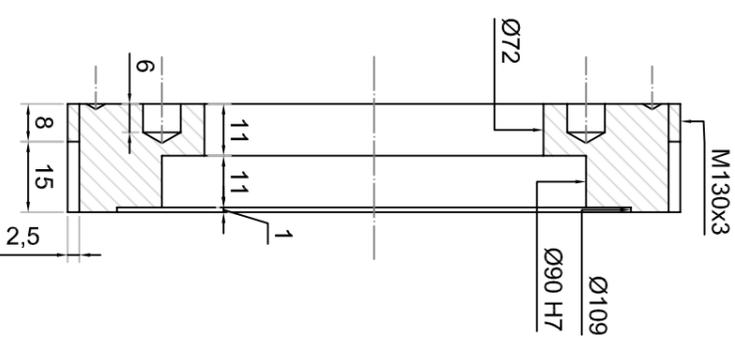
TAPA DE AJUSTE - VISTA FRONTAL
ESCALA 1:1.5



TAPA DE AJUSTE - VISTA LATERAL
ESCALA 1:1.5



TAPA DE AJUSTE - VISTA TRASERA
ESCALA 1:1.5



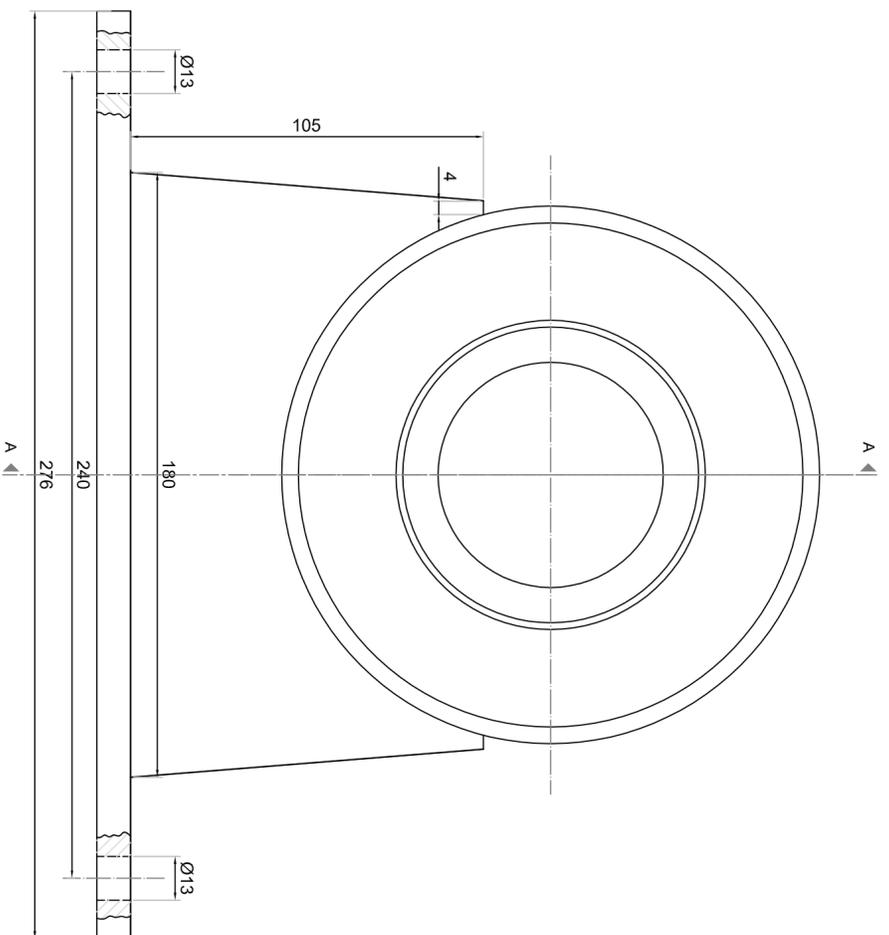
CORTE A-A
ESCALA 1:1.5

NOTA: Todas las roscas son derechas

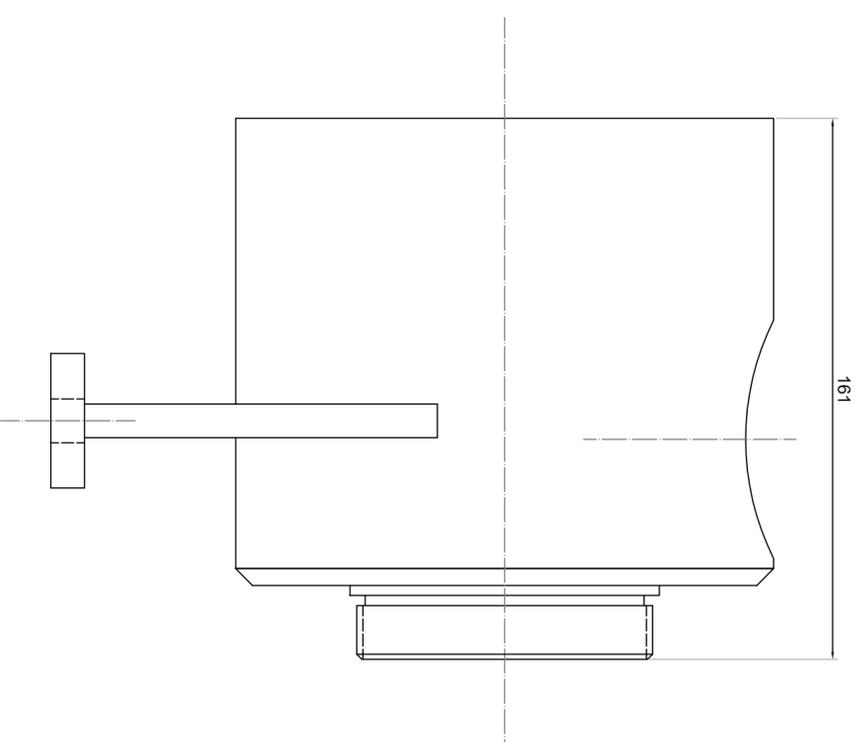
Fecha	Nombre	Firma	Material:	Cantidad:
	Gomez/Villegas		AISI 1045	1
Proyectado	Gomez/Villegas		Contiene:	Escala:
Revisado	Ing. Suntaxi C.		TAPA DE AJUSTE DE RODAMIENTOS	1:1.5
Dibujado	Gomez/Villegas		Código:	
Aprobado	Ing. Naranjo C.		EX-05	
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO			Sustituye a:	
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA				



