



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO MECATRÓNICO**

**TEMA: “DISEÑO, FABRICACIÓN Y AUTOMATIZACIÓN DE UNA
MÁQUINA EXTRUSORA DE JABÓN ARTESANAL PARA LA EMPRESA
APAÍKA”**

AUTOR: GALINDO RODRÍGUEZ, RAMIRO ALEJANDRO

DIRECTOR: ING. OLMEDO SALAZAR, JOSÉ FERNANDO

SANGOLQUÍ

2020



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, "DISEÑO, FABRICACIÓN Y AUTOMATIZACIÓN DE UNA MÁQUINA EXTRUSORA DE JABÓN ARTESANAL PARA LA EMPRESA APAIKA" fue realizado por el señor **Galindo Rodríguez, Ramiro Alejandro** el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 15 de enero del 2020.

Firma



Ing. **Ólmedo Salazar, José Fernando**

C.C.: 1708186307



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Galindo Rodríguez, Ramiro Alejandro**, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“Diseño, fabricación y automatización de una máquina extrusora de jabón artesanal para la empresa Apaika”**, es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 15 de enero del 2020.

Firma

Galindo Rodríguez, Ramiro Alejandro

C.C.: 2100382122



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN

Yo, **Galindo Rodríguez, Ramiro Alejandro** autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“Diseño, fabricación y automatización de una máquina extrusora de jabón artesanal para la empresa Apaika”**, en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 15 de enero del 2020.

Firma

Galindo Rodríguez, Ramiro Alejandro

C.C.: 2100382122

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
RESUMEN.....	xx
ABSTRACT.....	xxi
CAPÍTULO 1	1
1.1. INTRODUCCIÓN.	1
1.2. ANTECEDENTES.	3
1.2.1. UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE.	3
1.2.2. EMPRESA APAIKA.	5
1.3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.	6
1.4. OBJETIVOS.	9
1.4.1. GENERAL.	9
1.4.2. ESPECÍFICOS.	9
1.5. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.	10
1.6. ALCANCE DEL PROYECTO.	11
1.6.1. Ensamble.	16
1.6.2. Automatización.	17
1.7. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO.	18
CAPÍTULO 2	20
2.1. MÁQUINAS DE EXTRUSIÓN.	20
2.2. MÁQUINA EXTRUSORA DE UN HUSILLO.	25

2.3. COMPONENTES DE UNA MÁQUINA EXTRUSORA.	29
2.3.1. Husillo o tornillo de extrusión.....	30
2.3.2. Cilindro o barril de extrusión.	36
2.3.3. Garganta de alimentación.	39
2.3.4. Tolva de alimentación.	40
2.3.5. Plato rompedor y filtros.....	43
2.3.6. Cabezal y boquilla.	44
2.4. PROCESO DE EXTRUSIÓN.	48
2.4.1. Transporte del material sólido hacia la zona de fusión.	51
2.4.2. Fusión o plastificación del material.	58
2.4.3. Bombeo y dosificación del material.....	63
2.4.4. Mezclado del material.....	69
2.4.5. Desgasificado.....	71
2.4.6. Conformado.....	72
2.5. ESTUDIO DEL ARTE.	75
2.6. EL JABÓN ARTESANAL	85
2.7. PROCESO DE ELABORACIÓN DEL JABÓN ARTESANAL.	89
2.8. PROPIEDADES DEL JABÓN ARTESANAL DE APAIKA.	92
CAPÍTULO 3	98
3.1. METODOLOGÍA.	98
3.2. PLANEACIÓN DEL PRODUCTO.	100
3.2.1. Identificación de oportunidades.....	100
3.2.2. Evaluación del proyecto.....	101

3.2.3. Asignación de recursos y planeación de tiempos.	105
3.2.4. Definición de la planeación del anteproyecto.	107
3.3. IDENTIFICACIÓN DE NECESIDADES.	108
3.3.1. Recopilación de datos sin procesar de los clientes.	109
3.3.2. Interpretación de datos sin procesar.	115
3.3.3. Organización de las necesidades en una jerarquía.	117
3.3.4. Establecimiento de la importancia relativa de las necesidades.	119
3.4. ESPECIFICACIONES DEL PRODUCTO.	120
3.4.1. Elaboración de la lista de métricas.	121
3.4.2. Matriz de comparación necesidades vs métricas.	123
3.4.3. Benchmarking con la competencia.	125
3.4.4. Benchmarking basado en la de satisfacción de las necesidades.	127
3.4.5. Valores objetivo ideales y marginalmente aceptables.	129
3.4.6. Desarrollo de modelos técnicos del producto.	131
3.4.7. Desarrollo de un modelo de costo del producto.	133
3.4.8. Refinamiento de las especificaciones.	135
3.4.9. Evaluación de las especificaciones.	137
3.4.10. Establecimiento de las especificaciones finales.	137
3.5. GENERACIÓN DE CONCEPTOS.	140
3.5.1. Aclaración del problema.	140
3.5.2. Búsqueda externa.	143
3.5.3. Búsqueda interna.	155
3.5.4. Exploración sistemática.	157

3.6. SELECCIÓN DEL CONCEPTO.	162
3.6.1. Filtrado de conceptos.	163
3.6.2. Evaluación de conceptos.	168
3.7. PRUEBA DE CONCEPTO.	172
3.7.1. Definición del propósito de la prueba de concepto.	173
3.7.2. Definición de la población a encuestar.	174
3.7.3. Selección de un formato de encuesta.	174
3.7.4. Comunicación del concepto.	175
3.7.5. Medición de la respuesta del cliente.	177
3.7.6. Interpretación de los resultados.	178
CAPÍTULO 4.	180
4.1. DISEÑO MECÁNICO DE LOS ELEMENTOS.	180
4.1.1. Diseño del husillo de extrusión.	180
4.1.2. Selección de los rodamientos.	246
4.1.3. Selección de la caja reductora.	259
4.1.4. Diseño del cilindro o barril de extrusión.	262
4.1.5. Diseño de la Tolva de alimentación.	267
4.1.6. Diseño del plato rompedor.	271
4.1.7. Diseño del soporte estructural o bastidor.	273
4.2. DISEÑO E INGENIERÍA ASISTIDOS POR COMPUTADOR (CAD/CAE).	285
4.2.1. Husillo de extrusión.	285
4.2.2. Cilindro o barril de extrusión.	288
4.2.3. Tolva de alimentación.	292

4.2.4. Plato rompedor.	293
4.2.5. Cabezal y boquilla de extrusión.	296
4.2.6. Soporte estructural o bastidor.	300
4.3. SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES ELÉCTRICOS, ELECTRÓNICOS Y ELECTROMECÁNICOS.	303
4.3.1. Selección del Motor.	305
4.3.2. Selección del variador de velocidad.	306
4.3.3. Selección de las luces piloto.	307
4.3.4. Selección de los elementos de maniobra y control.	308
4.3.5. Selección del disyuntor.	312
4.3.6. Selección y diseño del gabinete de control.	313
CAPÍTULO 5.	317
5.1. FABRICACIÓN DE LOS ELEMENTOS.	317
5.1.1. Fabricación del soporte estructural o bastidor.	317
5.1.2. Fabricación del Cilindro o barril de extrusión.	318
5.1.3. Fabricación de la Tolva de alimentación.	318
5.1.4. Fabricación del plato rompedor.	319
5.1.5. Fabricación de la Brida motorreductor – cilindro.	320
5.1.6. Fabricación de la tuerca de ajuste.	320
5.1.7. Fabricación de la boquilla de extrusión.	321
5.1.8. Fabricación de husillo extrusor.	322
5.2. ENSAMBLE.	322
5.3. PRUEBAS Y RESULTADOS.	323

CAPÍTULO 6.	325
6.1. COSTOS INDIRECTOS.	325
6.2. COSTOS DIRECTOS.	325
6.3. COSTO TOTAL.	330
CAPÍTULO 7	331
CONCLUSIÓN	331
BIBLIOGRAFÍA.	334
ANEXOS	338

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Espacios típicos entre el tornillo y barril en función del tamaño del tornillo</i>	37
Tabla 2 <i>Tipos de mezcladores, ventajas y desventajas</i>	70
Tabla 3 <i>Comparación entre la producción artesanal e industrial de jabón</i>	87
Tabla 4. <i>Parámetros de la máquina para prueba reológica</i>	94
Tabla 5. <i>Resultados promedio de las cuatro pruebas reológicas llevadas</i>	96
Tabla 6. <i>Mapa de tecnología de la máquina extrusora de jabón artesanal</i>	103
Tabla 7. <i>Declaración de la misión</i>	107
Tabla 8. <i>Tabla de entrevista a un cliente líder</i>	110
Tabla 9. <i>Tabla de entrevista al cliente (representante de Apaika)</i>	111
Tabla 10. <i>Tabla de observación 1</i>	113
Tabla 11. <i>Tabla de observación 2</i>	114
Tabla 12. <i>Lista de necesidades del cliente interpretadas</i>	116
Tabla 13 <i>Lista jerárquica de necesidades primarias y secundarias del cliente</i>	118
Tabla 14 <i>Listado de necesidades del cliente definitivo</i>	119
Tabla 15 <i>Lista de métricas para la máquina extrusora de jabón artesanal</i>	122
Tabla 16 <i>Matriz de comparación necesidades vs métricas</i>	124
Tabla 17 <i>Benchmarking con la competencia basado en métricas</i>	125
Tabla 18 <i>Benchmarking con la competencia basado en la percepción</i>	127
Tabla 19 <i>Lista de especificaciones objetivo</i>	129
Tabla 20 <i>Estimación de costos del producto</i>	134
Tabla 21 <i>Especificaciones finales del producto</i>	138
Tabla 22 <i>Tabla de entrevista a un experto en mecanismos</i>	144

Tabla 23 <i>Tabla de entrevista a un experto en automatización.</i>	146
Tabla 24 <i>Tabla de generación de conceptos basado en búsqueda interna.</i>	156
Tabla 25 <i>Tabla de combinación de conceptos para flujo de energía 1.</i>	159
Tabla 26 <i>Tabla de combinación de conceptos para flujo de energía 2.</i>	160
Tabla 27 <i>Tabla de combinación de conceptos para flujo de material 1.</i>	160
Tabla 28 <i>Tabla de combinación de conceptos para flujo de material 2.</i>	161
Tabla 29 <i>Tabla de combinación de conceptos para flujo de señal 1.</i>	161
Tabla 30 <i>Tabla de combinación de conceptos para flujo de señal 2.</i>	162
Tabla 31 <i>Tabla de filtrado de conceptos para el subproblema de hacer girar.</i>	164
Tabla 32 <i>Tabla de filtrado de conceptos para el subproblema de almacenar</i>	165
Tabla 33 <i>Tabla de filtrado de conceptos para el subproblema de</i>	167
Tabla 34 <i>Matriz de evaluación de conceptos para el subproblema de</i>	169
Tabla 35 <i>Matriz de evaluación de conceptos para el subproblema de</i>	170
Tabla 36 <i>Definición de conceptos para cada subproblema.</i>	171
Tabla 37 <i>Parámetros geométricos del husillo, en [mm].</i>	187
Tabla 38 <i>Valores geométricos de las zonas del husillo.</i>	206
Tabla 39 <i>Valores geométricos de los filetes del husillo.</i>	208
Tabla 40 <i>Matriz de decisión para la elección de un mezclador.</i>	245
Tabla 41 <i>Variables de control y potencia.</i>	305
Tabla 42 <i>Costos misceláneos.</i>	325
Tabla 43 <i>Costos de taller.</i>	326
Tabla 44 <i>Costos de materiales y dispositivos.</i>	326
Tabla 45 <i>Costos de contratación de siervivos.</i>	329

Tabla 46 <i>Costos de mano de obra</i>	330
Tabla 47 <i>Costo total</i>	330

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> a. Masa de jabón en molde de madera.....	6
<i>Figura 2.</i> Partes fundamentales de una máquina extrusora.....	12
<i>Figura 3.</i> Tolva de sección rectangular.....	13
<i>Figura 4.</i> a. Zonas del husillo y evolución de la presión. b. Husillo de extrusión.	15
<i>Figura 5.</i> Ejemplo de tornillos para diferentes aplicaciones.	15
<i>Figura 6.</i> Máquina extrusora de jabón de tamaño.....	17
<i>Figura 7.</i> Tipos de extrusoras.....	23
<i>Figura 8.</i> Extrusora de un husillo.	28
<i>Figura 9.</i> Componentes generales de una máquina extrusora.....	29
<i>Figura 10.</i> a. Características del husillo de extrusión.....	31
<i>Figura 11.</i> Sistema cilindro-husillo de extrusión.....	36
<i>Figura 12.</i> Garganta de alimentación.....	40
<i>Figura 13.</i> Tipos de tolvas de alimentación.....	41
<i>Figura 14.</i> Tornillo de alimentación tipo Cramer.....	42
<i>Figura 15.</i> Plato rompedor.	44
<i>Figura 16.</i> Boquilla anular y cabezal.	45
<i>Figura 17.</i> Partes de una boquilla de extrusión.....	47
<i>Figura 18.</i> Datos típicos de extrusión.....	47
<i>Figura 19.</i> Máquina de extrusión de un husillo para	50
<i>Figura 20.</i> Flujo del material en una tolva de alimentación.	52
<i>Figura 21.</i> Diseño del husillo para reducir el coeficiente de fricción.	56

<i>Figura 22.</i> Representación del caudal de salida frente a la presión.	57
<i>Figura 23.</i> Corte transversal de la extrusora en la zona de transición.....	59
<i>Figura 24.</i> Ancho del pozo de fundido a lo largo de la zona de transición.....	60
<i>Figura 25.</i> Relación entre la longitud de fusión y la temperatura.....	61
<i>Figura 26.</i> Efecto del ángulo de hélice y del número de filetes.....	62
<i>Figura 27. a.</i> Perfil de velocidades originado por el flujo de arrastre.	65
<i>Figura 28.</i> Movimiento global del material fundido en la sección de.....	66
<i>Figura 29.</i> Movimiento del material dentro del canal de la extrusora.....	67
<i>Figura 30.</i> Corte transversal del canal del husillo con las diferentes	68
<i>Figura 31.</i> Hinchamiento debido a la relajación de un material de sección cuadrada.	73
<i>Figura 32.</i> Contracción debida al enfriamiento de un material de sección cuadrada.....	74
<i>Figura 33.</i> Pequeña máquina extrusora de	76
<i>Figura 34.</i> Pequeña máquina extrusora de jabón	77
<i>Figura 35.</i> Máquina extrusora de filamentos para impresoras 3D.....	78
<i>Figura 36.</i> Máquina extrusora de plástico con calentamiento eléctrico	81
<i>Figura 37.</i> Extrusora monohusillo DREX 120-55 para compounding de Ropllepaal.	84
<i>Figura 38. a.</i> Jabón de Almonas, también conocido como jabón “de Castilla”.....	86
<i>Figura 39.</i> Jabones comerciales más populares en Latinoamérica.	88
<i>Figura 40.</i> Reacción de Saponificación.	90
<i>Figura 41.</i> Proceso de elaboración del jabón artesanal en Apaika.	91
<i>Figura 42.</i> Prueba reológica llevada a cabo con	94
<i>Figura 43.</i> Máquina para pruebas reológicas del	95
<i>Figura 44.</i> Variedad de jabones artesanales de Apaika.....	97

<i>Figura 45.</i> Dimensiones de los jabones artesanales de Apaika, en mm.	97
<i>Figura 46.</i> Proceso genérico de desarrollo del producto.	98
<i>Figura 47.</i> Ciclo de mejoramiento continuo en el proceso de desarrollo.....	99
<i>Figura 48.</i> Diagrama de Gantt del proyecto.	106
<i>Figura 49.</i> Modelo técnico del torque del motor.	132
<i>Figura 50.</i> Modelo técnico de la capacidad de producción.....	133
<i>Figura 51.</i> Mapa competitivo del motor con curva de concesión.....	136
<i>Figura 52.</i> QFD de la máquina extrusora de jabón artesanal.	139
<i>Figura 53.</i> Caja negra que surge de la descomposición funcional del problema.....	141
<i>Figura 54.</i> Refinamiento y descomposición del problema en.....	142
<i>Figura 55.</i> Extrusora para la conformación de piezas cerámicas.....	147
<i>Figura 56.</i> Extrusora de película de plástico.	147
<i>Figura 57.</i> Extrusora para el procesamiento de alimentos.	148
<i>Figura 58.</i> Extrusora doble para ladrillos.	148
<i>Figura 59.</i> Extrusora de un husillo con accionamiento electromecánico.....	149
<i>Figura 60.</i> Extrusora con accionamiento hidráulico.	150
<i>Figura 61.</i> Extrusora con calentamiento eléctrico por inducción.	151
<i>Figura 62.</i> Máquina extrusora para plásticos.	152
<i>Figura 63.</i> Máquina extrusora del laboratorio de Mecánica de Materiales del DECEM.....	152
<i>Figura 64.</i> Máquina extrusora de jabón marca Small Soap Machines.	153
<i>Figura 65.</i> Molino industrial de grano marca Agrotierra.	154
<i>Figura 66.</i> Molino industrial de carne marca BBG.....	155
<i>Figura 67.</i> Sistema de calentamiento de una impresora 3D.	155