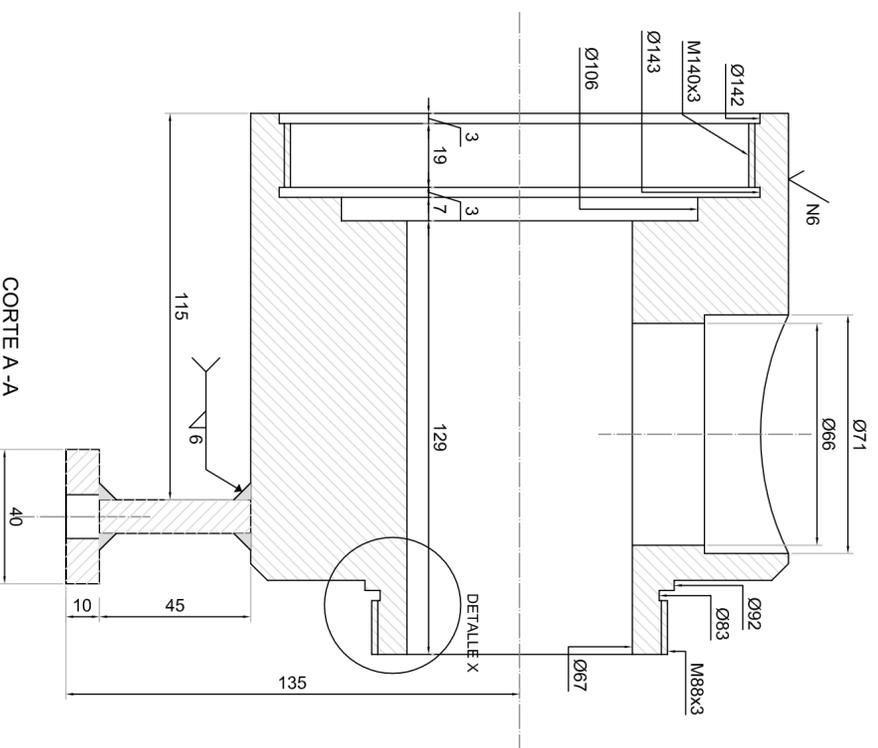
Hoja: 5/15



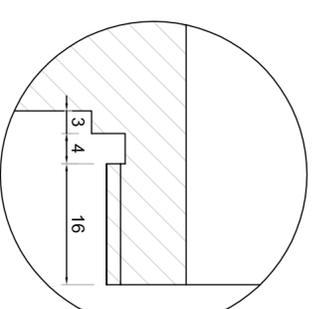
CAMISA ZONA DE ALIMENTACIÓN - VISTA FRONTAL
ESCALA 1:1.5



CAMISA ZONA DE ALIMENTACIÓN - VISTA LATERAL
ESCALA 1:1.5



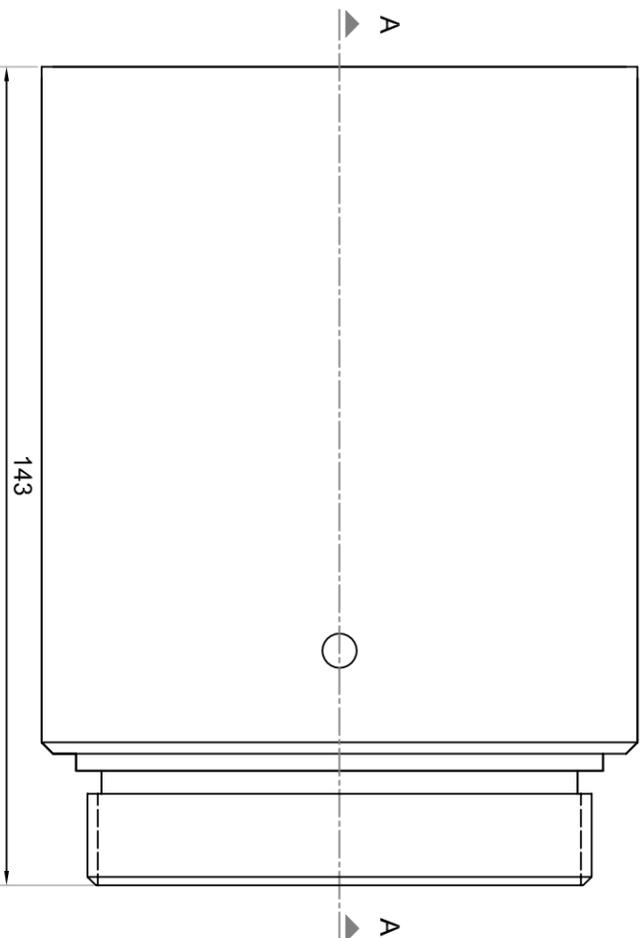
CORTE A-A
ESCALA 1:1.5



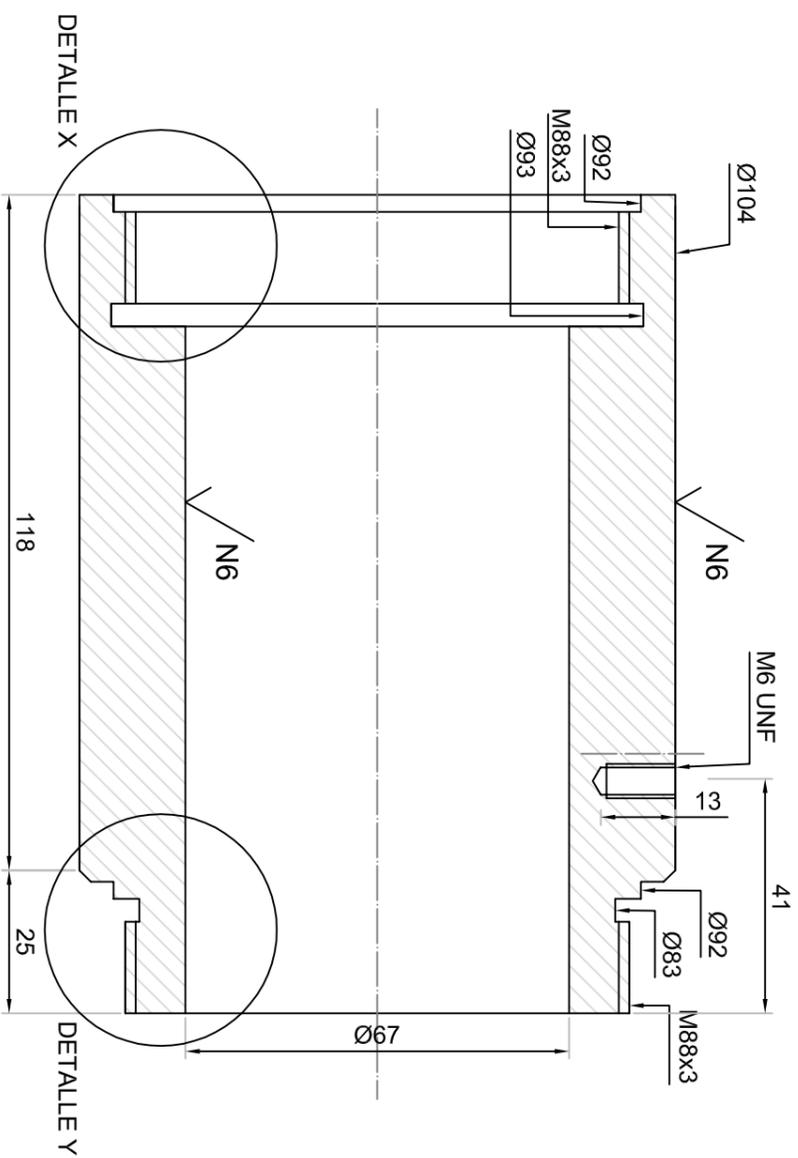
DETALLE X
ESCALA 1.5:1

NOTA: Todas las roscas son derechas

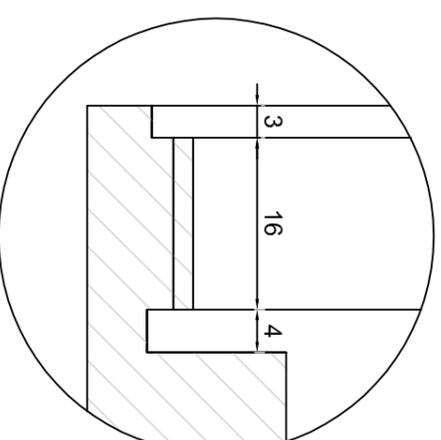
Proyectado	Fecha	Nombre	Firma	Material:	Cantidad:
		Gomez/Villegas		AlSi 1045	1
Revisado		Ing. Surtaxi C.		Contiene:	ESCALA:
Dibujado		Gomez/Villegas		CAMISA ZONA DE ALIMENTACIÓN	1:1.5
Aprobado		Ing. Naranjo C.		Código:	
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO				EX-06	
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA				Sustituye a:	Hoja: 6/15