<i>Figura 68.</i> Árbol de clasificación de conceptos para el subproblema	158
<i>Figura 69.</i> Árbol de clasificación de conceptos para el subproblema de.....	158
<i>Figura 70.</i> Árbol de clasificación de conceptos para el subproblema de.....	159
<i>Figura 71.</i> Escala de evaluación para la etapa de evaluación de conceptos.	168
<i>Figura 72.</i> Interacción personal con el gerente general de Apaika.	174
<i>Figura 73.</i> Bosquejo de la máquina extrusora de jabón.....	176
<i>Figura 74.</i> Ilustración de la máquina extrusora de jabón	176
<i>Figura 75.</i> Modelo renderizado de la máquina extrusora.....	177
<i>Figura 76.</i> Medición de la respuesta de gerente general de Apaika.	178
<i>Figura 77.</i> Modelo renderizado definitivo de la máquina.....	179
<i>Figura 78.</i> Segmento de un cilindro con husillo de un solo canal.....	181
<i>Figura 79.</i> Vista frontal de la boquilla de extrusión.	185
<i>Figura 80.</i> Esquema de la forma geométrica de la cabeza perfiladora.	191
<i>Figura 81.</i> Gráfica de Viscosidad vs Tiempo de las 4 pruebas reológicas realizadas.	199
<i>Figura 82.</i> Triángulo rectángulo para el cálculo de la longitud del filete.....	208
<i>Figura 83.</i> Sección del filete.....	209
<i>Figura 84.</i> Diagrama de fuerzas del husillo.....	216
<i>Figura 85.</i> Diagrama de cuerpo libre del husillo.	227
<i>Figura 86.</i> Diagrama de momento flector del husillo.	227
<i>Figura 87.</i> Diagrama del torque a lo largo del husillo.	228
<i>Figura 88.</i> Esquema del muñón del husillo.	229
<i>Figura 89.</i> Diagrama para el cálculo del factor de.....	231
<i>Figura 90.</i> Diagrama para el cálculo del factor de.....	231

<i>Figura 91.</i> Diagrama para el cálculo de sensibilidad a la.....	233
<i>Figura 92.</i> Parámetros en el factor de la condición superficial de Marin.....	235
<i>Figura 93.</i> Factores de confiabilidad correspondientes a 8 desviaciones.....	237
<i>Figura 94.</i> Dimensiones nominales de la chaveta.....	240
<i>Figura 95.</i> Dimensiones en pulgadas de algunas aplicaciones.....	241
<i>Figura 96.</i> Factores de cálculo para los rodamientos rígidos de bolas.....	248
<i>Figura 97.</i> Valores del factor de ajuste de la vida útil.....	249
<i>Figura 98.</i> Diagrama para el cálculo de la viscosidad nominal.....	251
<i>Figura 99.</i> Diagrama de la temperatura de la viscosidad.....	252
<i>Figura 100.</i> Factores para determinar los niveles de contaminación de.....	253
<i>Figura 101.</i> Factor aSKF para rodamientos radiales de bolas.....	255
<i>Figura 102.</i> Valores orientativos para la vida útil de diferentes tipos de máquinas.....	256
<i>Figura 103.</i> Factores de aplicación de la carga.....	257
<i>Figura 104.</i> Ajustes recomendados para los rodamientos SKF de acuerdo al.....	259
<i>Figura 105.</i> Tiempo aproximado para alcanzar el rendimiento dinámico.....	261
<i>Figura 106.</i> Esfuerzos en un cilindro presurizado de pared delgada.....	263
<i>Figura 107.</i> Estado de esfuerzos y círculo de Mohr del cilindro de extrusión.....	265
<i>Figura 108.</i> Esquema de la vista superior de la garganta de alimentación.....	267
<i>Figura 109.</i> Diseño de la tolva de alimentación.....	271
<i>Figura 110.</i> Diseño del plato rompedor.....	272
<i>Figura 111.</i> Soporte estructural o bastidor.....	275
<i>Figura 112.</i> Soporte estructural o bastidor con tableros.....	276
<i>Figura 113.</i> Junta empernada entre el motorreductor y el bastidor.....	277

<i>Figura 114.</i> Diagrama de cuerpo libre de la junta empernada.	282
<i>Figura 115.</i> Husillo de extrusión.....	286
<i>Figura 116.</i> Cargas en el husillo de extrusión.....	286
<i>Figura 117.</i> Esfuerzo total en husillo de extrusión.	287
<i>Figura 118.</i> Flecha máxima de husillo de extrusión.....	288
<i>Figura 119.</i> Barril de extrusión.	289
<i>Figura 120.</i> Cargas en el barril de extrusión.	289
<i>Figura 121.</i> Esfuerzo total en el barril de extrusión.....	290
<i>Figura 122.</i> Desplazamiento total en el barril de extrusión.....	291
<i>Figura 123.</i> Factor de seguridad en el barril de extrusión.	292
<i>Figura 124.</i> Tolva de alimentación.....	293
<i>Figura 125.</i> Plato rompedor.	293
<i>Figura 126.</i> Esfuerzo total en el plato rompedor.	294
<i>Figura 127.</i> Desplazamiento máximo en el plato rompedor.	295
<i>Figura 128.</i> Factor de seguridad en el plato rompedor.	296
<i>Figura 129.</i> Diseño del cabezal y boquilla de extrusión.	297
<i>Figura 130.</i> Esfuerzo total en el cabezal y boquilla de extrusión.....	298
<i>Figura 131.</i> Desplazamiento máximo en el cabezal y boquilla de extrusión.	299
<i>Figura 132.</i> Factor de seguridad en el cabezal y boquilla de extrusión.....	300
<i>Figura 133.</i> Esfuerzo total en el bastidor.	301
<i>Figura 134.</i> Desplazamiento máximo en el bastidor.....	302
<i>Figura 135.</i> Factor de seguridad en el bastidor.....	303
<i>Figura 136.</i> Circuito de control y potencia.	304

<i>Figura 137.</i> Motor trifásico línea W22 marca Weg carcasa 90S.....	306
<i>Figura 138.</i> Luz piloto marca RS Pro.	308
<i>Figura 139.</i> Conmutador de 3 posiciones.....	309
<i>Figura 140.</i> Potenciómetro rotatorio de tambor.....	310
<i>Figura 141.</i> Perilla para potenciómetro.....	311
<i>Figura 142.</i> Pulsador paro de emergencia.	312
<i>Figura 143.</i> Disyuntor 2 polos marca Scheider Electric.	313
<i>Figura 144.</i> Gabinete eléctrico metálico.	314
<i>Figura 145.</i> Distribución de la placa doble fondo.	316
<i>Figura 146.</i> Distribución de los elementos de maniobra	316
<i>Figura 147.</i> Soporte estructural o bastidor.	317
<i>Figura 148.</i> Cilindro o barril de extrusión.....	318
<i>Figura 149.</i> Tolva de alimentación.....	319
<i>Figura 150.</i> Plato rompedor.	319
<i>Figura 151.</i> Brida motorreductor – cilindro.	320
<i>Figura 152.</i> Tuerca de ajuste.....	321
<i>Figura 153.</i> Boquilla de extrusión.	321
<i>Figura 154.</i> Husillo extrusor.....	322
<i>Figura 155.</i> Ensamble Máquina extrusora de jabón.	323
<i>Figura 156.</i> Jabón extruido a través del plato rompedor.....	323
<i>Figura 157.</i> Jabón extruido.	324

RESUMEN

Se diseñó, previo un estudio reológico del jabón de la empresa Apaika, una máquina extrusora capaz de extruir jabón en las dimensiones estandarizadas por la mencionada empresa. Se inició con un estudio teórico de las partes y funcionamiento de máquinas extrusoras de plástico, en su mayoría, ya que no se encontró literatura respecto a extrusoras de jabón. Seguido de un estudio del arte y de un proceso de diseño y desarrollo del producto, el cual dio como resultado las bases conceptuales de la máquina. Luego se realizó el diseño a detalle, en donde se diseñó cada uno de los miembros mecánicos y se describió el proceso de selección de dispositivos eléctricos y electromecánicos, con el fin de zanjar el prototipo de la extrusora. Finalmente, de acuerdo a lo anterior, se fabricó y adquirió cada una de las partes, se ensambló y se llevó a cabo las pruebas.

PALABRAS CLAVE:

- **EXTRUSORA DE UN HUSILLO**
- **HUSILLO DE EXTRUSIÓN**
- **REOLOGÍA**
- **JABÓN ARTESANAL**
- **POTENCIA**

ABSTRACT

It was designed, prior to a rheological study of the Apaika company soap, an extruder machine capable of extruding soap in the dimensions standardized by the aforementioned company. It began with a theoretical study of the parts and operation of plastic extruders, mostly, since no literature was found regarding soap extruders. Followed by an art study and a product design and development process, which resulted in the conceptual basis of the machine. Then the design was carried out in detail, where each of the mechanical members was designed and the process of selecting electrical and electromechanical devices was described, in order to ditch the prototype of the extruder. Finally, according to the above, each of the parts was manufactured and acquired, assembled and the tests carried out.

KEYWORDS:

- **EXTRUDER OF A SPINDLE**
- **EXTRUSION SPINDLE**
- **RHEOLOGY**
- **HANDCRAFTED SOAP**
- **POWER**

CAPÍTULO 1

PERFIL

1.1. INTRODUCCIÓN.

Las máquinas extrusoras son mecanismos que han sido utilizados en todo el mundo desde principios del siglo XIX para la fabricación de tuberías de plomo (Gutiérrez Morales & Bornacelli Castillo, 2008). La experiencia obtenida en la extrusión de plomo promovió que ya en 1894 se aplicara en la fabricación de perfiles de latón (Capítulo 6. Extrusión [pdf], s. f.). En la actualidad se emplean para la trituración de materiales termoplásticos, formación de revestimientos delgados en papel, tela, cartón y para formar la envoltura aislante de alambres y cables eléctricos. También tienen aplicación en la fabricación de películas, láminas, mangueras, tubos; incluso, son utilizadas en ciertos procesos y reacciones químicas (Savgorodny, 1973).

En aplicaciones más actuales, las máquinas extrusoras son empleadas para la fabricación de pastas alimenticias, extrusión de biomasa, elementos cerámicos y extrusión de jabón. Siendo este último la aplicación que compete el caso de estudio del presente proyecto.

El jabón es una sal sódica o potásica, producto de la reacción química entre un álcali (hidróxido de sodio o potasio) y un lípido (Wade, 2004). Su empleo como producto

de limpieza y de higiene datan del 2800 a. C. (Gonzales M, 1975). Hoy en día, además de producto de limpieza e higiene, también es utilizado como biocida, humectante, mejorador de flujo, etc.¹

Desde la industrialización del jabón, este se ha empleado como producto de limpieza general y personal. A medida que la cultura de la higiene se introdujo en la sociedad, el uso de jabón se volvió más y más popular, provocando que se creen diferentes conceptos de este producto. Claros ejemplos son jabones redondos, cuadrados, en pastillas con formas personalizadas, con aroma, sin aroma, con aditamentos naturales, sintéticos; reguladores de PH, con aditamentos lácteos, entre otros.

La empresa Apaika, patrocinadora de este proyecto, aplica un concepto ecológico en sus jabones: fabrican jabones naturales sin ingredientes químicos. Promueven un proceso puramente artesanal, utilizando aceites esenciales y fragancias desarrolladas dentro de la empresa. Este año Apaika arrancó con un plan estratégico de crecimiento, dentro del cual se contempla un aumento de la producción de barras de jabón.

Tras un proceso de identificación de oportunidades dentro de Apaika, se determinó que la utilización de una máquina extrusora es la vía más rápida para automatizar el proceso de fabricación de jabón y, por lo tanto, para aumentar la

¹ Para mayor información visitar: <http://www.revista.unam.mx/vol.15/num5/art38/>

producción de la empresa. La meta es que la máquina extrusora sirva para la homogenización y extrusión del jabón.

El proceso de extrusión del jabón está conformado por dos etapas: el transporte del material hacia la zona de extrusión y la conformación del material al pasar por la cabeza perfiladora o boquilla, después de estar en un estado de semi-fusión. En este proceso continuo, el jabón es fundido por la acción de temperatura y fricción, y es presionado a través de un perfil que le proporciona una forma definida, y enfriado finalmente para que adquiera su forma de venta habitual.

En los siguientes capítulos estudiaremos más a fondo las máquinas extrusoras, el proceso de fabricación de jabón y sus características. También se llevará a cabo un estudio del arte, de esta manera podremos tener todo un escenario sobre el cual poder desarrollar el presente proyecto.

1.2. ANTECEDENTES.

1.2.1. UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE.

En la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE se han realizado varios proyectos de titulación que involucran la fabricación de una máquina extrusora. La aplicación varía en cada caso, desenvolviéndose principalmente en las áreas de:

- Extrusión de Plástico:
 - “Diseño y construcción de una máquina extrusora de filamentos de 1.75 mm y 3 mm para impresoras 3D, a partir de polímero reciclado.” Autores: (Ortiz Abata, Cristian Fabián, 2018)
 - “Diseño y construcción de una extrusora con capacidad de 1 kg/h, diseño del proceso y diseño del producto para el reciclaje mecánico del PET.” Autores: (Maldonado Castro, Mario Andrés; Medina Cajas, Christian Gabriel, 2008).

- Extrusión de biocombustible:
 - “Diseño y construcción de una micro extrusora experimental para la obtención de multicomcombustibles a partir de biomasa con capacidad de compactación de 0,2 kg.” Autores: (Salazar Martínez, Pablo Rolando; Villacrés Carrera, Andrés Mauricio, 2014).

- Extrusión de metal:

- “Diseño y construcción de una extrusora para conformado mecánico de alambre de aleación cobre-zinc 70-30, capacidad 3kg/h.” Autores: (Andrade Beltrán, María Isabel; Tamayo Pérez, Vinicio Rodrigo, 2008).

Aunque se ha trabajado en la extrusión de materiales orgánicos, no se ha indagado en el área de los productos de aseo de origen natural, como las barras de jabón utilizados para el aseo personal y que, para el efecto de este proyecto, se refieren a las fabricadas por la empresa Apaika.

El presente proyecto se centra en un nuevo segmento del mercado de máquinas extrusoras, en el cual es importante indagar las características propias de la aplicación.

1.2.2. EMPRESA APAIKA.

La empresa Apaika es una micro empresa que se dedica a la fabricación artesanal de jabones naturales. Su misión es fabricar jabones sin colorantes, perfumes ni espumantes, por ello utiliza materiales 100% naturales y los jabones son hechos a mano.

Tras obtener la masa inicial de jabón, Apaika le da forma a través de moldes de madera (Figura 1. a.), así, por ejemplo, se consigue una barra de jabón prismática de sección rectangular, que es la más común. El corte en partes iguales se realiza a mano mediante cuchillas de acero inoxidable (Figura 1. b.).

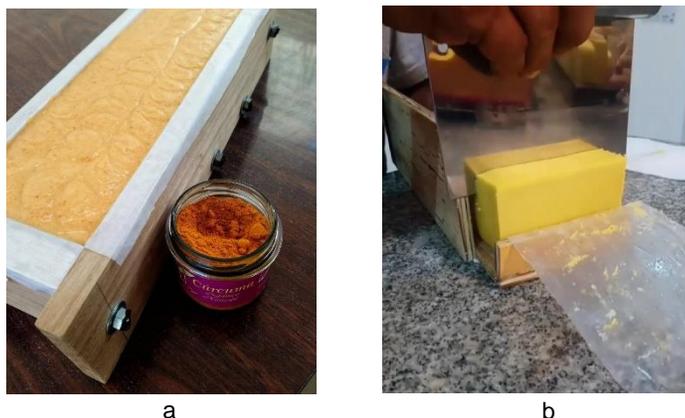


Figura 1. a. Masa de jabón en molde de madera.

b. Corte de jabón en partes iguales.

Fuente: @apaika_jabones, cuenta oficial de Instagram.

Adaptado de "Apaika_jabones", Apika, URL:

https://instagram.com/apaika_jabones?igshid=t2o42qukihez

Aunque el sistema de corte es preciso y fácil de llevar a cabo, también es lento y agotador a largo plazo. Es por ello que Apaika se ha planteado automatizar el proceso, con lo que se espera que tanto la exactitud del corte como la producción aumenten.

El presente proyecto propone la construcción de una máquina en la que se pueda volcar la masa inicial de jabón y seguidamente ejecutar el proceso de compresión, extrusión y corte en partes iguales. Para ello la máquina contará con una estructura sólida y compacta y, además, con una caja de control, con la que se podrá ajustar la temperatura y velocidad de extrusión.

1.3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.

Internet y las redes sociales en la actualidad son ingentes medios de difusión masiva, que más allá de compartir contenido multimedia son utilizados para comprar y vender productos y/o servicios. Gracias a la evolución de estas herramientas, se ha incrementado la posibilidad de montar negocios, empresas y microempresas sin necesidad de un gran capital, y con la posibilidad de entamar publicidad y vender online en todas las plataformas destinadas para ello, así como en las redes sociales y en todo el internet.

Como resultado de esta gran etapa en las tecnologías de la información y comunicación, el número de pequeñas y medianas empresas ha aumentado significativamente en la última década. Tal es la facilidad que incluso muchas de estas empresas son montadas y dirigidas desde casa, y poseen un número de empleados inferior a la decena. Este tipo de pequeños negocios son los más comunes en Ecuador.

La empresa Apaika no es la excepción. Apaika es un emprendimiento familiar que está categorizado por el MIPYMES como micro empresa. Se dedica principalmente a la fabricación artesanal de barras de jabón natural y su marca está registrada en la IEPI. Difunden sus jabones a través de catálogos digitales disponibles en varias redes sociales, y su venta se realiza a través del mismo medio. Es una empresa muy joven, pero ambiciosa, que se encuentra en desarrollo.

Como parte de su plan estratégico de desarrollo, Apaika se ha impuesto la misión de producir artesanalmente y ofrecer artículos de higiene personal como

jabones, utilizando materias primas de primera calidad y sin ingredientes químicos, de tal manera que los productos sean naturales y alineados con las buenas prácticas de manufactura y los procesos de la naturaleza. La visión de Apaika es ser un referente a nivel nacional y regional por su contribución a la fabricación de productos naturales, sin químicos, que fomenten una cultura del aseo personal natural.

La fabricación de jabón natural, de acuerdo a la filosofía de Apaika, es netamente artesanal. El principal concepto desarrollado, es el de una apariencia simple y un origen natural, sin químicos. Es por ello que el proceso de homogenización, conformado y corte es realizado a mano. Si bien esto va acorde con el concepto del producto y la filosofía de la empresa, se queda corto en términos de capacidad de producción, ya que cada lote de jabón supone una cantidad de tiempo y esfuerzo extenuantes. Lo que, por ahora, obstruye el crecimiento de Apaika y el cumplimiento de sus objetivos estratégicos.

Siguiendo el proceso de identificación de oportunidades dentro de la empresa, se identificó que una oportunidad excepcional para el aumento de producción de jabón es la automatización. La opción más viable para este fin es la utilización de una máquina extrusora. Una máquina extrusora de tamaño mediano está en capacidad de homogenizar y extruir el jabón en menos de la mitad del tiempo que un proceso manual. Esto ayudaría significativamente a que Apaika se desarrolle, crezca y cumpla con la visión contemplada en su plan estratégico.

Frente a lo anteriormente expuesto surge la siguiente interrogante de investigación: **¿En qué medida una máquina extrusora aumentaría la producción de jabón de la empresa Apaika, sin interferir en su filosofía y concepto del producto?**

1.4. OBJETIVOS.

1.4.1. GENERAL.

Diseñar, fabricar y automatizar una máquina extrusora de jabón artesanal para la empresa Apaika.

1.4.2. ESPECÍFICOS.

- Diseñar una estructura compacta y sólida que permita llevar a cabo un proceso continuo de extrusión de jabón.
- Escoger correctamente el material para la fabricación de la máquina, tomando en cuenta su aplicación.
- Diseñar correctamente el husillo de extrusión para mejorar la eficiencia del proceso de extrusión de jabón.
- Fabricar boquillas con diferentes formas para conseguir extruidos con distintos diseños.

- Dimensionar correctamente el motor de acuerdo a los requerimientos de torque y factor de seguridad impuestos.
- Implementar un tablero de control siguiendo la norma IEC 60529.

1.5. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.

En la actualidad, gracias a la gran variedad de tecnología y la altísima capacidad de procesadores y controladores, es mucho más sencillo implementar una aplicación automatizada (Mandado & Acevedo, 2009). Sin embargo, la desventaja de automatizar un proceso es que se consigue menos calidad en el producto final, pues se descuidan los detalles que solo procesos artesanales y manuales pueden salvaguardar.

Apaika aboga por una técnica puramente natural y artesanal para la fabricación de sus jabones. Su filosofía como empresa es ofrecer calidad natural y no cantidad artificial. Pero existe un problema: por medios manuales y puramente artesanales el producto tarda mucho tiempo en concretarse, y el proceso resulta extenuante tras varios lotes.

La importancia de la máquina extrusora de jabón radica en que facilitará los procesos de fabricación en cuanto al trabajo que demanda el dar forma al producto y a cortar el mismo en partes iguales, procesos que se buscan automatizar, sin que la calidad del producto final se vea comprometida (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

Adicionalmente esta máquina contribuirá a incrementar la capacidad de producción de la empresa, lo que permitirá que Apaika crezca en su desafío como empresa.

Es decir, la máquina extrusora será crucial porque permitirá que Apaika fabrique más lotes de jabón en menos tiempo, lo cual repercutirá en notables beneficios económicos para la empresa. Por otro lado, cabe recalcar que esta máquina no reemplazará a ningún empleado, ya que el proceso demanda que un operario sea el encargado de supervisar el correcto funcionamiento del proceso y, además, de cuidar los detalles finales del jabón.

1.6. ALCANCE DEL PROYECTO.

En la primera etapa del proyecto, se diseñará la estructura principal de la máquina, es decir se definirán la geometría y dimensiones de la cámara de acople, el vástago de extrusión, la tolva de alimentación, el cabezal y la boquilla. También se definirá la geometría y dimensión del tornillo de extrusión (Figura 2).

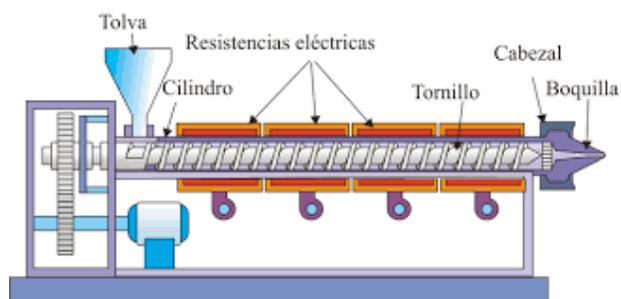


Figura 2. Partes fundamentales de una máquina extrusora.

Fuente: (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

Adaptado de "Tecnología de polímeros", Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012,
URL: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/16897/1/TEMA_4_extrusion.pdf

Para la cámara de acople se propone tentativamente un acople lineal entre el eje del motor y el husillo de extrusión. Esta configuración reduce costos de fabricación. El cilindro de extrusión debe ser de longitud reducida para asegurar una estructura compacta y menores esfuerzos de flexión (Norton, 2011). Su diámetro será del tamaño que se espera que sean los jabones y con pequeño espesor, para asegurar una buena transferencia de calor desde la resistencia eléctrica hasta la masa de jabón. La superficie interna debe ser lo bastante rugosa para aumentar las fuerzas de cizalla expuestas al jabón y permitir así que éste fluya a lo largo de la extrusora (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

La tolva de alimentación debe estar correctamente diseñada, de manera que asegure un flujo continuo de la masa de jabón. Para ello es recomendable utilizar tolvas de sección circular, sin embargo, son más caras y su fabricación es más complicada que las de sección rectangular (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012), (Figura 3). La

tolva se diseñará con bastante volumen de modo que pueda almacenar material para 2 horas de trabajo.

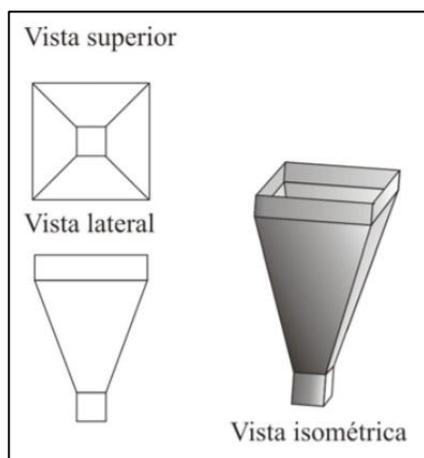


Figura 3. Tolva de sección rectangular.
Fuente: (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).
Adaptado de “Tecnología de polímeros”,
Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012,
URL:https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/16897/1/TEMA_4_extrusion.pdf

Finalmente, el cabezal debería ser diseñado para atornillarlo al final del vástago y para sujetar la boquilla. El cabezal debe asegurar que el flujo hacia la boquilla sea continuo en todo momento (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012), que se encargará de moldear la masa de jabón. Tanto el cabezal como la boquilla deben ser fácilmente desmontables.

Todas estas estructuras serán diseñadas con la ayuda de un software CAD, con el que se podrá simular la geometría y los detalles de ensamble de la máquina. Luego se analizarán los esfuerzos en cada una de las partes utilizando un software CAE, de

esta manera aseguraremos una buena resistencia de los elementos de la máquina para su correcto funcionamiento.

Por otro lado, el elemento que no se fabricará es el tornillo o husillo de extrusión, debido a su alta tecnología y gran complejidad. Se lo adquirirá por medio de un proveedor y para obtenerlo se deberán conocer el factor de compresión (RC) e imponernos un buen factor longitud-diámetro (L/D). Al final de su dimensionamiento determinaremos las diferentes secciones que comprende el husillo (Figura 4. a.).

El husillo consiste en un cilindro largo rodeado por una hélice con espesor determinado. Es uno de los elementos más importantes, ya que contribuye a realizar las funciones de transporte, calentamiento, fundición y mezcla de material (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012). Un husillo bien diseñado asegura la estabilidad del proceso y la calidad del producto final. Los parámetros geométricos más importantes del tornillo se presentan en la Figura 4. b.

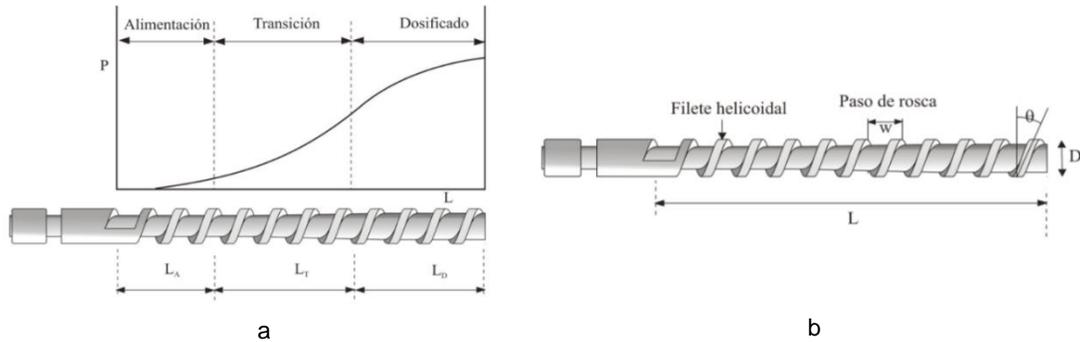


Figura 4. a. Zonas del husillo y evolución de la presión. b. Husillo de extrusión.
Fuente: (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

Adaptado de "Tecnología de polímeros", Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012,
URL: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/16897/1/TEMA_4_extrusion.pdf

También nos basaremos en una forma estándar de su configuración:

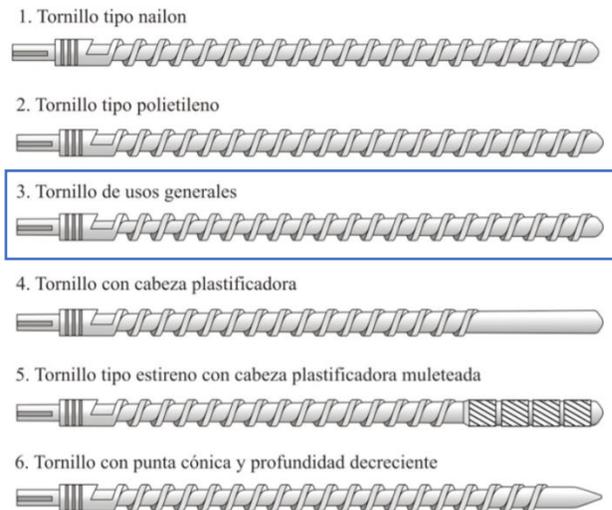


Figura 5. Ejemplo de tornillos para diferentes aplicaciones.

Fuente: (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

Adaptado de "Tecnología de polímeros", Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012,
URL: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/16897/1/TEMA_4_extrusion.pdf

El motor, que será el encargado de mover el husillo, se adquirirá por medio de un proveedor, luego de estudiar el requerimiento de potencia del proceso de extrusión.

1.6.1. Ensamble.

El ensamble será el proceso con menor carga horaria, ya que constará de la unión de todos los elementos y componentes previamente diseñados y adquiridos (ver Figura 2 y Figura 4). Se busca una estructura compacta y sólida, por lo tanto, se colocarán los componentes muy juntos, utilizando métodos temporales de sujeción como pernos y roscas (Budynas & Nisbeth J, 2012).

Se empezará con la unión del motor y el husillo. Se utilizará un acople lineal porque se deben evitar todo tipo de excentricidades que provoquen vibraciones. La presencia de ellas en el proceso de extrusión podría influir directamente en la calidad del producto final (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

El husillo debe ir dentro del cilindro. El cilindro debe estar bien sujeto. En la parte superior del cilindro debería haber un acople para ubicar la tolva, que se diseñará para que sea de fácil desmontaje. Para mejorar el proceso se analizará la posibilidad de incluir un tornillo Cramer dentro de la tolva (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

El cabezal irá al final del cilindro: contendrá a la boquilla y se espera que pueda montarse y desmontarse fácilmente. Al final irá el protector de la boquilla. Se espera que la estructura tenga una apariencia similar a la de la Figura 6.



Figura 6. Máquina extrusora de jabón de tamaño mediano (modelo).
Fuente: (Small Soap Machines, 2019).
Adaptado de “Small Soap Machines”, Small Soap Machines, s.f.,
URL: <http://www.smallsoapmachines.com/soap-extruder-se-98.html>

1.6.2. Automatización.

En la etapa de automatización se implementará un tablero de control que contendrá toda la circuitería y protecciones electromecánicas.

Para calentar el cilindro durante la etapa de extrusión es recomendable utilizar una resistencia eléctrica, cuya temperatura pueda controlarse mediante un control ON/OFF, debido a que es el más práctico en este caso (Creus, 2011).

En la primera etapa de la extrusión, la masa de jabón inicial deberá calentarse y compactarse hasta que el proceso se estabilice y se mantenga continuo. Para esto será necesario variar la velocidad del tornillo de extrusión, es decir, variar la velocidad del motor, ya que inicialmente el proceso se realizará lentamente. También se deberá

agregar una protección electromecánica para proteger al motor de daños eléctricos, y mandos para controlar la velocidad y sentido de giro del motor.

El control de todas las variables se realizará de forma directa, en lazo abierto. No es necesario la utilización de sensores, pues se pueden conseguir muy buenos resultados tan solo por medios electromecánicos. El tablero de control será dispuesto de acuerdo a las normas establecidas y contará con diferentes cámaras para enfatizar la estética.

1.7. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO.

El proyecto se distribuye de manera secuencial. En el capítulo dos se realiza un estudio de las máquinas extrusoras, se analiza su estructura, componentes principales y funcionamiento, esto último profundizado por un estudio del arte. Seguidamente se estudiará los jabones artesanales de Apaika, su proceso de fabricación y sus propiedades mecánicas.

En el tercer capítulo se llevará a cabo todo el proceso de diseño y desarrollo del producto, desde la identificación de las necesidades del cliente hasta el diseño en detalle de la máquina extrusora.

Una vez se definan los conceptos del producto y sus especificaciones, en el capítulo cuatro se documentará el proceso de diseño de los elementos, comenzando

por un estudio analítico, seguido por un prototipo CAD y análisis CAE hasta desembocar en el diseño del panel de control.

En el capítulo cinco, se describirá el ensamble de todos los elementos, se comenzará con los componentes estructurales, para luego detallar la incorporación de los sistemas electrónicos y electromecánicos.

El capítulo seis comprende pruebas de funcionamiento de la máquina extrusora. Se analizarán las pruebas en busca de refinar los detalles finales y se realizará un diseño robusto.

Todas las conclusiones serán documentadas en el capítulo final, y en base a ellas se emitirán juicios de valor o recomendaciones que serán útiles en futuras investigaciones y desarrollo de proyectos similares.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1. MÁQUINAS DE EXTRUSIÓN.

El término extrusión se refiere al estirado continuo de artículos perfilados de longitud finita, a través de una cabeza (dado) de sección determinada (Savgorodny, 1973). De acuerdo con esto, es fácil comprender que no existe casi ninguna limitación en cuanto a la figura del perfil deseado.

Las máquinas de extrusión se utilizan para la granulación de materiales termoplásticos, aplicación de revestimiento delgados en papel, tela, cartón, para formar la envoltura aislante de alambres y cables eléctricos, y también en la fabricación de películas, láminas, mangueras, tubos y artículos laminados de materiales con y sin sustancias de relleno, espumosos y no espumosos. Se emplean igualmente para la desgasificación, coloración, deshidratación, mezclado, plastificación simple y química de termoplásticos y materiales plásticos reactivos. Las extrusoras de husillo pueden utilizarse, además, para efectuar ciertos procesos y reacciones químicas (Savgorodny, 1973), y para el denominado “compounding”, es decir, para mezclar y formular compuestos de plástico que servirán como materia prima (Flores G, 2002).

El órgano fundamental de trabajo de una máquina extrusora es un husillo, pistón o disco. De acuerdo a esto, suelen clasificarse en extrusoras de pistón, de husillo, sin husillo (de disco e hidrodinámicas) y combinadas (de disco y husillo, de husillo con cámara de fusión, etc.). Según la estructura del cilindro (cámaras) y el órgano de trabajo se suelen clasificar en extrusoras con succión por vacío y sin succión; con calentamiento eléctrico, que puede ser: resistivo, inductivo, dieléctrico (por corrientes de alta frecuencia); con calentamiento por diversos agentes transportadores de calor (como el agua, vapor o aceite minerales) y sin calentamiento externo (Savgorodny, 1973). Otra clasificación típica de las máquinas extrusoras se muestra en la Figura 7.

Las extrusoras de pistón y las de disco e hidrodinámicas se emplean con menos frecuencia debido a la pequeña producción de las de pistón y a la poca presión que desarrollan las de disco e hidrodinámicas. Las de husillo, sin embargo, gracias a su amplia gama de aplicaciones, gran poder de producción, grado de automatización y continuidad del proceso han obtenido un campo de aplicación muy extenso en la industria de las extrusiones (Savgorodny, 1973).

La máquina extrusora debe cumplir con tres principales requerimientos:

1. Transportar de forma continua la materia prima en estado sólido hasta llevarla a un estado de fusión, en la etapa de calentamiento.
2. A medida que es transportado a través del husillo, el material debe fundirse y perfilando continuamente.

3. La materia prima debe ser homogenizada en su totalidad. (Gutiérrez Morales & Bornacelli Castillo, 2008).

Para el accionamiento de las máquinas extrusoras generalmente suelen emplearse: motores eléctricos de corriente alterna, acoplados a un variador o caja de cambio de velocidades; de colector, de corriente alterna, con variación continua de las velocidades; de corriente continua, conectados por el sistema generador-motor; hidráulicos (Savgorodny, 1973).