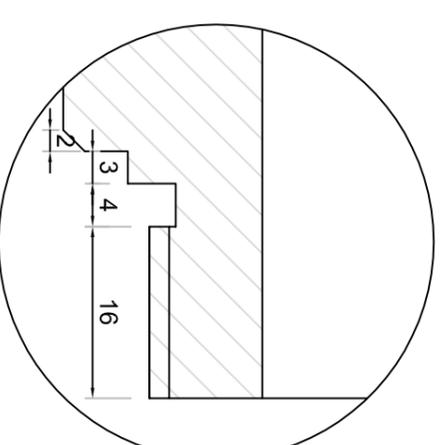
CAMISA CON AGUJEROS
ESCALA 1:1.25



CORTE A - A
ESCALA 1:1.25



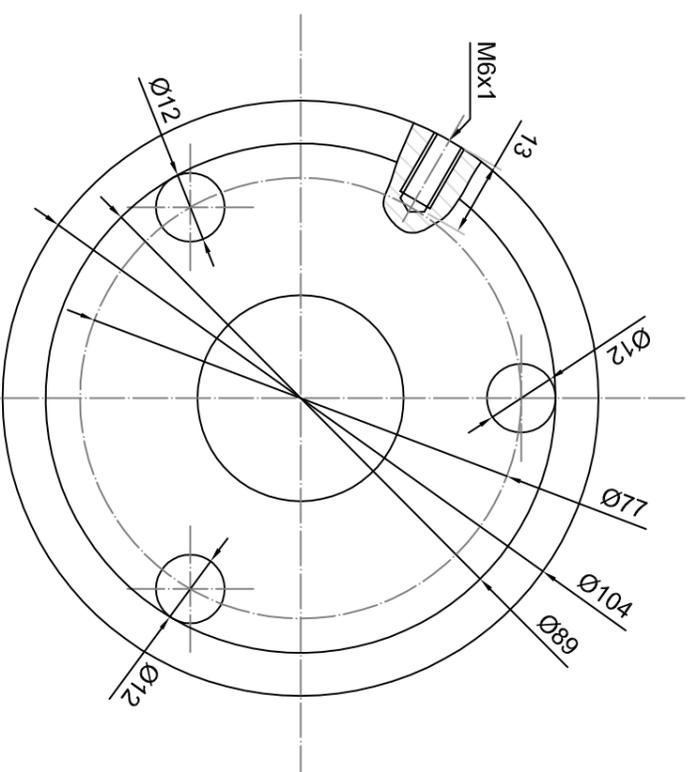
DETALLE X
ESCALA 1.5:1



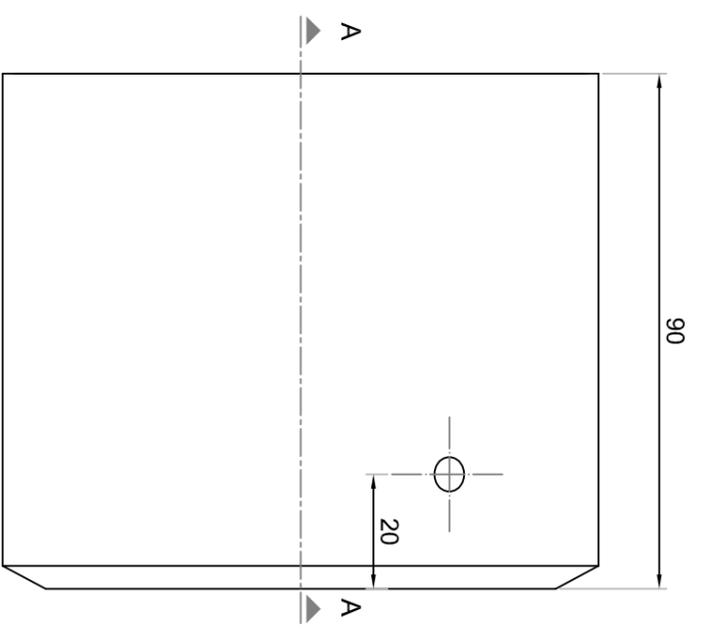
DETALLE Y
ESCALA 1.5:1

NOTA: Todas las roscas son derechas

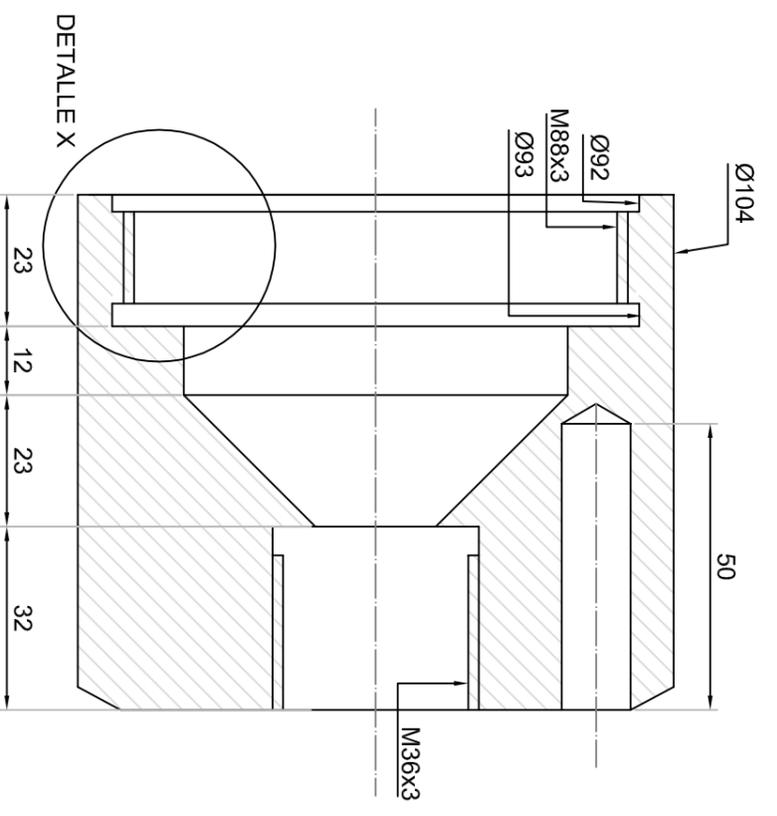
Proyectado	Fecha	Nombre	Firma	Material:	Cantidad:
Revisado		Gomez/Villegas		BARRA PERFORADA SKF 280	1
Dibujado		Ing. Suntaxi C.		Contiene:	Escala:
Aprobado		Gomez/Villegas		CAMISA DE EXTRUSIÓN SIN AGUJEROS	INDICADAS
		Ing. Naranjo C.		Código:	
				EX-07	
				Sustituye a:	
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO					
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA					
					Hoja: 7/15