Los parámetros principales de una máquina extrusora de husillo son: el diámetro del husillo, la relación de su longitud al diámetro (L:D) y la velocidad de giro del husillo. Generalmente se clasifican, en primer lugar, por el diámetro del husillo (Savgorodny, 1973).

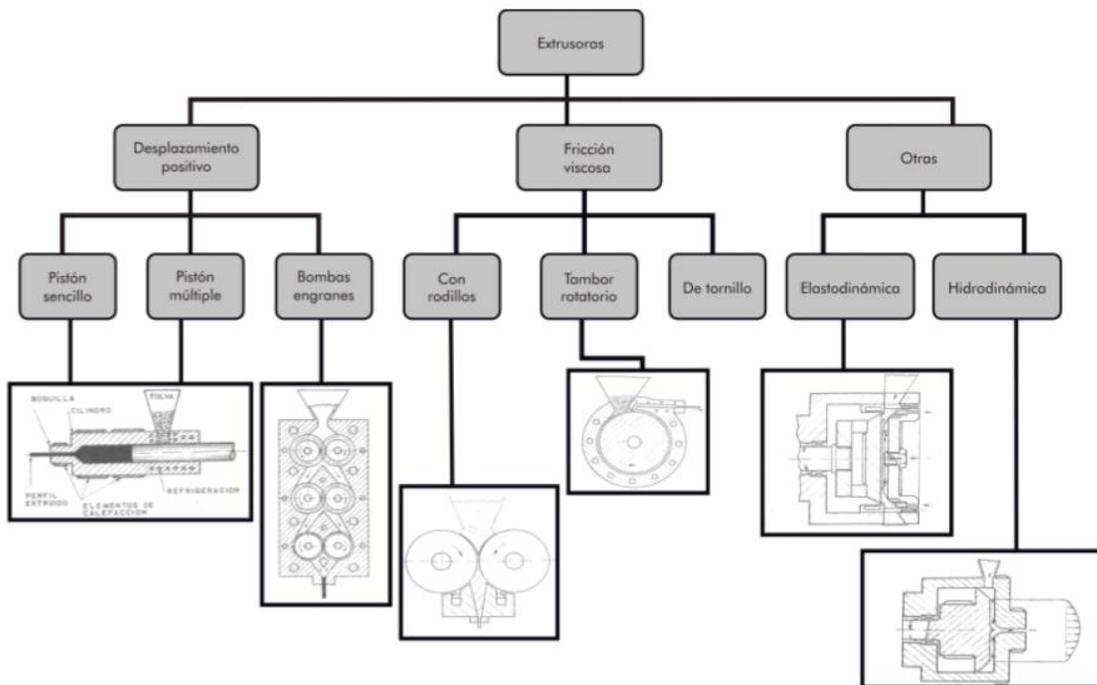


Figura 7. Tipos de extrusoras.

Fuente: (Gutiérrez Morales & Bornacelli Castillo, 2008).

Adaptado de "Metodología para el diseño de tornillos de máquinas extrusoras monohusillo", Gutiérrez Morales & Bornacelli Castillo, 2008.,

URL:<https://editorial.uao.edu.co/acceso-abierto/pdf/metodologia-para-el-diseno.pdf>

Por otro lado, es posible encontrar extrusoras de uno o varios husillos, de una o varias etapas y de uno o varios cilindros. Se distinguen también por el perfil o configuración del husillo, que puede ser simple (husillo cilíndrico de paso y profundidad del canal fijos o variables) y complejo (escalonado, interrumpido, cónico, parabólico), con paletas formando espiral, de levas, etc. (Savgorodny, 1973).

Con referencia a la velocidad de giro del husillo se distinguen máquinas extrusoras normales (hasta 150 rpm) y rápidas (de más de 150 rpm), las cuales trabajan generalmente a régimen adiabático, más exacto, a régimen autotérmico. En la mayoría de las máquinas de este tipo el husillo no se mueve en dirección axial; sin embargo, existen máquinas donde el husillo, además del movimiento rotativo tiene movimiento alternativo (oscilatorio) (Savgorodny, 1973).

Según el método de regulación y mantenimiento de la temperatura establecida en el cilindro se distinguen extrusoras con refrigeración por aire, agua y combinadas. Con relación a la disposición pueden ser las máquinas verticales y horizontales, estacionarias y giratorias. Además de las universales (politrópicas), se construyen también extrusoras autotérmicas, cónicas especiales, combinadas, de laboratorio y otras. Su estructura depende directamente del material a transformar y en menor grado de la configuración del laminado a obtener. Para la transformación de termoplásticos granulados, comúnmente, se utilizan extrusoras de un husillo (Savgorodny, 1973).

Algunas de las razones importantes para el uso de máquina extrusoras son:

- Una vez arrancado el proceso, la producción es continua; a diferencia de otras técnicas cíclicas, como la inyección.
- Permite obtener piezas difíciles o incosteables si se obtuvieran por otro proceso.

Por otro lado, algunas limitaciones de las extrusoras son:

- El costo de las máquinas extrusoras y del equipo auxiliar es usualmente elevado.
- Los productos obtenidos por extrusión requieren por lo general de otra transformación para su uso final ([Extrusión de láminas de plástico para la industria alimenticia], s. f.).

Comercialmente, la extrusión apunta a dar grandes ventajas con respecto al costo de operación (salida por hora). Además, las máquinas extrusoras también son muy atractivas porque debido a su capacidad de producción continua, ayudan a enfrentar los desafíos del mercado ([Capítulo 2. Marco Teórico. Proceso de extrusión de plásticos], s. f.). También, en comparación con otros procesos, sus tolerancias son más cerradas y los acabados son mejores. Como en realidad lo único que se requiere cambiar para producir un determinado perfil es la boquilla, el proceso de extrusión se puede aplicar con grandes ventajas cuando se requieren producciones pequeñas (Capítulo 6. Extrusión [pdf], s. f.).

2.2. MÁQUINA EXTRUSORA DE UN HUSILLO.

La extrusora de un solo husillo es un tipo de extrusora de fricción viscosa, en la cual el transporte se consigue aprovechando la fricción generada entre el material y las paredes internas de la máquina. En esta se genera un trabajo sobre el material debido

a los esfuerzos de cizallamiento a los que es sometido. Consta principalmente de un eje metálico central con álabes helicoidales que recibe el nombre husillo o tornillo, instalado dentro de un cilindro metálico que puede o no estar revestido con una camisa de resistencias eléctricas (Gutiérrez Morales & Bornacelli Castillo, 2008).

En aplicaciones que involucran materiales con baja temperatura de fusión se suele utilizar no más de una resistencia eléctrica. En un extremo del cilindro se encuentra un orificio para alimentar la máquina con el material, en donde se conecta una tolva de alimentación; en la parte posterior se encuentra el sistema de accionamiento del husillo, que consta de un motor y un sistema de reducción de velocidad. En el extremo opuesto se encuentra la salida del material y el dado o boquilla, que finalmente da forma al semielaborado (Gutiérrez Morales & Bornacelli Castillo, 2008).

Existen numerosos tipos y tamaños de máquinas extrusoras de un solo husillo que difieren entre sí por su geometría y forma de fabricación, lo que se debe saber es: tipo de material a transformar y forma del artículo, longitud y diámetro del husillo, tipo de accionamiento, gama y procedimiento de regular las velocidades de giro del husillo, potencia total y específica de calentamiento del cilindro y procedimiento automático de regular la temperatura dada, existencia de dispositivos de carga (Savgorodny, 1973).

Algunas de las consideraciones a ser evaluadas para la selección de una máquina extrusora mono husillo son:

- El requerimiento de velocidad de giro variable del husillo.
- Potencia máxima requerida en base al material a procesar.
- Relación requerida entre el torque del husillo y su velocidad.

En siglo XX se construían una serie completa de máquinas para la fabricación de películas, tubos, artículos perfilados, láminas y gránulos de material termoplástico, con husillo de 20, 45, 63, 90, 125 y 160 mm de diámetro y relación L:D = (20/25):1 (Savgorodny, 1973).

Al diseñar estas máquinas se prestó particular atención en aumentar la capacidad de producción y la calidad de los artículos. En todas ellas la velocidad de giro del husillo se regula automáticamente por medio de sistemas hidráulicos, mecánicos o electrónicos. Estos últimos son de menor tamaño, tienen mayor rendimiento específico (hasta 97%), menor precio, mayor capacidad de trabajo (por la inexistencia de piezas sometidas al desgaste). Los elementos fundamentales de estos sistemas son los tiristores o rectificadores de silicio gobernados automáticamente (Savgorodny, 1973).

Por otro lado, se ha puesto el particular interés en encontrar la geometría óptima de los husillos, con la cual se pueden alcanzar las máximas presiones y temperaturas del material lo más cerca posible de la zona de carga, con la finalidad de utilizar la

mayor parte del husillo para la homogenización del material. La longitud óptima del husillo ha sido aumentada convenientemente hasta alcanzar una relación $L:D = (20/30):1$. El nivel de la ciencia y de la técnica en aquella época permitía determinar con la máxima precisión la geometría óptima del husillo con relación a la clase de material y condiciones de su transformación (Savgorodny, 1973).

La estructura general de una máquina extrusora de un solo husillo se muestra en la Figura 8.

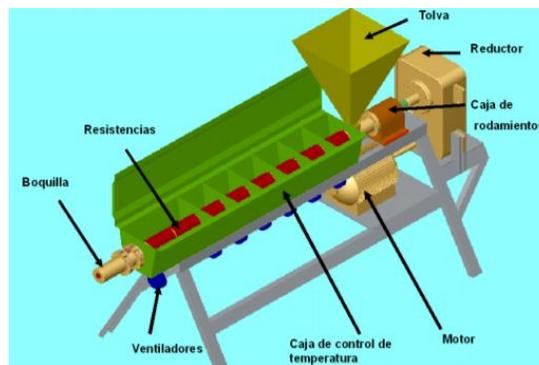
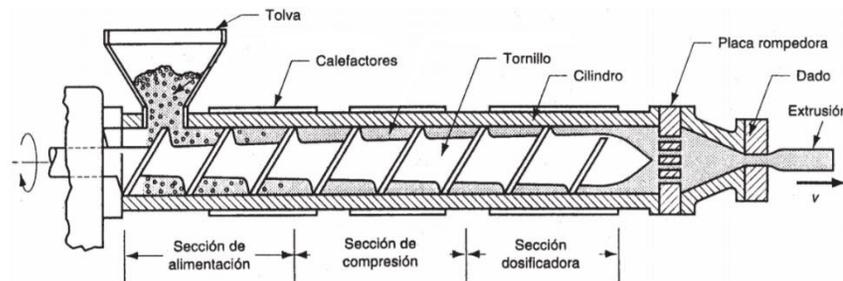


Figura 8. Extrusora de un husillo.

Fuente: (Gutiérrez Morales & Bornacelli Castillo, 2008).

Adaptado de "Metodología para el diseño de tornillos de máquinas extrusoras monohusillo", Gutiérrez Morales & Bornacelli Castillo, 2008.,

URL:<https://editorial.uao.edu.co/acceso-abierto/pdf/metodologia-para-el-diseno.pdf>

De acuerdo con Beltrán & Marcilla (2012) “las extrusoras actuales pueden operar entre 10 y 500 rpm y según su tamaño, pueden proporcionar caudales de 2000 kg/h de material.” (p. 80).

2.3. COMPONENTES DE UNA MÁQUINA EXTRUSORA.

Una máquina extrusora mono - husillo posee una estructura bastante simple compuesta por componentes generales bien delimitados. Estos componentes se muestran en la Figura 9.

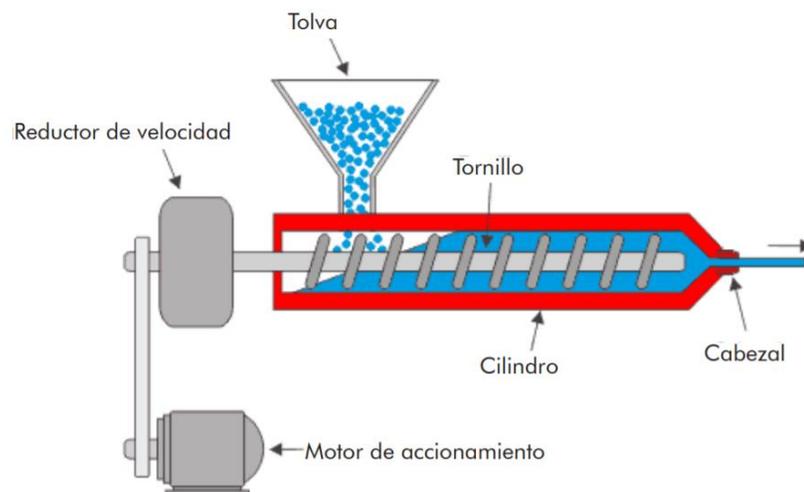


Figura 9. Componentes generales de una máquina extrusora.

Fuente: (Gutiérrez Morales & Bornacelli Castillo, 2008).

Adaptado de “Metodología para el diseño de tornillos de máquinas extrusoras monohusillo”, Gutiérrez Morales & Bornacelli Castillo, 2008.,

URL:<https://editorial.uao.edu.co/acceso-abierto/pdf/metodologia-para-el-diseno.pdf>

2.3.1. Husillo o tornillo de extrusión.

El husillo consiste en un cilindro largo rodeado por una hélice con espesor de filete definido (Figura 10. a.), que se adapta con precisión dentro del cilindro, con una holgura muy pequeña de modo que apenas pueda rotar. El husillo es uno de los elementos más importantes de una máquina extrusora porque transporta, calienta, funde y mezcla el material. La estabilidad del proceso y la calidad del producto final se aseguran con un buen diseño del husillo (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012). Gutiérrez Morales & Bornacelli Castillo (2008) lo describen como “la pieza que en alto grado determina el éxito de una operación de extrusión” (p. 36). Los parámetros geométricos más importantes a considerar son: longitud (L), diámetro (D), ángulo del filete (θ) y el paso de rosca (w), Figura 10. b., (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

Los filetes que recorren toda la longitud del husillo, son lo que impulsan el material a través del extrusor. La geometría de estos elementos influirán en el tipo de material que se pueda procesar y la calidad de mezclado y perfilado del producto final (Gutiérrez Morales & Bornacelli Castillo, 2008). Existen tornillos para uso dedicado y para propósitos generales, el tipo de tornillo a utilizar depende del material a procesar (Figura 5), ([Capítulo 2. Marco Teórico. Proceso de extrusión de plásticos], s. f.).

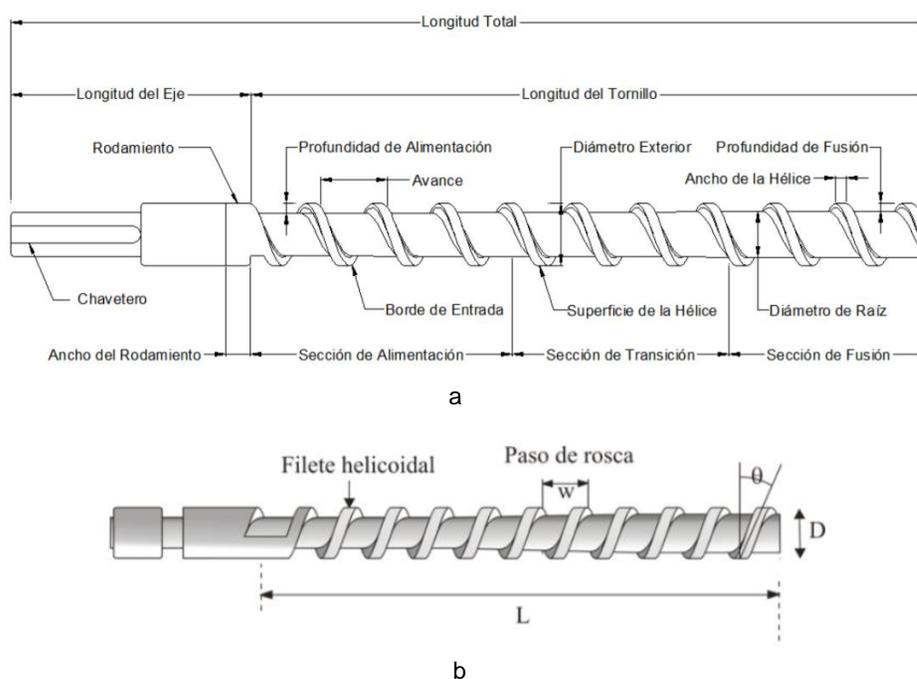


Figura 10. a. Características del husillo de extrusión.

b. Parámetros importantes en el diseño de un husillo de extrusión.

Fuente: (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012)

([Capítulo 2. Marco Teórico. Proceso de extrusión de plásticos], s. f.)

Adaptado de "Tecnología de polímeros", Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012, URL:

https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/16897/1/TEMA_4_extrusion.pdf, y "Capítulo 2. Marco Teórico. Proceso de extrusión de plásticos", s.a., s.f. URL:

<https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/776/2/T-ESPE-027406-2.pdf>

El material se presuriza a medida que avanza a lo largo del husillo, comenzando con presión atmosférica, en la tolva, y aumentando progresivamente hasta la boquilla. La "raíz" o núcleo (Figura 10. a.) es de diámetro variable, de manera que el canal en espiral varía en profundidad. En general, la profundidad es mayor en la zona de alimentación y disminuye progresivamente hasta el dado o boquilla (Figura 5), (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012). Esto tiene como objetivo transportar una gran cantidad de material desde la zona de alimentación al interior del extrusor, y luego disminuir el

volumen de material que llega a la zona de dosificado, ejerciendo así una compresión. Esta compresión es útil para mejorar la homogenización del material y para la expulsión de aire atrapado (Gutiérrez Morales & Bornacelli Castillo, 2008). En la Figura 4. a, se muestra la evolución de la presión en cada sección del husillo.

Por lo general el husillo no posee un sistema de calentamiento o enfriamiento, aunque en algunas aplicaciones se utilizan husillos huecos, por el cual circula un fluido refrigerante o calefactor (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

Los materiales termoplásticos utilizados en el proceso de extrusión poseen características muy diversas, algunas de ellas son la elasticidad, calor específico, coeficiente de fricción, temperatura de fusión, viscosidad, etc., que cubren un amplio rango de valores y son importantes al diseñar el husillo. Por ello, es necesario utilizar diferentes tipos de husillos para cada material. En la práctica no es común que se utilice un husillo para trabajar materiales muy distintos; de hecho, cada husillo se diseña o se selecciona para trabajar con una dupla boquilla/material específico (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012), es por ello que Gutiérrez Morales & Bornacelli Castillo (2008) afirman que “el diseño del tornillo depende específicamente del material a trabajar” (p. 35).

La longitud del husillo tiene una importancia especial, pues influye en el desempeño productivo y costo de la máquina extrusora (Gutiérrez Morales & Bornacelli Castillo, 2008). Para un diámetro y velocidad de giro del husillo específicos, la

capacidad para fundir, mezclar y homogenizar aumenta de forma directamente proporcional con la longitud del husillo, y por lo tanto también con la relación longitud - diámetro (L/D). Sin embargo, husillos con demasiada longitud son difíciles de fabricar y ajustar dentro del cilindro (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

Como es de esperar, el diámetro del husillo (D) también influye en la capacidad de producción y debido a la importancia de la longitud y el diámetro, y por la estrecha relación entre sí, se suele especificar las dimensiones principales del husillo con la relación longitud/diámetro (L/D). El rango de la relación L/D varía comúnmente de 24 a 36 (siendo 24 el valor más popular) ([Capítulo 2. Marco Teórico. Proceso de extrusión de plásticos], s. f.).

Un parámetro importante en el husillo es la relación de compresión, que se define como la relación entre el volumen de un paso del canal en la zona de alimentación y el volumen de un paso del canal en la zona de dosificado (Gutiérrez Morales & Bornacelli Castillo, 2008). Las relaciones de compresión normales se encuentran entre 2 y 4. Una zona de dosificado de escasa profundidad (alta relación de compresión) aporta una mayor velocidad de cizalla sobre el material e inyecta un gradiente de presión mayor (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

La elección definitiva del número y del diseño geométrico de las zonas del husillo es un proceso complejo, esto depende en su mayoría de las características del material al momento de fundirse, de sus características reológicas y de la velocidad del husillo.

El tornillo más simple, con tres zonas, se define según el número de hélices y la altura del filete en las zonas de alimentación, compresión y dosificado (Figura 10. a.), (Figura 8), (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012). La proporción entre la longitud de las tres zonas también influye en la capacidad de producción, mientras que la profundidad del filete depende de la viscosidad del material a extruir, entre más viscoso, generará mayor calor por cizallamiento, lo que se traduce en la necesidad de filetes más profundos (Gutiérrez Morales & Bornacelli Castillo, 2008).

La **zona de alimentación** es la primera etapa del husillo de extrusión, en donde se introduce el material, típicamente es la que posee la mayor profundidad de canal, ya que su función es recibir y transportar la mayor cantidad de material (Gutiérrez Morales & Bornacelli Castillo, 2008). Su objetivo primordial es compactar el material y transportarlo hacia la siguiente zona a velocidad constante (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012). Es imperativo analizar esta sección para reducir el riesgo de falla por torsión que puede provocarse por la sobrecarga de torque en el husillo (Gutiérrez Morales & Bornacelli Castillo, 2008).

El recorrido del material en esta sección dependerá de la diferencia entre los coeficientes de fricción del material – husillo y material – cilindro, se desea que esta última sea mayor, por lo que el husillo se pule escrupulosamente para reducir la fricción entre su superficie y la del material (Gutiérrez Morales & Bornacelli Castillo, 2008). Hay que tomar en cuenta también que el coeficiente de fricción depende de la temperatura.

En la **zona de compresión, transición o plastificación**, como su nombre lo indica, se realiza la compresión y gran parte de la fusión del material. Es la porción del husillo cuya profundidad disminuye progresivamente desde la zona de alimentación hasta la de dosificación, y en donde se ejerce trabajo sobre el material, de manera que lo obliga a fundirse. El material es forzado hacia adelante, hacia la zona de dosificación (Gutiérrez Morales & Bornacelli Castillo, 2008).

En esta zona es muy importante tomar en cuenta la densidad del material, la cual varía con la temperatura. Por ello, esta zona es diseñada para hacer más compacto el material y para que la variación de tamaño del canal se adapte con la velocidad de fusión y el cambio de volumen del material al pasar de estado sólido a estado viscoso (Gutiérrez Morales & Bornacelli Castillo, 2008).

La **zona de dosificación** o bombeo es la sección del husillo de extrusión en donde la fusión y la homogenización del material se completan, y donde se la presión aumenta para superar la restricción impuesta por el cabezal. En esta sección la profundidad de canal o filete es pequeña y constante (Gutiérrez Morales & Bornacelli Castillo, 2008). La zona de dosificado, en comparación con las otras dos zonas, es la que resulta más sencillo analizar, ya que al flujo de material plastificado de esta zona se le puede aplicar las leyes hidrodinámicas para líquidos viscosos (Savgorodny, 1973).

Es imperativo tener en cuenta que esta asignación de funciones a las zonas del husillo extrusor no es estricta. El transporte, compresión y homogenización se efectúa a lo largo de todo el extrusor (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

2.3.2. Cilindro o barril de extrusión.

El cilindro o barril de extrusión rodea al husillo extrusor como se muestra en la Figura 11. El principio de su ajuste se basa en que la pared interior del cilindro debe ser muy rugosa para aumentar las fuerzas de corte sobre el material, y así favorecer su flujo a lo largo del husillo (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012). El espacio entre el cilindro y el husillo debe ser mínimo para así asegurar la fricción necesaria para transportar, comprimir y dosificar el material. En la Tabla 1 se muestran valores de espacios típicos entre el cilindro y el husillo en función del diámetro del mismo.

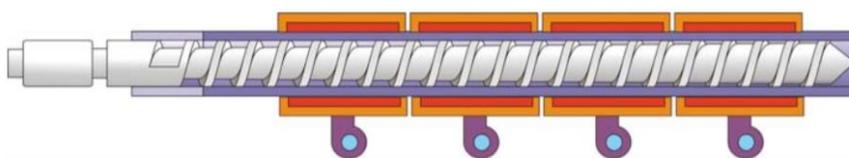


Figura 11. Sistema cilindro-husillo de extrusión.

Fuente: (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

Adaptado de "Tecnología de polímeros", Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012,
URL: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/16897/1/TEMA_4_extrusion.pdf

Tabla 1
Espacios típicos entre el tornillo y barril en función del tamaño del tornillo.

Diámetro del tornillo mm (pulg.)	Espacio mm (pulg.)
64 (2.5)	0.05 (0.002)
76 (3)	0.10 (0.004)
114 (4.5)	0.13 (0.005)
152 (6)	0.18 (0.007)

Fuente: ([Capítulo 2. Marco Teórico. Proceso de extrusión de plásticos], s. f.).
 Adaptado de “Capítulo 2. Marco Teórico. Proceso de extrusión de plásticos”, s.a., s.f.
 URL: <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/776/2/T-ESPE-027406-2.pdf>

El cilindro suele fabricarse de aceros muy resistentes para así evitar la corrosión y el desgaste mecánico. Si es necesario, se lleva a cabo procesos de endurecimiento superficial sobre la superficie interna del cilindro, que es la que soporta los efectos de corrosión y desgaste (Gutiérrez Morales & Bornacelli Castillo, 2008). Otra posibilidad es utilizar un revestimiento bimetálico que le confiere una elevada resistencia, incluso mayor que la del husillo, ya que este es más fácil de reemplazar en caso de fallas o desgaste (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

El cilindro cuenta con elementos de transferencia de calor. Cabe señalar que el calentamiento se puede ejecutar mediante resistencias eléctricas circulares, ubicadas en segmentos estratégicos del cilindro, y también, pero menos usual, mediante la aplicación de radiación o encamisado con fluidos refrigerantes y calefactores. Es común que se divida al cilindro en varias zonas de calefacción, con control independiente en cada una de ellas, lo que facilita la obtención de un buen gradiente de temperatura

desde la tolva de alimentación hasta la boquilla (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012). Todo el sistema de calentamiento es controlado desde un tablero de control, donde la temperatura se establece de acuerdo al tipo de material y el producto deseado (Gutiérrez Morales & Bornacelli Castillo, 2008).

En aplicaciones en las que es necesario una gran conservación de la temperatura dentro del cilindro para evitar cambios en la producción y su calidad, se sugiere aislar el cuerpo del cilindro con algún material de baja conductividad térmica, como el fieltro o la fibra de vidrio (Gutiérrez Morales & Bornacelli Castillo, 2008).

El cilindro debe enfriarse adecuadamente si, como producto del calor interno generado por los esfuerzos de cizalla a los que está sometido el material, se supera la temperatura nominal del proceso. Normalmente para este fin se utilizan soplantes ubicados cerca de la resistencia eléctrica. Por otro lado, en menor grado se utilizan líquidos refrigerantes, ya que, aunque su capacidad de eliminar calor sea mejor que la del aire, son más difíciles de controlar. Es importante considerar que generalmente los sensores de temperatura se ubican en el cilindro, por lo que la temperatura efectiva del material será ligeramente superior a la que indican los sensores (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

El diámetro y longitud del cilindro son representativos del tamaño de la extrusora e influye en gran medida en la velocidad de flujo. La mayoría de las máquinas

extrusoras poseen diámetros comprendidos entre 2 y 90 cm (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

En resumen, las propiedades exigidas en la actualidad para que el cilindro de extrusión tenga una larga vida útil son (Gutiérrez Morales & Bornacelli Castillo, 2008):

- Resistencia al desgaste.
- Alta resistencia a la abrasión.
- Buena resistencia química al contacto con el material.
- Elevada dureza.

2.3.3. Garganta de alimentación.

Se denomina garganta de alimentación al segmento de cilindro que se sitúa justo debajo de la tolva de alimentación, esta zona suele estar provista de un sistema de refrigeración que mantiene la temperatura tan baja que el material de entrada no se adhiere a las paredes internas de la extrusora (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

La garganta de alimentación es adaptada con tolva de alimentación mediante la boquilla de alimentación. Esta boquilla por lo general tiene una longitud 1.5 veces el diámetro del cilindro y un ancho de 0.7 veces el mismo, casi siempre está desplazada del eje del husillo, de modo que facilita la caída del material dentro de la máquina (Figura 12), (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

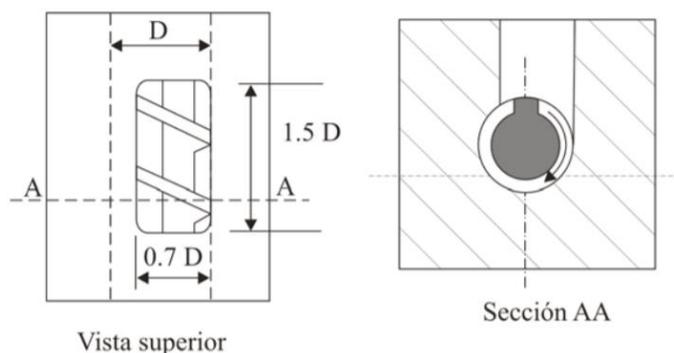


Figura 12. Garganta de alimentación.

Fuente: (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

Adaptado de "Tecnología de polímeros", Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012,
 URL:https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/16897/1/TEMA_4_extrusion.pdf

2.3.4. Tolva de alimentación.

La tolva es el objeto tipo embudo que se utiliza para introducir el material dentro de la máquina extrusora, es de vital importancia que la garganta de alimentación y boquilla de entrada estén perfectamente ensambladas y diseñadas, de manera que se consiga un flujo continuo de material. Todo esto se asegura mediante la utilización de tolvas cónicas, ya que estas ejercen una compresión gradual sobre el material, aunque, en comparación con las de sección rectangular (Figura 13) son más caras y difíciles fabricar (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

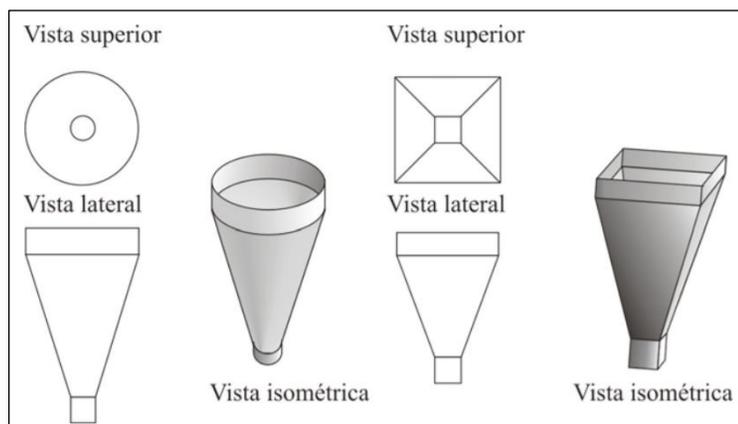


Figura 13. Tipos de tolvas de alimentación.
 Fuente: (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).
 Adaptado de “Tecnología de polímeros”, Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012, URL: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/16897/1/TEMA_4_extrusion.pdf

La tolva de alimentación debe ser diseñada con ángulos de caída adecuados, de no ser así se vuelve latente el riesgo de que el material se estanque y se produzcan paros en la producción (Gutiérrez Morales & Bornacelli Castillo, 2008).

La experiencia ha demostrado que deben diseñarse con una capacidad de volumen para dos horas de trabajo. A menudo, para asegurar el flujo constante de material, se utilizan dispositivos de vibración (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012), para materiales que se compactan fácilmente y que rompen los puentes de material formado, permitiendo la caída hacia la garganta de alimentación (Gutiérrez Morales & Bornacelli Castillo, 2008).

Por otro lado, si el material es problemático aún con la tolva en vibración, es recomendable utilizar dispositivos agitadores e incluso tornillos Cramer (Gutiérrez Morales & Bornacelli Castillo, 2008), como se muestra a continuación:

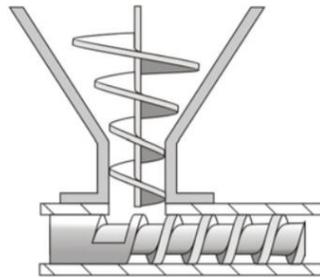


Figura 14. Tornillo de alimentación tipo Cramer
Fuente: (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).
Adaptado de “Tecnología de polímeros”, Beltrán Rico & Marcilla Gomis,
2012, URL: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/16897/1/TEMA_4_extrusion.pdf

En aplicaciones en las que se requiere secar el material, se implementan las tolvas de secado que eliminan la humedad del material a extruir mediante sistemas de aire caliente, sustituyendo así a equipos secadores independientes de la máquina. En líneas de extrusión más automatizadas se incluyen sistemas de transporte de material hacia la tolva. También se utilizan dosificadores de aditivos hacia la tolva e imanes o magnetos, que impiden el ingreso de partículas ferrosas que pueden dañar el husillo y otras partes internas de la extrusora (Gutiérrez Morales & Bornacelli Castillo, 2008).

2.3.5. Plato rompedor y filtros.

En el extremo final del cilindro se encuentra el plato rompedor, que es un disco delgado de metal con agujeros (Figura 15), (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012). Su espesor debe ser suficiente como prevenir el contacto entre el cilindro y el cabezal, sin descuidar un ajuste hermético. El número de agujeros varía según la aplicación y su diámetro varía de 3 a 5 mm (Gutiérrez Morales & Bornacelli Castillo, 2008). Se debe evitar a toda costa la formación de zonas muertas del material, por ello se suele manufacturar un chaflán en la cara del plato rompedor que mira al husillo.

Su función principal es romper las líneas de flujo de material provenientes de la zona de dosificación del husillo y transformarlas en líneas de flujo que corren paralelas entre sí (Gutiérrez Morales & Bornacelli Castillo, 2008).

Si el plato rompedor está integrado por filtros, otra de sus funciones es servir de soporte a estos paquetes de filtros, los cuales atrapan partículas contaminantes para que no salgan el extruido. También ayudan a que el mezclado y la homogenización del material sean mejores (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

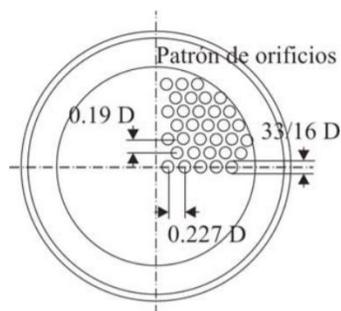


Figura 15. Plato rompedor.