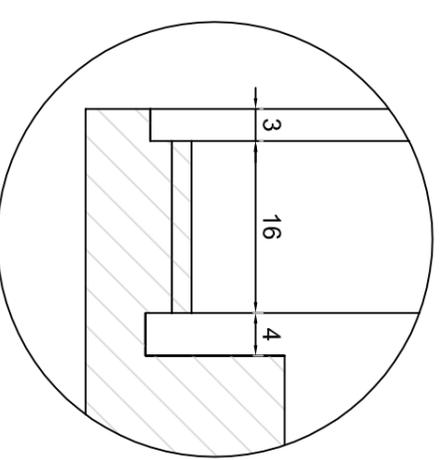
PORTADADO - VISTA FRONTAL
ESCALA 1:1.25



PORTADADO - VISTA LATERAL
ESCALA 1:1.25



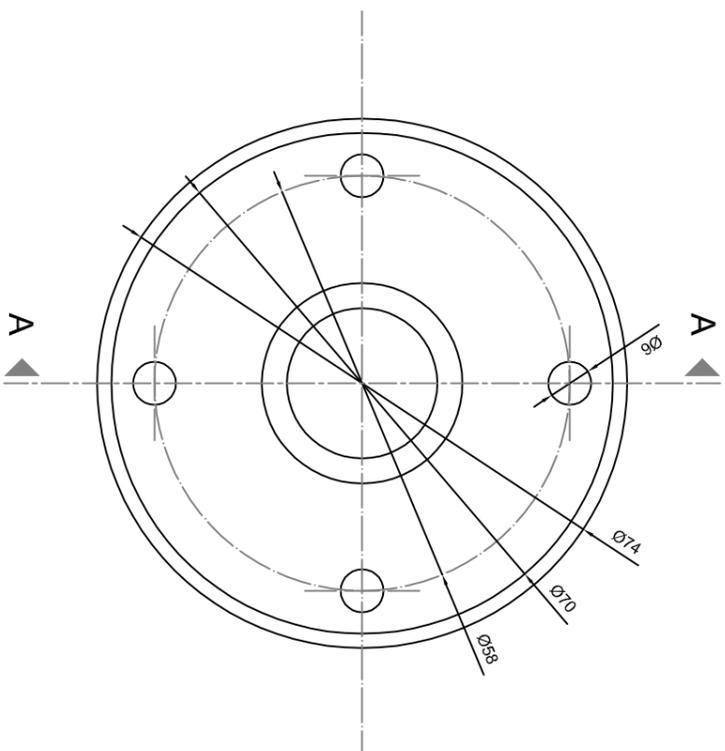
CORTE A - A
ESCALA 1:1.25



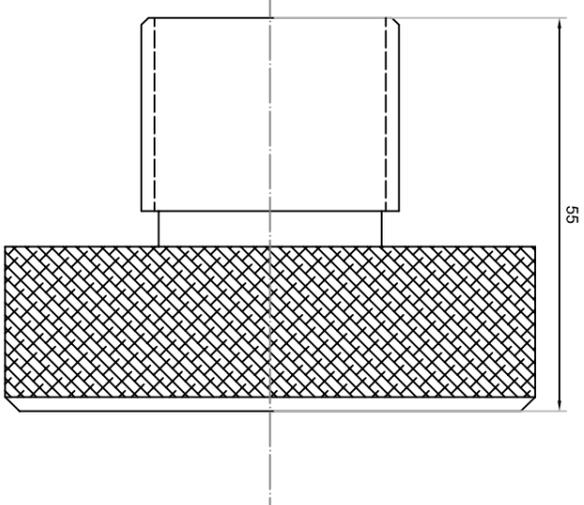
DETALLE X
ESCALA 1.5:1

NOTA: Todas las roscas son derechas

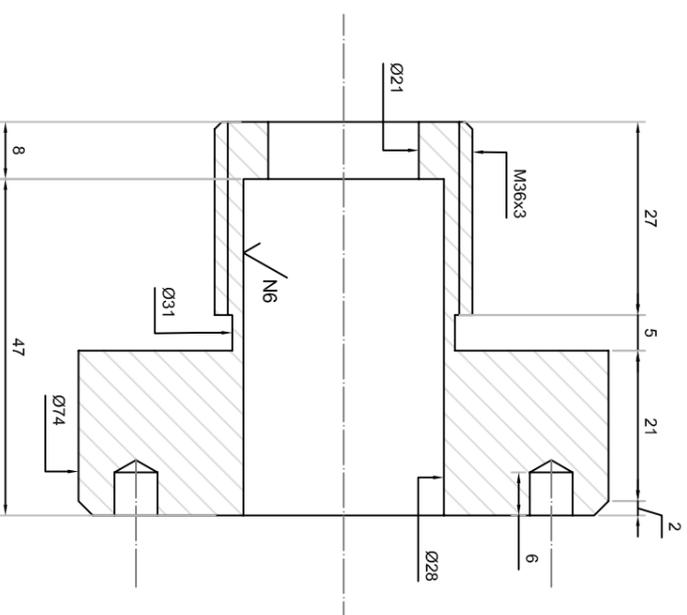
Proyectado	Fecha	Nombre	Firma	Material:	Cantidad:
		Gomez/Villegas		AISI 1045	1
Revisado		Ing. Suntaxi C.		Contiene: PORTADADO	Escala: INDICADAS
Dibujado		Gomez/Villegas			
Aprobado		Ing. Naranjo C.			
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO				Código:	
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA				EX-09	
				Sustituye a:	
					Hoja: 9/15



DADO - VISTA FRONTAL
ESCALA 1:1.5



DADO - VISTA LATERAL
ESCALA 1:1.5

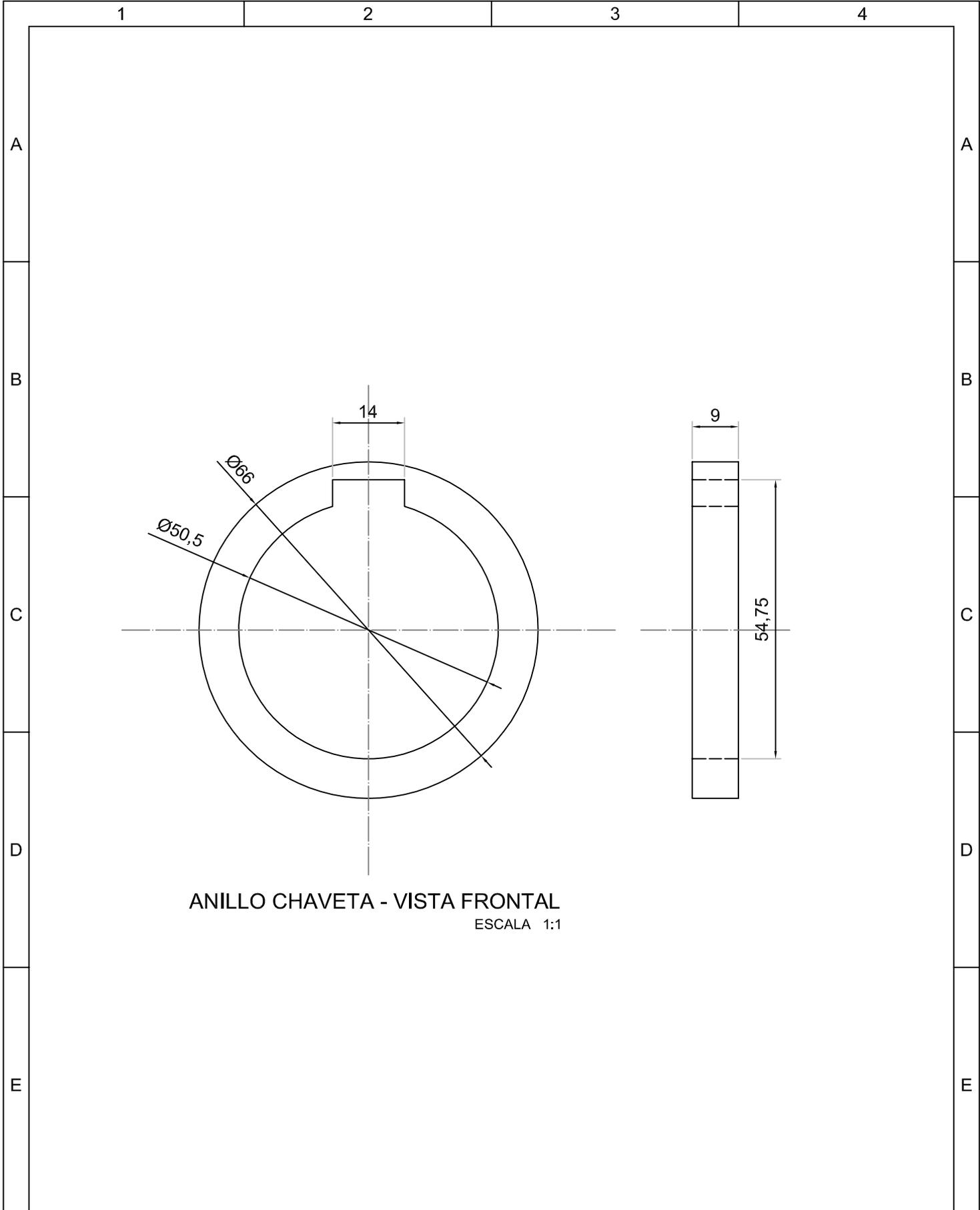


CORTE A-A
ESCALA 1:1.5

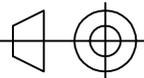
NOTA: Todas las roscas son derechas

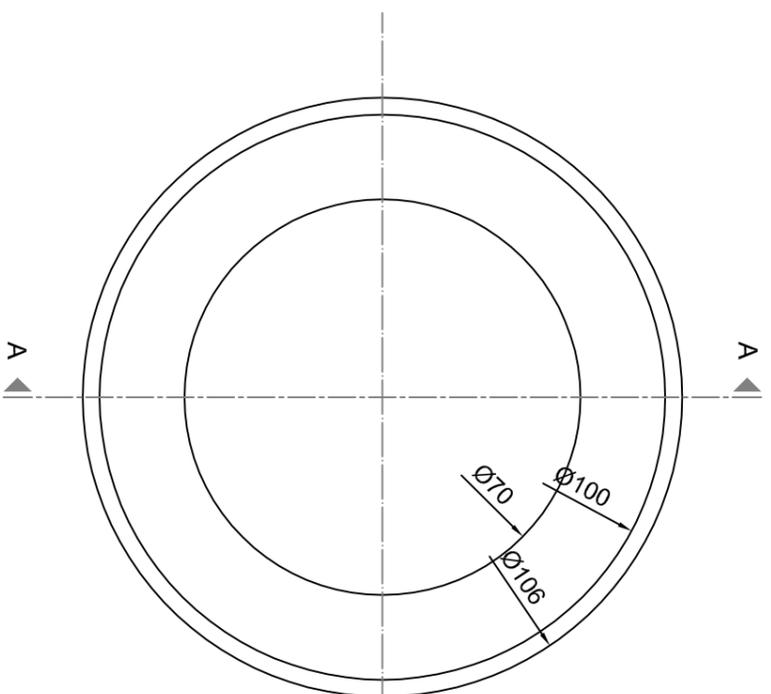
Proyectado	Fecha	Nombre	Firma	Material:	Cantidad:
Revisado		Gomez/Villegas		AISI 1045	1
Dibujado		Ing. Suntaxi C.		Contiene:	Escala:
Aprobado		Gomez/Villegas		DADO	1:1
		Ing. Naranjo C.		Código:	
				EX-10	
				Sustituye a:	

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO				
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA				
				Hoja: 10/15