Fuente: (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

Adaptado de “Tecnología de polímeros”, Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012, URL: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/16897/1/TEMA_4_extrusion.pdf

Los filtros se ubican delante del plato rompedor, en orden de tamaño, de mayor a menor. Al final se ubica el último filtro, también de malla grande, y finalmente el plato rompedor (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

Tras cierto tiempo, que depende de la calidad de los filtros, las mallas se ensucian y es necesario sustituir los filtros, esto evita las caídas de presión excesiva y posteriormente una disminución de la producción. Por este motivo es importante que el plato rompedor sea fácilmente desmontable y/o reemplazable (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

2.3.6. Cabezal y boquilla.

El cabezal es el elemento ubicado al final del cilindro, el mismo que sujeta la boquilla y retiene el plato rompedor. Lo más común es que vaya roscado al cilindro,

permitiendo así su fácil desmontaje. Los espacios internos del cabezal deben facilitar un flujo continuo del material hacia la boquilla. La configuración anular es la más utilizada en sistemas cabezal-boquilla (Figura 16) (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

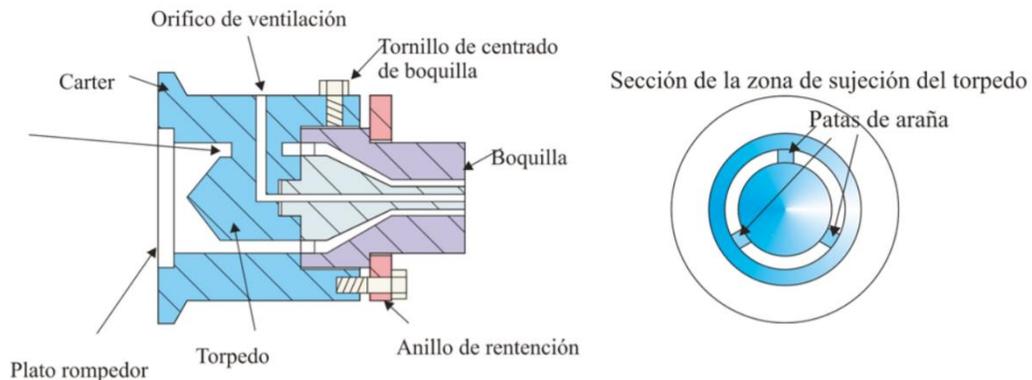


Figura 16. Boquilla anular y cabezal.

Fuente: (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

Adaptado de "Tecnología de polímeros", Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012, URL: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/16897/1/TEMA_4_extrusion.pdf

En esta configuración el material avanza del cilindro a la boquilla pasando por el torpedo, situado en el cabezal. El flujo de material a velocidad constante, depende de la forma en que se diseñe la sección transversal de los soportes del torpedo (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

Es aconsejable evitar configuraciones con un ángulo excesivamente convergente, como regla general se puede decir que entre mayor sea la viscosidad del material a extruir, más agudo tendrá que ser ángulo para redirigirlo según las líneas de flujo. (Gutiérrez Morales & Bornacelli Castillo, 2008).

Gutiérrez Morales & Bornacelli Castillo (2008) afirman que “la boquilla o dado de extrusión es la pieza fundamental del cabezal” (p. 34). Es fabricada generalmente de acero de alta velocidad para herramienta y es un componente muy importante en el proceso de extrusión (Extrusión [pdf], s. f.). Su precisión y acabado son determinantes en la calidad dimensional del producto fabricado (Capítulo 6. Extrusión [pdf], s. f.). Como el material de la boquilla representa un alto coste, a menudo es hecha en forma de un disco delgado de diámetro mucho más pequeño que el lingote soportado por una boquilla de refuerzo (Extrusión [pdf], s. f.).

La función de la boquilla es perfilar el material de acuerdo a la forma que se requiera, debe diseñarse de manera que facilite en lo posible el reposo del material antes de su extrusión. El material fluye a través de la boquilla en estado de fluido no-newtoniano, por lo tanto, la relación entre su viscosidad y la velocidad de cizalladura no posee un comportamiento lineal (Gutiérrez Morales & Bornacelli Castillo, 2008).

Una clasificación acertada de las boquillas se da tomando en cuenta la forma de la sección del producto extruido. Se puede encontrar boquillas anulares (Figura 16) para la fabricación de tuberías o recubrimientos de elementos cilíndricos, boquillas planas o rectangulares (Figura 17) para la obtención de planchas y láminas, y boquillas circulares para la fabricación de fibras y elementos de sección circular (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

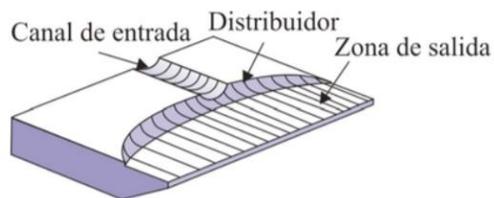


Figura 17. Partes de una boquilla de extrusión.
 Fuente: (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).
 Adaptado de "Tecnología de polímeros", Beltrán Rico & Marcilla Gomis,
 2012, URL: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/16897/1/TEMA_4_extrusion.pdf

También podemos encontrar boquillas con entrada cónica que se emplea cuando se dispone de buena lubricación. Al reducir el ángulo de entrada se logra mayor homogeneidad, además de que se reduce la presión de extrusión. El semi-ángulo de entrada incrementa directamente la fricción en la superficie de la boquilla, debido a ello normalmente dicho ángulo varía entre los 45° y 60° (Figura 18), (Capítulo 6. Extrusión [pdf], s. f.).

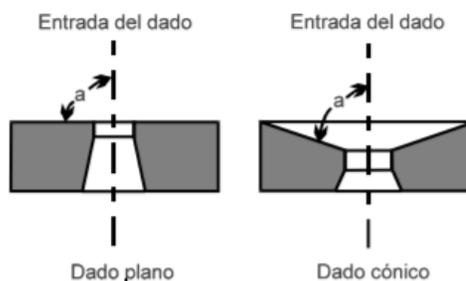


Figura 18. Dados típicos de extrusión.
 Fuente: (Capítulo 6. Extrusión [pdf], s. f.).
 Adaptado de "Capítulo 6. Extrusión", s.a., s.f.,
 URL: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/2548/09-MPM-Cap6-Final.pdf?sequence=9>

Como se puede observar, existen tres partes diferenciadas en toda boquilla: el canal de entrada, el distribuidor y la zona de salida. Por esta razón es fácil deducir que las dimensiones de la boquilla no determinan exactamente las dimensiones del producto extruido. Hay varios factores para que esto ocurra, entre los cuales están la recepción del material, el enfriamiento y la etapa de relajación, que influyen en el tamaño e incluso la forma del producto extruido (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

A excepción de las boquillas circulares, es prácticamente imposible fabricar una boquilla que pueda utilizarse para diversos materiales y condiciones de operación. En todo caso para el diseño de la boquilla se recomiendan consideraciones básicas como utilizar radios grandes en todas las esquinas, evitar los canales angostos y profundidades excesivas (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

2.4. PROCESO DE EXTRUSIÓN.

Desde un punto de vista muy general, la extrusión se refiere a cualquier proceso de transformación en la que un material fundido es forzado a través de una boquilla para producir un artículo de sección perfilada, que puede ser sólido o hueco, y en principio con longitud no delimitada. Además de los plásticos, otros materiales se pueden procesar mediante extrusión, como los metales, cerámicas y alimentos (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012). En la actualidad, materiales más complejos son sometidos al proceso de extrusión, como por ejemplo masas de jabón, pastas

desinfectantes y polímeros complejos como el ácido poli láctico (PLA), utilizados luego para diversas aplicaciones.

En el proceso de extrusión por lo general el material se alimenta en estado sólido y en la salida se obtiene el material fundido y conformado. En aplicaciones menos comunes el material se puede alimentar fundido. En otras ocasiones se extruyen sólidos, como las fibras, en la que las orientaciones en el material (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

El la Figura 19 se muestra esquemáticamente una extrusora de un husillo, la cual funciona generalmente de la siguiente manera: el motor eléctrico 1 trasmite el movimiento giratorio mediante el reductor 2, al husillo 5, que obtiene el material directamente de la tolva de alimentación 4 en forma de gránulos, polvo, cinta o masa caliente y lo mezcla, funde, comprime y lo desplaza por todo lo largo del canal helicoidal dentro del cilindro 6. Gracias al husillo se consigue la homogenización del material fundido y su extrusión a través de las mallas filtrantes 7, plato rompedor 8 y cabezal o cabeza perfiladora o boquilla 9. En el cilindro el material se calienta gracias a sistemas de calentamiento que se controlan y regulan automáticamente. Para evitar accidentes graves los calentadores van tapados con la cubierta 10. Por lo general, para refrigerar las zonas calientes del cilindro, se emplean los ventiladores 11. El cojinete axial 3, ensamblado en el extremo izquierdo del husillo, soporta los esfuerzos axiales que surgen al girar el husillo (Savgorodny, 1973).

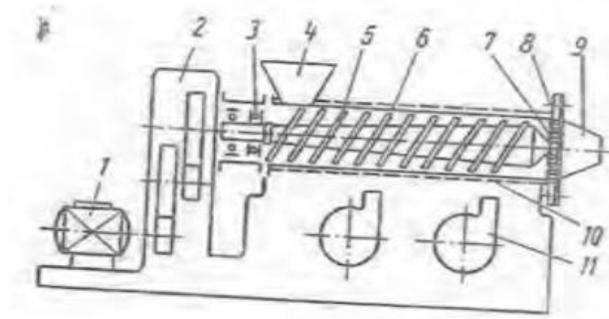


Figura 19. Máquina de extrusión de un husillo para transformar materiales termoplásticos.
Fuente: (Savgorodny, 1973).

En el presente trabajo se estudian las extrusoras mono - husillo con alimentación de material sólido, las cuales trabajan en seis etapas:

1. Transporte del sólido hacia la zona de fusión.
2. Fusión del material.
3. Transporte y presurización del fundido.
4. Homogenizado.
5. Desgasificado.
6. Conformado (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

Sin embargo, no necesariamente todas estas etapas se cumplen para todas y cada una de las máquinas extrusoras. Por ejemplo, el desgasificado o venteo se ejecuta solamente en las máquinas diseñadas para ello. El perfilado, sin embargo, no es el final del proceso; por lo general el producto adquiere su forma final en procesos secundarios (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

El proceso de extrusión propiamente dicho, depende de la temperatura del cilindro en las diferentes zonas y de la temperatura del husillo (Savgorodny, 1973). Es por ello que en una extrusora la parte más importante es el sistema cilindro – husillo que, debido al giro y a un control exacto de la temperatura, presuriza el material sólido, permitiendo la fusión del material y el transporte hacia la boquilla para su ulterior conformado, ejecutándose al mismo tiempo el mezclado del material (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

2.4.1. Transporte del material sólido hacia la zona de fusión.

El material sólido que se ingresa a la extrusora se transporta en dos regiones, las cuales se estudiarán de forma separada: tanto la tolva de alimentación, así como el interior del cilindro.

Transporte en la tolva.

El transporte del material sólido dentro de la tolva es por lo general un flujo en donde las partículas caen por efecto de la gravedad: el material fluye hacia la base de la tolva por acción de su propio peso. Pudiéndose presentar estados de flujo en masa, en el cual no hay regiones estancadas y todo el material fluye hacia la salida, o estados de flujo tipo embudo, en el que el material más próximo a las paredes de la tolva queda estancado (Figura 20). En otros casos materiales con flujo muy poco eficiente pueden

quedar atascados en la garganta de alimentación, dando lugar a un fenómeno denominado formación de “puente” o “arco”. Por razones específicas detalladas anteriormente, siempre se prefiere un flujo en masa del material. (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

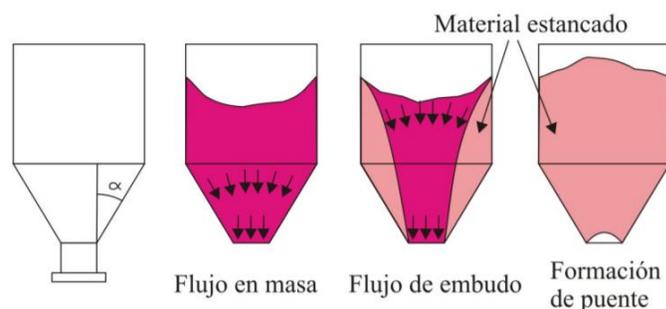


Figura 20. Flujo del material en una tolva de alimentación.

Fuente: (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

Adaptado de “Tecnología de polímeros”, Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012, URL: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/16897/1/TEMA_4_extrusion.pdf

Tanto las particularidades del material como el diseño de la tolva tienen repercusión sobre el transporte de material en esta parte de la máquina (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012). Algunas de las características del material que intervienen en este proceso son:

- **Densidad aparente:** se refiere a la densidad del material incluyendo el aire atrapado en sus intersticios moleculares. Si la densidad aparente es demasiado baja (por debajo del 20 o 30% de la densidad real), el material presentará problemas de fluidez, ya que para obtener un determinado

caudal se requiere tener un gran volumen de material. Es más sencillo manipular materiales con al menos un 60% de su densidad real.

- **Compresibilidad:** se refiere al aumento de la densidad aparente del material al ser comprimido. Por ello el interés se centra en materiales con un factor de compresibilidad bajo.
- **Coefficiente de fricción:** existe el de fricción interna y el externo, el primero se produce entre las propias partículas del polímero, y el segundo se efectúa entre las partículas del material y las paredes internas de la tolva. Para obtener un buen caudal en la Tolva se necesita que estos dos coeficientes sean bajos.
- **Distribución del tamaño de partículas (DTP):** se busca que la misma sea lo más uniforme posible. Si el material presenta un DTP ancho, entonces las partículas tenderán a empaquetarse, lo que dificultará su flujo (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

Transporte en el cilindro de extrusión.

Una vez que el material cae de la tolva, por la garganta de alimentación, hacia el interior del barril extrusor, el mecanismo de transporte deja de controlarse por la gravedad y se convierte en un transporte inducido por arrastre debido al husillo.

De acuerdo con Savgorodny (1973), “la acción impelente del husillo depende de la velocidad de giro, ángulo de hélice de la espiral y del coeficiente de fricción.”, (p. 3).

Existen dos fuerzas de fricción principales que actúan sobre el material de entrada: una en las paredes internas del cilindro y otra sobre la superficie del husillo. La fuerza de fricción en las paredes internas del cilindro es la que genera el empuje del material hacia la salida de la extrusora, mientras que la fuerza de fricción en la superficie del husillo es la fuerza retardante (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012). El material será impulsado con mayor efectividad por el husillo, cuanto mayor sea la fricción entre el material y las paredes del cilindro y cuanto menor sea en la superficie del husillo (Savgorodny, 1973).

Los coeficientes de fricción dependen principalmente del material a transformar y de la temperatura de las superficies tanto del cilindro como del husillo (Savgorodny, 1973). En este sentido, para que aumente el coeficiente de fricción del cilindro es necesario disminuir su temperatura, a un valor adecuado, ya que según Savgorodny (1973), esta acción “baja la temperatura del material a transformar y disminuye la presión desarrollada por el husillo”, (p. 3). Por otro lado, el calentamiento excesivo del cilindro entorpece considerablemente el proceso de extrusión, debido a la destrucción térmica de las capas de material cercanas a su superficie; además, el incremento de la temperatura puede ocasionar la fusión precoz del material, disminuyendo la capacidad

de adhesión y, por consiguiente, el arrastre del material por los primeros filetes del husillo (Savgorodny, 1973).

Una forma de disminuir la fricción entre el husillo y el material es mediante la utilización de un recubrimiento para el husillo, como el PTFE, con el que su limpieza además se vuelve más sencilla (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

Para conseguir un buen flujo de material dentro del cilindro de extrusión se recomienda tomar en cuenta las siguientes indicaciones (Figura 21):

- El filete del husillo debe ser simple, no doble, dado que este último genera mayor fricción.
- El ángulo de los filetes debe ser considerablemente alto.
- El radio de los flancos del filete debe ser bastante grande (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

En el mismo contexto, otra posibilidad de manejar un coeficiente de fricción que contribuya al transporte, consiste en utilizar cilindros con superficies internas rugosas, mediante cilindros estriados (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012). La ventaja de utilizar dichos elementos son las siguientes:

- Para una misma caída de presión, el flujo obtenido con un cilindro que posee estrias es mayor que el obtenido con uno de superficie lisa (Figura 22).

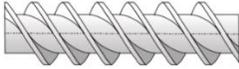
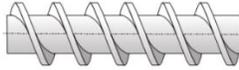
Características del tornillo	Diseño adecuado	Diseño defectuoso
Número de filetes	Sencillo 	Doble 
Ángulo del filete	Grande 	Pequeño 
Radio del flanco del filete	Grande 	Pequeño 

Figura 21. Diseño del husillo para reducir el coeficiente de fricción.

Fuente: (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

Adaptado de "Tecnología de polímeros", Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012, URL: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/16897/1/TEMA_4_extrusion.pdf

- Existe una mayor estabilidad en el flujo que proporciona el cilindro con superficie estriada, de modo que los armónicos de presión a lo largo de la extrusora lo afectan en menor proporción en comparación con un cilindro con superficie lisa (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

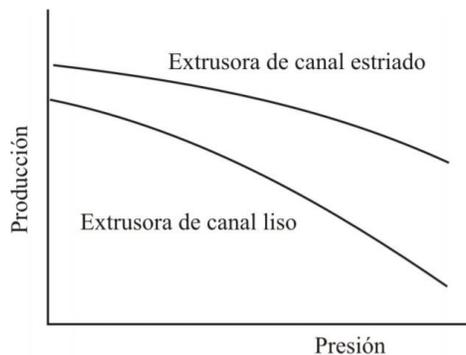


Figura 22. Representación del caudal de salida frente a la presión.

Fuente: (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

Adaptado de "Tecnología de polímeros", Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012, URL: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/16897/1/TEMA_4_extrusion.pdf

Los cilindros con superficie estriada permiten utilizar materiales con pesos elevados y difíciles de transportar, como el jabón o pastas alimenticias. Sin embargo, debido a las altas fuerzas de cizallas generadas en este tipo de cilindros, el consumo del motor será mayor, y, por otra parte, se puede producir una fusión prematura del material, el cual se puede introducir en las estrías, taponándolas y disminuyendo así la eficiencia del proceso (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

Las estrías se pueden incorporar directamente sobre el cilindro o sobre la garganta de alimentación, se disponen en dirección axial y tienen una longitud de varios diámetros de husillo (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012)

2.4.2. Fusión o plastificación del material.

La zona de transporte de material sólido finaliza cuando empieza a formarse una película de material fundido. La fusión del material se iniciará como consecuencia del calor generado por la fricción con el cilindro y el husillo en la zona de transición. En general este calor es suficiente como para iniciar la fusión del material sin necesidad de aplicar calor externo.