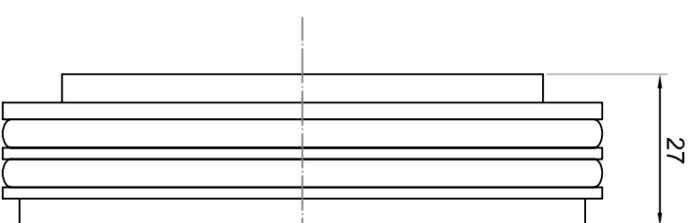


ANILLO CHAVETA - VISTA FRONTAL
 ESCALA 1:1

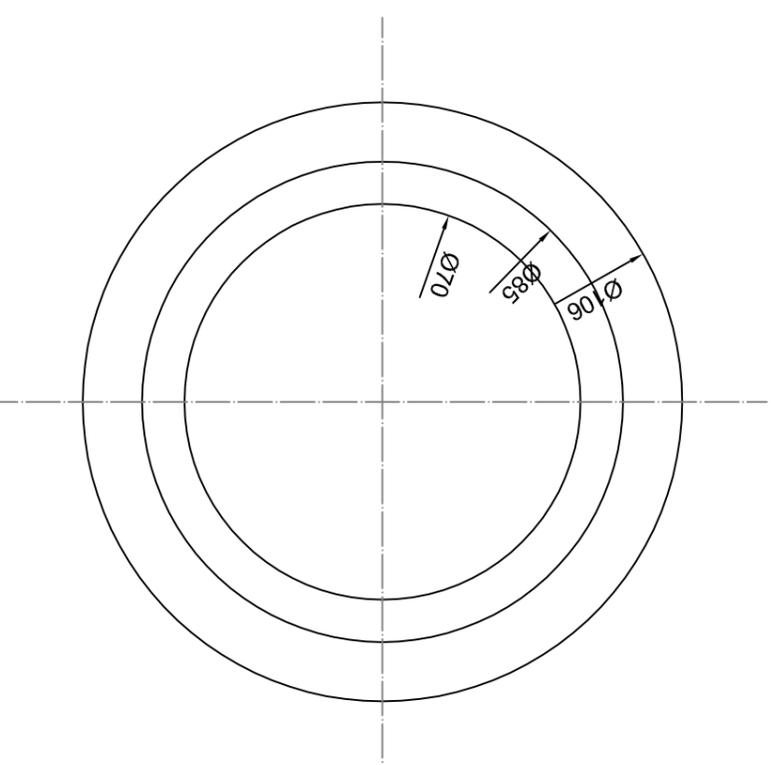
	Fecha	Nombre	Firma	Material: AISI 1020	Cantidad: 1
Proyectado		Gomez/Villegas		Contiene: ANILLO DE CHAVETA	Escala: 1:1
Revisado		Ing. Suntaxi C.			
Dibujado		Gomez/Villegas			
Aprobado		Ing. Naranjo C.			
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA				Código: EX-11	
				Sustituye a:	Hoja: 11/15