El proceso comienza con una fina capa de material fundido que aparecerá junto al cilindro, la cual irá creciendo hasta que su espesor se iguale con el resquicio libre entre el cilindro y el filete del husillo, en tanto que el resto del material formará un lecho sólido. Como consecuencia del giro del husillo se producirá un gradiente de velocidad en la capa de material fundido, situada entre el lecho sólido de material y la pared del cilindro. El material fundido se acopiará en la cavidad anular situada justo delante del filete, avanzando a la parte posterior del canal (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012) como se muestra a continuación:

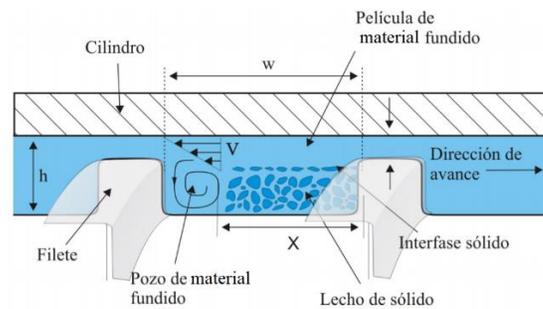


Figura 23. Corte transversal de la extrusora en la zona de transición.

Fuente: (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

Adaptado de "Tecnología de polímeros", Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012, URL: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/16897/1/TEMA_4_extrusion.pdf

A medida que se acumula más material fundido en el "pozo", este aumenta de tamaño y el ancho del lecho sólido disminuye, de este modo se desarrolla una presión que empuja al lecho sólido y lo acumula en la parte anterior del canal. Por eso, a pesar de que la mayor parte de la fusión ocurre en la superficie del cilindro, la altura del lecho sólido no disminuye pero, por otro lado, si lo hace su ancho (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012), como se puede apreciar en la Figura 24.

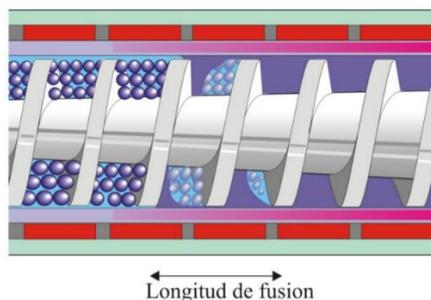


Figura 24. Ancho del pozo de fundido a lo largo de la zona de transición.
 Fuente: (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).
 Adaptado de "Tecnología de polímeros", Beltrán Rico & Marcilla Gomis,
 2012, URL: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/16897/1/TEMA_4_extrusion.pdf

Con una extrusora funcionando de acuerdo a las especificaciones técnicas del equipo, se obtendrá una delgada capa de material renovado en contacto con el cilindro. De manera general es posible despreciar la transmisión de calor entre el pozo de material fundido y el lecho de material sólido. La presencia de este último explica también la purga del aire atrapado entre sus partículas sólidas, ya que a medida que el lecho sólido es compactado y comprimido por el pozo de material fundido, el aire atrapado escapa hacia el exterior por la tolva de alimentación (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

Es importante puntualizar que el flujo de calor por disipación viscosa (cizalla) es favorecido al aumentar la velocidad del husillo. Sin embargo, hay que establecer con cuidado esta variable, ya que al aumentar la velocidad del husillo también aumenta el caudal del material y disminuye el tiempo en el que material reside dentro de la extrusora.

Sin embargo, también es posible la transferencia de calor al material mediante conducción, al calentar las paredes del cilindro empleando una fuente externa. Que la temperatura del cilindro aumente implicará un temprano aumento del flujo de calor por conducción, y por tanto aumento de la velocidad con la que el material se funde. No obstante, este aumento de temperatura también reducirá la viscosidad del material y por lo tanto la generación de calor por disipación viscosa (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012). Una situación común se indica en la Figura 25 en donde se representa la longitud de fusión vs la temperatura del cilindro manteniéndose la velocidad del husillo constante.

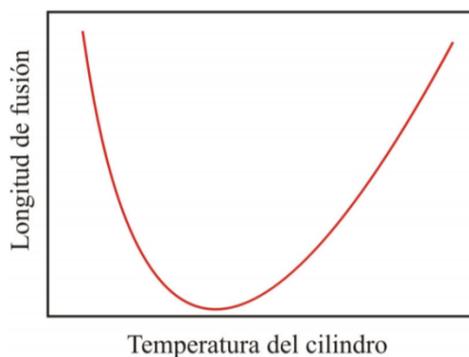


Figura 25. Relación entre la longitud de fusión y la temperatura del cilindro

Fuente: (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

Adaptado de "Tecnología de polímeros", Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012, URL: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/16897/1/TEMA_4_extrusion.pdf

Otro factor importante a considerar es la configuración del husillo, en cuanto a la velocidad y a la relación que existe entre la longitud de fusión con el ángulo del filete y el número de filetes, como se observa en la Figura 26, es decir la dirección angular del

filete del husillo tiene una consecuencia considerable sobre la eficiencia de la fusión del material. De acuerdo con esto, la eficiencia máxima se alcanzaría con un ángulo de 90° , pero con esto el avance del material no se efectuaría. Por ello es importante establecer un ángulo que brinde una fusión eficiente y un transporte efectivo de material, normalmente se utilizan ángulos entre 20 y 30° . Los husillos con múltiples filetes también mejoran el proceso de fusión, pero esto afecta el transporte del material sólido. Por lo que la utilización de este tipo de husillos se limita únicamente a las aplicaciones en que la velocidad de fusión sea la variable comandante (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

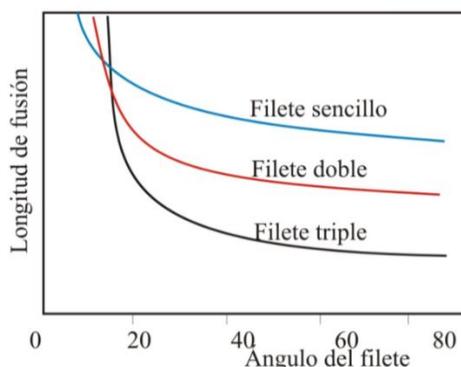


Figura 26. Efecto del ángulo de hélice y del número de filetes sobre la longitud de fusión.

Fuente: (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

Adaptado de "Tecnología de polímeros", Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012, URL: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/16897/1/TEMA_4_extrusion.pdf

Mediante esta investigación se comprueba que la holgura del sistema husillo-cilindro debe ser la menor posible, para que de esta manera el proceso de fusión del material sea exitoso. Por otro lado generalmente, la velocidad con la que el material se funde aumenta a medida que se disminuye la profundidad del canal del husillo, ya que

se realiza una compresión del lecho sólido hacia el pozo de material fundido (Figura 23), mejorando la transmisión de calor y aumentando los efectos de cizalla. Por otro lado, si la compresión se efectúa a una velocidad muy alta se corre el riesgo de que el lecho de material sólido tapone la máquina extrusora (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

2.4.3. Bombeo y dosificación del material.

En la zona dosificación se desarrolla el proceso de transporte o bombeo y presurización del fundido. La zona de dosificado actúa como una bomba de presión que empuja el material hacia la salida, ejerciendo presión sobre el plato rompedor y el cabezal.

La zona de dosificado comienza en el punto en que todas las partículas de material se han fundido. La profundidad del canal es continua en esta zona, por lo que todo el lecho sólido debe desaparecer, caso contrario el aire atrapado podría quedar atrapado en el fundido (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012). El movimiento y presurización del material se produce como resultado del giro del husillo. Savgorodny (1973) puntualiza que “generalmente esta zona es la que determina la producción de una extrusora de husillo.”, (p. 3).

En la zona de dosificado existen tres tipos de flujos: el **flujo directo, de arrastre o de fricción**, que se debe al roce entre el material, el husillo y las paredes del cilindro,

y que es el principal promotor del movimiento del material desde la tolva de alimentación hasta la boquilla; el **flujo inverso, de presión o de retroceso**, que se da “a lo largo del canal helicoidal del husillo”. (Savgorodny, 1973, pág. 3), y cuyo comportamiento es opuesto al anterior y provocado por la diferencia existente entre la presión de la tolva y la del cabezal. Por último, el **flujo de pérdida o de fugas**, que tiene lugar “a través de los huelgos radiales existentes entre las crestas o vértices de los filetes del husillo y la superficie interior del cilindro”. (Savgorodny, 1973, pág. 3), es opuesto al caudal de fricción y producido por el gradiente de presión a lo largo del husillo. La tolerancia radial del ajuste entre el husillo y el cilindro es generalmente de 0.1 mm y, por lo mismo, el flujo de pérdidas es ínfimo en comparación con los otros dos flujos (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012). De hecho, resulta tan insignificante que en la mayoría de los casos no se lo toma en cuenta al efectuar los cálculos de producción. El flujo de la zona de dosificado “es igual a la diferencia entre el flujo directo e inverso, sumando a este última las fugas”. (Savgorodny, 1973, pág. 3), (Figura 27. c.).

El **flujo directo o de arrastre** se origina por el desplazamiento relativo del husillo respecto al cilindro, y tiene lugar debido a que el material acumulado en el espacio anular formado por el núcleo del husillo y la superficie interior del cilindro, es sometido a deformaciones de cizallamiento que las paredes del canal helicoidal transforman en movimiento de avance. El caudal volumétrico del flujo directo depende fundamentalmente de la profundidad y anchura del canal, diámetro del husillo y su velocidad de giro (Savgorodny, 1973). Si existiera únicamente el flujo directo el perfil de velocidades en el extrusor sería aproximadamente lineal (Figura 27. a.), y si las paredes

en movimiento experimentan una velocidad V , la velocidad media de avance del material en el canal sería $V/2$ (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

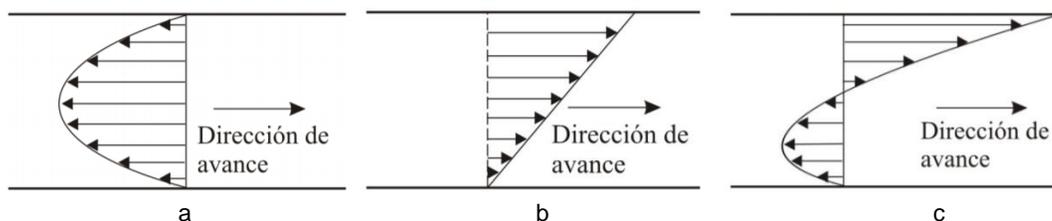


Figura 27. a. Perfil de velocidades originado por el flujo de arrastre.
b. Perfil de velocidades debido al flujo de presión.
c. Perfil de velocidades del flujo total.

Fuente: (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

Adaptado de "Tecnología de polímeros", Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012, URL: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/16897/1/TEMA_4_extrusion.pdf

El flujo inverso o de presión surge debido a la presión sobrante acumulada ante la boquilla, que obliga a fluir al material fundido en dirección contraria. Pero, como el flujo directo es considerablemente mayor se observará sólo la reducción de éste en una magnitud correspondiente al flujo inverso, sin evidenciarse la corriente de material en sentido contrario. La magnitud del flujo inverso depende de la profundidad del canal helicoidal, diámetro del husillo, longitud de la zona de extrusión, presión ejercida por el material fundido sobre la boquilla y de la viscosidad del material (Savgorodny, 1973). El comportamiento de la velocidad debido a un gradiente de presión es parabólico (Figura 27. b.).

Desde un punto de vista vectorial el flujo del material fundido en la zona de dosificado se desarrolla como se muestra en la Figura 28. La porción de material

fundido que se encuentra en la parte superior del canal del husillo (punto C) se transporta hacia adelante y hacia la derecha, mientras que el que se ubica en el punto inferior (punto O) lo hace en la dirección opuesta. La porción de material que se encuentra en los puntos D y E sólo presenta un componente de velocidad en las direcciones axial y longitudinal, respectivamente (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

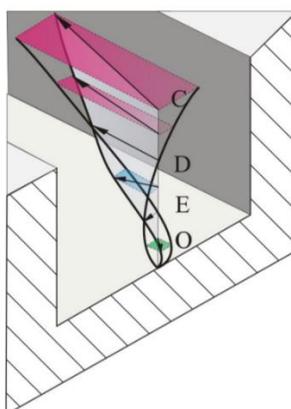


Figura 28. Movimiento global del material fundido en la sección de dosificado de la extrusora con una boquilla en condiciones normales.
 Fuente: (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).
 Adaptado de "Tecnología de polímeros", Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012, URL: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/16897/1/TEMA_4_extrusion.pdf

En la Figura 29 se representa la misma situación desde un punto de vista direccional. Si seguimos el movimiento de una porción del material fundido que se encuentra cerca de las paredes del cilindro, veremos que éste avanzará en toda la longitud de esta superficie hasta que se encuentre con la pared del filete del husillo. Tras lo cual el fundido girará hacia abajo, se deslizará por la pared del filete, y luego cruzará el canal del husillo, deslizándose por la base. Cuando alcance la pared del filete

opuesto, girará hacia el cilindro, volviendo otra vez a describir el mismo tipo de movimiento (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

De acuerdo con esto, una pequeña porción del material, que se encuentra cercano al centro del canal del husillo, no cuenta con componente de velocidad en la dirección transversal (Figura 28, punto D), de modo que avanzará rápidamente por toda la longitud de la extrusora, experimentando un tiempo de residencia menor que el material que se encuentra cercano a las paredes del cilindro y del husillo (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

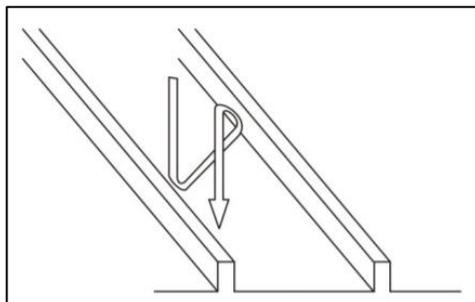


Figura 29. Movimiento del material dentro del canal de la extrusora.

Fuente: (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

Adaptado de "Tecnología de polímeros", Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012, URL: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/16897/1/TEMA_4_extrusion.pdf

La situación descrita implica que la temperatura del material en las diferentes secciones del canal del husillo pueda variar sustancialmente. Así, la mayor temperatura la hallaremos en el centro del canal, en donde el material fundido está expuesto a mayores efectos de cizallas, mientras que en los alrededores las temperaturas serán

inferiores. En consecuencia, se presenta una diferencia de temperatura entre las capas internas y externas del material (Figura 30). Si esta particularidad se mantiene hasta el final del husillo, el extruido que sale por la boquilla no será homogéneo, lo que conlleva problemas de conformado en la boquilla y distorsiones en el producto extruido (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

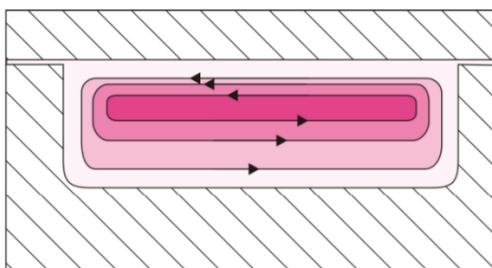


Figura 30. Corte transversal del canal del husillo con las diferentes capas de material fundido en circulación.

Fuente: (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

Adaptado de "Tecnología de polímeros", Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012, URL: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/16897/1/TEMA_4_extrusion.pdf

La forma más efectiva de evitar esta situación consiste en incorporar mezcladores en el husillo, que además de homogenizar la temperatura del material y el material mismo, también son muy útiles para mezclar diferentes aditivos. Esto es muy importante en el presente proyecto, ya que se pretenderá utilizar la extrusora también como un homogeneizador de la masa de jabón con aceites esenciales y fragancias naturales.

2.4.4. Mezclado del material.

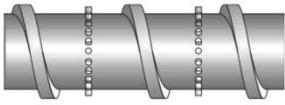
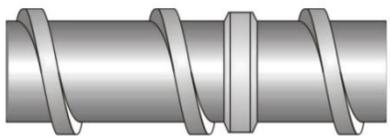
Este proceso se consigue exponiendo al material por diferentes segmentos o zonas que favorezcan su reorientación. “Las secciones de mezclado son simplemente tramos del husillo dentro de la zona de dosificado que tienen una configuración especial para este propósito” (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012, pág. 100).

Algunos de los requisitos que deben cumplir los segmentos de mezclado son:

- Producir una caída de presión mínima, de tal forma que el segmento de mezclado afecte lo menos posible el caudal del material a extruir.
- Evitar zonas muertas en las que el material pudiera retenerse.
- Barrer la superficie del cilindro completamente.
- Ser fáciles de instalar, controlar y limpiar (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

En la siguiente tabla se muestran los diferentes tipos de mezcladores:

Tabla 2
Tipos de mezcladores, ventajas y desventajas.

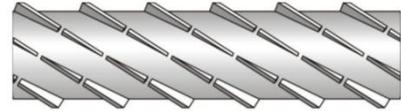
Tipos de mezcladores			
Nombre	Ventajas	Desventajas	Apariencia
Mezclador de agujas.	* Nivel moderado de reorientación	* Supone una restricción al flujo de material	 Orientación perimetral
	* Sencillo, económico y fácil de instalar.	* Reduce el flujo de salida de la extrusora. * Puede crear cuerpos muertos donde se acumule el material.	
Mezclador de anillo.	* Efectivo y fácil de fabricar.	* Provoca una caída de presión relativamente alta. * No tiene la capacidad de impulsar el material hacia adelante.	
Mezclador con filetes desiguales	* Divide y reorienta continuamente el	* Complicado de fabricar.	

continúa

(mezclador material.
Saxton).

* Buena
capacidad de
mezclado.