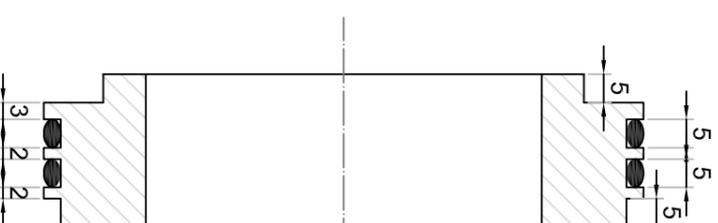
ARANDELA RETENEDOR - VISTA FRONTAL
ESCALA 1:1.25



ARANDELA RETENEDOR - VISTA LATERAL
ESCALA 1:1.25

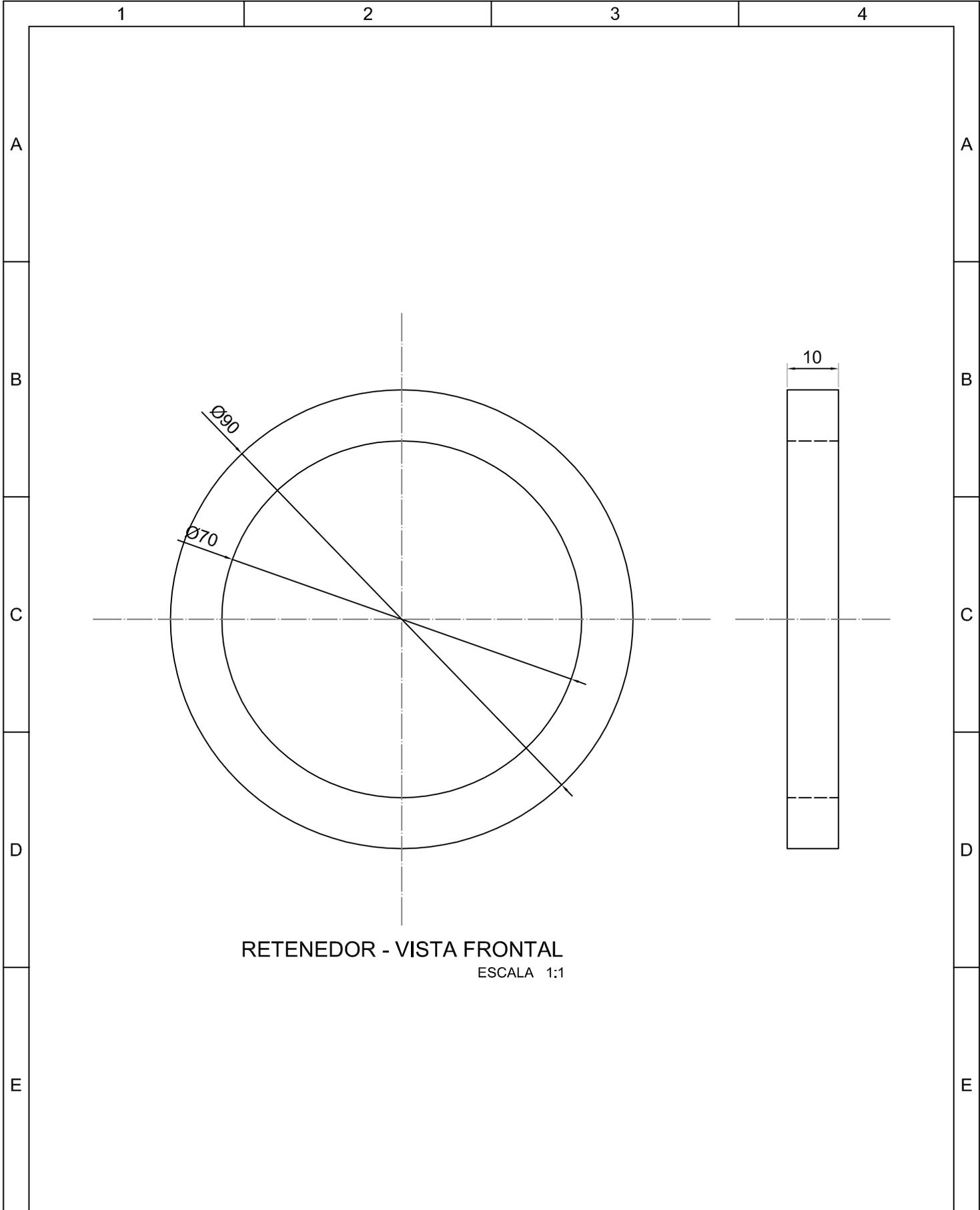


ARANDELA RETENEDOR - VISTA TRASERA
ESCALA 1:1.25



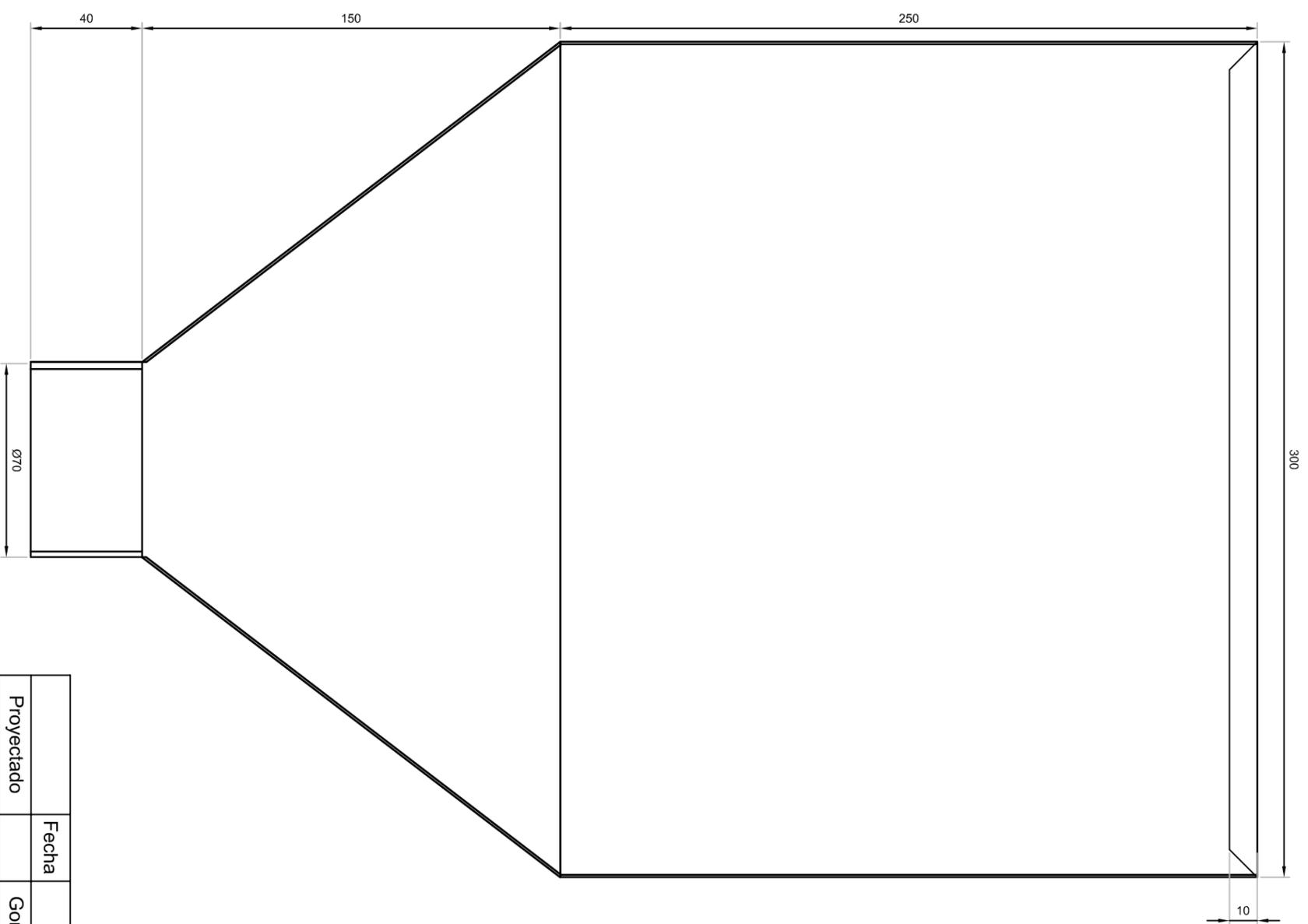
CORTE A -A
ESCALA 1:1.25

Proyectado	Fecha	Nombre	Firma	Material:	Cantidad:
Revisado		Gomez/Villegas		FUNDICIÓN GRIS	1
Dibujado		Ing. Suntaxi C.		Contiene:	ESCALA:
Aprobado		Gomez/Villegas		ARANDELA RETENEDOR	1:1.25
		Ing. Naranjo C.		Código:	
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO				EX-12	
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA				Sustituye a:	
					Hoja: 12/15



RETENEDOR - VISTA FRONTAL
 ESCALA 1:1

	Fecha	Nombre	Firma	Material:	Cantidad:
Proyectado		Gomez/Villegas			1
Revisado		Ing. Suntaxi C.		Contiene:	Escala:
Dibujado		Gomez/Villegas		RETENEDOR	1:1
Aprobado		Ing. Naranjo C.			
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO				Código:	
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA				EX-13	
				Sustituye a:	Hoja: 13/15

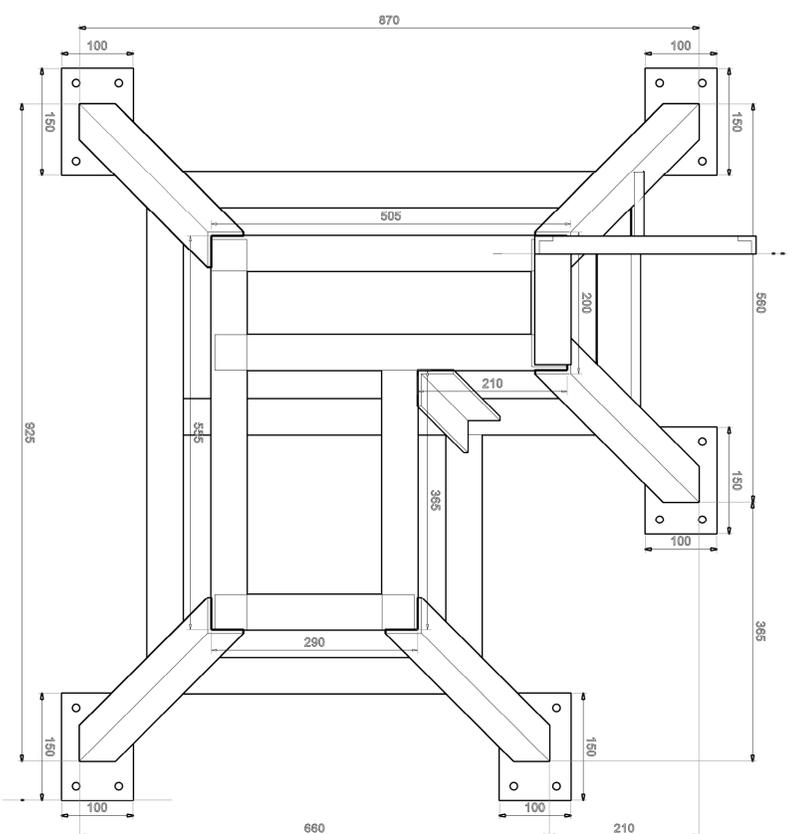


- NOTAS:**
- * Tol negro espesor 0.9 mm
 - * Traslapes de 10 mm cada una
 - * Unión tubo con plancha con soldadura

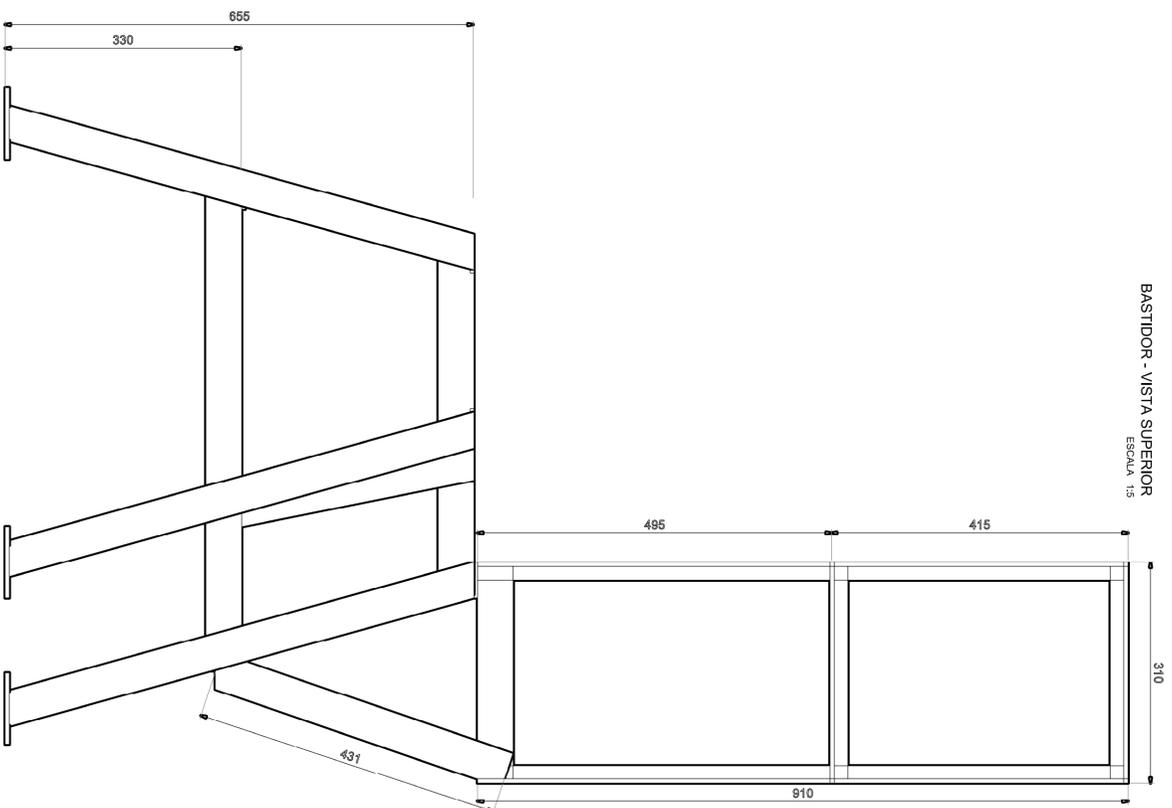
Proyectado	Fecha	Nombre	Firma	Material:	Cantidad:
		Gomez/Villegas		TOL NEGRO	1
Revisado		Ing. Suntaxi C.		Contiene:	Escala:
Dibujado		Gomez/Villegas		TOLVA DE ALIMENTACIÓN	1:2
Aprobado		Ing. Naranjo C.		Código:	

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO		Código: EX-14	Hoja: 14/15
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA			
Sustituye a:			

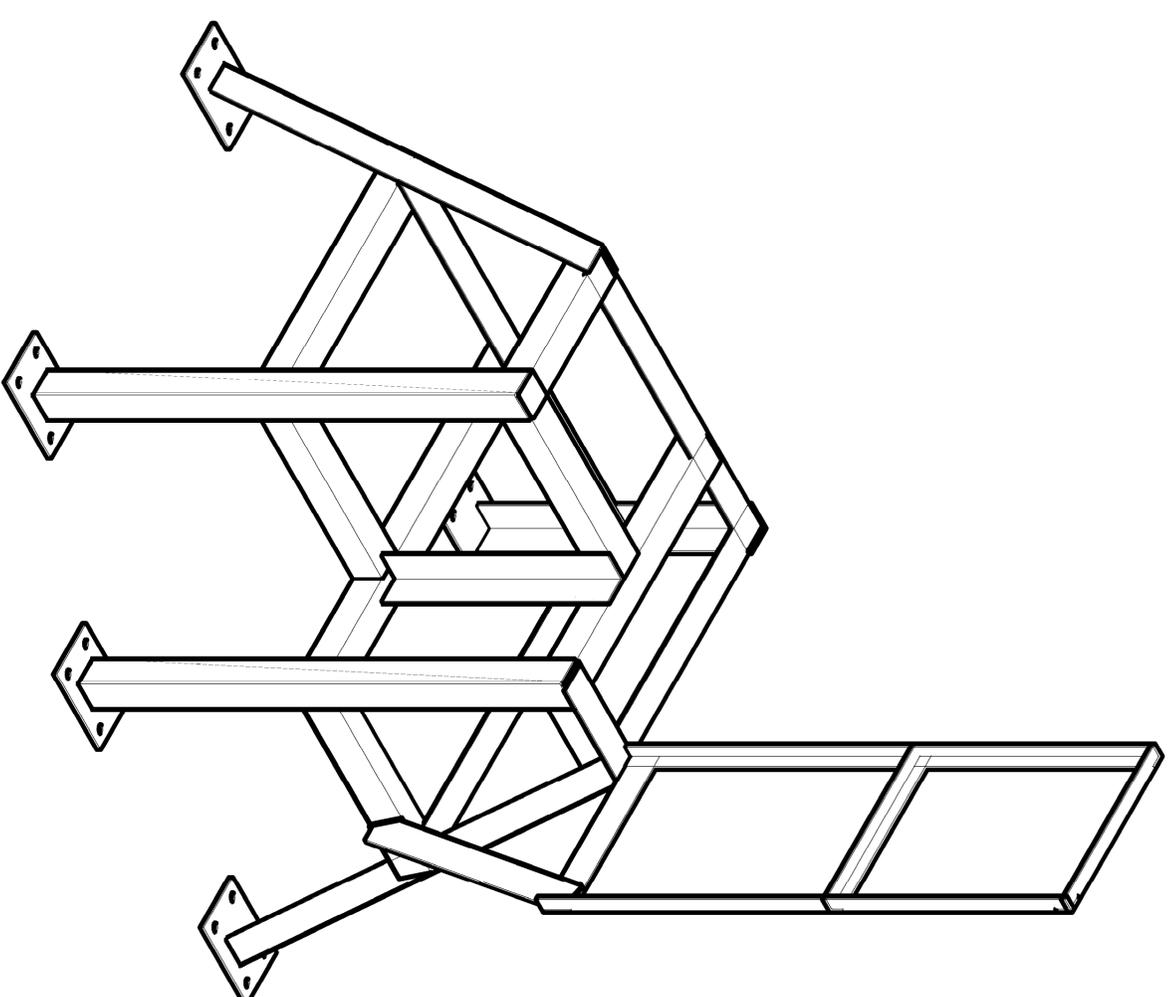




BASTIDOR - VISTA SUPERIOR
ESCALA 1:5



BASTIDOR - VISTA FRONTAL
ESCALA 1:5



BASTIDOR - ISOMETRIA
ESCALA 1:5

Proyectado	Nombre	Fecha	Material	Cantidad
Proyectado	Gomez/Milegas		ANGULO 2"	1
Revisado	Ing. Sumaxi C.			
Dibujado	Gomez/Milegas		BASTIDOR	1:5
Aprobado	Ing. Naranjo C.			

ESCUOLA POLITECNICA DEL EJERCITO

CARRERA DE INGENIERIA MECANICA

Código: EX-15

Substuye a:



Hoja: 15/15