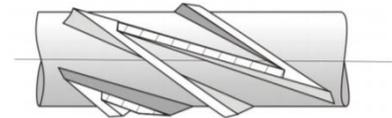
* Promueve el
bombeo del
material hacia
adelante



* Caída de
Mezclador presión

con filetes
secundarios * Favorece el
(tipo zorro) transporte del
material.

* Complicado de
fabricar y montar.



Fuente: (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).
Adaptado de "Tecnología de polímeros", Beltrán Rico & Marcilla Gomis,
2012, URL: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/16897/1/TEMA_4_extrusion.pdf

2.4.5. Desgasificado.

“El desgasificado es necesario sólo en los plásticos que retienen gran cantidad de componentes volátiles o en materiales muy higroscópicos, como es el caso de las poliamidas” (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012, pág. 102).

Como en el presente trabajo se pretende extruir jabón, cuya estructura es compacta y uniforme, no se analizará la etapa de desgasificado. Debido a esto se prescindirá de dicha etapa en el diseño de la máquina extrusora, porque no es importante en este tipo de aplicación.

2.4.6. Conformado.

Este proceso se consigue cuando el material fundido toma la forma de la boquilla conforme sale por esta. El factor más importante en este punto es la velocidad, por ello es imprescindible que el material salga a velocidad constante, factor que no se consigue cuando se extruye perfiles con secciones irregulares. Debido a esto generalmente las boquillas se maquinan con una forma y tamaño que compensen los cambios que se pueda surgir en el extruido, de modo que al final se obtenga un producto con la forma y dimensiones requeridas (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

Existen tres factores que influyen en los cambios de tamaño y forma del material, estos son: el tensionado, la relajación y el enfriamiento.

- El **tensionado** se lleva a cabo mediante sistemas que generalmente consisten en rodillos, los cuales mantienen tenso al producto que sale de la extrusora. Esto hace que generalmente se reduzca ligeramente el tamaño del material, a veces llegando a ser considerable dicha reducción. Además, los productos que no tengan sección circular corren el riesgo de cambiar su

forma debido al estirado (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012). El material en la extrusora está sometido a grandes deformaciones y esfuerzos, por lo que se relaja conforme sale por la boquilla.

- La **relajación** provoca el hinchamiento del material, lo cual sucede con mayor velocidad si la temperatura es muy elevada. El mayor hinchamiento sucede en los primeros instantes luego de que el material deja la extrusora, pero generalmente continúa hinchándose durante las horas ulteriores, incluso a veces puede tardar varios días (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012). A continuación, se presenta un ejemplo sobre un material extruido de sección cuadrada:

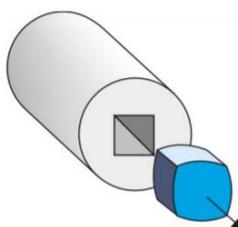


Figura 31. Hinchamiento debido a la relajación de un material de sección cuadrada.

Fuente: (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

Adaptado de “Tecnología de polímeros”, Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012, URL: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/16897/1/TEMA_4_extrusion.pdf

De acuerdo a Beltrán Rico & Marcilla Gomis (2012): “Con una forma cuadrada de boquilla, la dilatación ocurre más en el centro de las caras que en las esquinas, esto es resultado de que los esfuerzos normales que se producen dentro del material serán

mayores en la zona central”. (p. 104). Por otro lado, si el producto extruido es sometido a tensiones no uniformes, la relajación puede provocar la torcedura o combadura del mismo.

- Opuesto a la relajación, el **enfriamiento** produce la contracción del material extruido, reduciendo su tamaño y aumentando su densidad. Es importante comprender que el método, velocidad y homogeneidad del enfriamiento influyen en la microestructura del extruido. Debido a la diferencia de temperatura entre las capas externas e internas del material la contracción no es uniforme, pudiendo presentarse zonas hundidas (rechupadas) al contraerse el interior de producto extruido y enfriado (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012). En la siguiente figura se muestra este fenómeno para un material extruido de sección cuadrada.

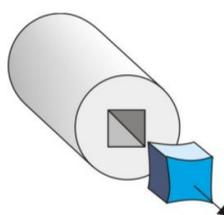


Figura 32. Contracción debida al enfriamiento de un material de sección cuadrada.

Fuente: (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

Adaptado de “Tecnología de polímeros”, Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012, URL: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/16897/1/TEMA_4_extrusion.pdf

2.5. ESTUDIO DEL ARTE.

Para desarrollar este tema, la investigación se enfoca en varios tipos de máquinas extrusoras que han permitido aclarar el producto final que se espera producir luego de esta indagación.

Al navegar por la web se evidencia que no se han desarrollado proyectos de investigación que involucren el diseño y fabricación de máquina extrusoras de jabón. Es posible que esto se deba a la relativa facilidad de su diseño y fabricación, pues a diferencia de otras extrusoras, no necesita un control de temperatura muy preciso, su estructura no es compleja y no necesita de mucha potencia para su funcionamiento. Otra causa puede obedecer a la demanda del productor en el mercado.

En base a lo expuesto en el párrafo anterior, la investigación detalla máquinas extrusoras producidas a nivel nacional e internacional, de distintos fines que podrían apoyar a la producción del equipo objeto de esta investigación.

Existen empresas que se dedican a la fabricación y comercialización de máquinas extrusoras de jabón de tocador y que se detallan a continuación.

- La empresa **BNT**, que fabrica y exporta pequeñas máquinas extrusoras de jabón (Figura 33). Estas extrusoras son fabricadas de acero inoxidable, con sistema de impulsión tipo motor AC monofásico a 220 V, con una capacidad de producción de 100 Kg/h. El elemento de compresión es un tornillo sinfín de

acero que puede girar con velocidad variable gracias a un variador de frecuencia. Posee una resistencia eléctrica en la boquilla, la cual calienta el jabón al momento de ser propiamente extruido.



Figura 33. Pequeña máquina extrusora de jabón marca BNT.

Fuente: www.spanish.alibaba.com2.

- La empresa **Small Soap Machines** también fabrica y exporta pequeñas máquinas extrusoras de jabón (Figura 34). Estas poseen un sistema de calentamiento basado en una resistencia eléctrica prismática similar a las extrusoras de jabón industriales, lo que permite obtener un buen acabado superficial del jabón extruido. Cuentan con un circuito de enfriamiento basado en la recirculación de un fluido, que les permite trabajar por muchas horas sin que decrezca la producción. Utilizan husillos de acero inoxidable que giran a velocidad regulable, con diámetros que van desde los 80 a los 120 mm, los cuales logran una compactación de hasta 150 g. Están fabricadas en acero

² Para más información visitar: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/soap-manufacturing-equipment-small-soap-extruder-62010367611.html?spm=a2700.8699010.normalList.106.4e0f5446qJDNKx>

inoxidable y poseen una capacidad de producción de 100 Kg/h. El sistema propulsor consta de un motor trifásico a 230 V y con una potencia de 2.2 KW.



Figura 34. Pequeña máquina extrusora de jabón de tocador marca Small Soap Machines.
Fuente: www.smallsoapmachines.com³

En la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE se han realizado trabajos de titulación que comprenden el diseño y fabricación de máquinas extrusoras para diversas aplicaciones. Tales son los casos de:

- Una máquina extrusora de filamento de 1.75 y 3 mm de diámetro para impresoras 3D (Figura 35), a partir de polímero reciclado⁴. Este equipo utiliza un husillo extrusor de acero inoxidable adquirido de un proveedor, el cual puede girar a velocidad regulable gracias a un variador de frecuencia Siemens Sinamics V20 y a un motorreductor 40:1, que conecta el eje del motor con el husillo. El sistema propulsor consta de un motor AC a 220 V/60 Hz con una potencia de 0.5 HP. Posee tres calentadores (resistencias

³ Para más información visitar: <http://www.smallsoapmachines.com/soap-extruder-se-98.html>

⁴ Para más información visitar: <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/14935>

eléctricas), cada una con su controlador PID y utiliza termopares tipo K como sensores de temperatura.

Esta extrusora está en la capacidad de extruir PLA, ABS virgen y ABS reciclado, aunque con este último los resultados no son tan favorables.



Figura 35. Máquina extrusora de filamentos para impresoras 3D.

Fuente: (Ortiz Abata, 2018).

Adaptado de "Diseño y construcción de una máquina extrusora de filamentos de 1.75 mm y 3 mm para impresoras 3D, a partir de polímero reciclado", Ortiz Abata, 2018,

URL: <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/14935/1/T-ESPEL-MEC-0144.pdf>

- Una máquina extrusora de alambre de aleación cobre-zinc 70-30⁵. Con una relación de compresión de 8 y una presión de extrusión de 590 MPa. Sus componentes están fabricados de diferentes tipos de acero y su sistema de calentamiento está basado en dos resistencias eléctricas, las cuales se precalientan con equipos de soldadura para alcanzar una temperatura de 600 °C. Como elemento extrusor utiliza un pistón hidráulico que realiza la

⁵ Para más información visitar: <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/444>

extrusión directa solo en caliente. Tiene una capacidad de producción de 3 Kg/h.

Otros casos de fabricación de máquinas extrusoras se presentan a continuación.

- **Máquina extrusora de plástico con accionamiento de motor eléctrico** (Savgorodny, 1973).

La casa inglesa Barand fabrica una serie completa de máquinas de extrusión con husillos de 25, 40, 60 mm de diámetro y relación L:D = 15:1 y 21:1. El sistema de calefacción de la máquina de extrusión SXG3, con husillo de 65 mm de diámetro, está dividido en cuatro zonas con calentadores de resistencia. En cada zona van instalados dos calentadores cilíndricos desmontables de 3 kW cada uno. Para refrigerar el cilindro se ha previsto un ventilador común que puede regular la refrigeración independiente de cada zona por medio de unas llaves previstas para este fin. Para intensificar la refrigeración el cilindro lleva unas aletas anulares de diámetro grande.

La superficie exterior del cilindro lleva un tallado espiral para el paso del aire refrigerante. La estructura del cilindro permite el acoplamiento de un conducto de vacío para la evacuación de los elementos volátiles del material durante el proceso de su transformación. La temperatura se mide mediante unos pares termoelectrónicos de hierro y constantán. Las dos zonas cercanas al cabezal

llevan dos pares termoeléctricos cada una: uno en los calentadores y el otro directamente en la superficie interior del cilindro. La boca de alimentación está construida en disposición tangencial.

El husillo tiene un canal longitudinal de refrigeración para cuando resulta imprescindible intensificar la refrigeración con agua. Un potente cojinete axial de rodillo, con capacidad portadora de 200 kN (20.5 t) a 100 rpm, recibe los esfuerzos axiales que surgen durante el trabajo del husillo; éste es accionado por un motor de corriente alterna de 18 kW, de velocidad variable a través de una transmisión de correas trapezoidales y un reductor de tornillo sin fin.

- **Máquina extrusora de plástico con calentamiento eléctrico por inducción** (Savgorodny, 1973).

En la Figura 36 se muestra una máquina extrusora con calentamiento por inducción tipo RAE-90 de la casa inglesa Burtonwood. El husillo puede ser accionado, indiferentemente, por un motor eléctrico de corriente alterna o continua, que transmite el movimiento a la polea (2). En el primer caso la velocidad del husillo se cambia por medio de un acoplamiento electromagnético o un reductor. Para facilitar el control y la medición de la velocidad del husillo se ha instalado el generador tacométrico (1).

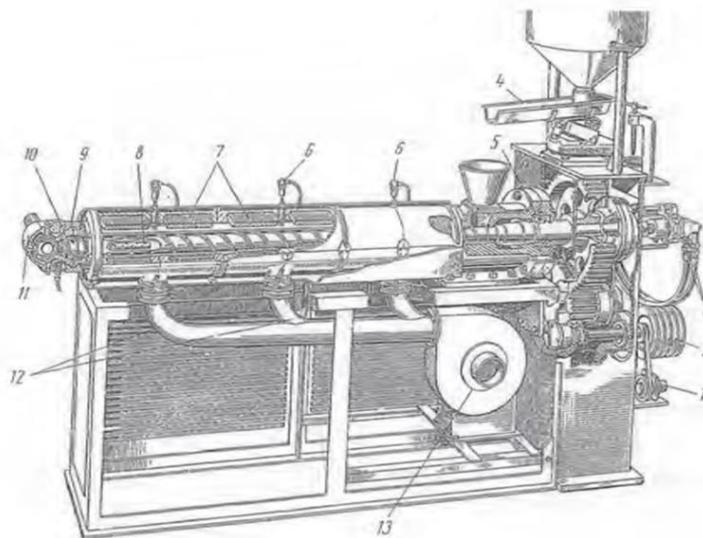


Figura 36. Máquina extrusora de plástico con calentamiento eléctrico por inducción.
Fuente: (Savgorodny, 1973).

Un potente cojinete soporta los esfuerzos axiales del husillo. Para mejorar la extrusión propiamente dicha el extremo del husillo, por el lado del cabezal, lleva la cabeza cónica (10) con tallado helicoidal. El llenado del material granulado se efectúa de manera uniforme con el alimentador vibratorio (4).

Para calentar el cilindro se han instalado los calentadores de inducción (7) con tres o cuatro zonas de control automático (pares termoeléctricos (6). Estos calentadores permiten acelerar el calentamiento, conseguir una refrigeración efectiva de las diferentes zonas del cilindro y un control de la temperatura más exacto.

La refrigeración del husillo se efectúa con agua circulante que entra por uno de los tubos (3), circula refrigerando el husillo, sale por los orificios (8) al canal del husillo, por el cual regresa a su punto de partida y sale por el otro tubo (3). Una refrigeración adecuada de las diferentes zonas del cilindro se consigue con el ventilador (13) y las tres derivaciones (12). El cabezal (11) se fija al cilindro con el anillo del apriete (9). Para desmontar el husillo, este se debe sacar por la parte delantera del cilindro, después de haber quitado el dispositivo de refrigeración.

Características fundamentales:

- Diámetro del husillo: 90 mm.
- Relación (L:D): 20:1.
- Velocidad de giro del husillo: hasta 75 rpm.
- Consumo de energía eléctrica de los elementos de la calefacción: 36 KW.
- Potencia del motor eléctrico: 18-22 KW.

- **Máquinas extrusoras de perfiles** (Espert Bernia, 2011).

La empresa Berstorff⁶ fabrica extrusoras para la fabricación de tubería de PP altamente reforzada, una línea de extrusión operativa, llevando a cabo primero el compounding del polímero y aditivos en un solo paso, y luego la extrusión del tubo. Estas líneas permiten producir tubo coextruido de hasta 3 capas.

Rauwendaal Extrusion Engineering Inc⁷. en colaboración con Rollepaal B. V.⁸ desarrollaron una extrusora monohusillo de compounding (SSCE) para la extrusión directa de poliolefinas y otros polímeros altamente cargados. Esta extrusora se diseñó para la extrusión directa o para compounding in-line, procesos en los cuales el material es mezclado y extruido directamente en el producto final sin realizar el granceado, habitualmente realizado en extrusoras de doble husillo.

La máquina extrusora DREX de Rollepaal cuenta con diferentes puntos de entrada de cargas y aditivos, así como la eliminación de elementos volátiles (Figura 37). El uso de esta tecnología tiene una serie de ventajas frente a la extrusión de doble husillo: menor coste de equipo, menor coste de operación, mayor presión en punta, posibilidad de extrusión sin bomba de engranaje,

⁶ Para más información visitar: www.berstorff.com

⁷ Para más información visitar: www.rauwendaal.com

⁸ Para más información visitar: www.rollepaal.com

menor consumo y menor temperatura de fundido. En general, la longitud de estas extrusoras es mayor que la de doble husillo (entre 5 y 10 veces mayor).

Esta extrusora utiliza múltiples mezcladores de tipo CRD y VIP (Vortex Intermeshing Pin) y tiene una relación L/D de 55. Tiene una gran capacidad de carga (50-60%) y puede generar altas descargas de presión. Por lo tanto, es adecuada para la extrusión directa de tuberías, perfiles, láminas y no es necesario el uso de bombas.



Figura 37. Extrusora monohusillo DREX 120-55 para compounding de Ropllepaal.

Fuente: (Espert Bernia, 2011).

Adaptado de "Extrusión: informe de vigilancia tecnológica 2011. Programa de actividades para la mejora de la competitividad",

Espert Bernia, 2011,

URL:https://www.observatoriplastico.com/ficheros/publicaciones/126155748IT-19_Extrusion_version_web.pdf

2.6. EL JABÓN ARTESANAL

El jabón artesanal ha sido utilizado por la humanidad desde tiempos inmemoriales. En la actualidad no se conoce con exactitud el origen del jabón, hay quienes lo sitúan en Italia, otros en Grecia, en Siria y otros incluso en Egipto (Flores Rodríguez, 2017). Pero lo que sí es seguro es que el jabón es muy antiguo: existen restos de jabón de origen babilonio que datan del 2800 a.C. (Gonzales M, 1975).

Los primeros pueblos que contribuyeron a expandir el uso y elaboración artesanal del jabón fueron los romanos, quienes lo utilizaban en su higiene diaria y se dieron cuenta de que ayudaba a prevenir enfermedades. Es así que, para la edad media, aproximadamente en el siglo VII, surgieron los primeros gremios jaboneros en toda Europa, principalmente en Italia, España (jabón de Castilla) y Francia (Jabón de Marsella) (Flores Rodríguez, 2017).

En España, la fabricación de jabón artesanal se hacía en Almonas y se utilizaba aceite de oliva y almajo como materias primas principales (Figura 38. a). En otras latitudes y países el jabón se elaboraba con cenizas, sebos y grasas de origen animal (Figura 38. b), pero su calidad era inferior. Durante el siglo XIX numerosos descubrimientos y desarrollos científicos de destacados químicos de la época, como Leblan, Solvay y Chevreul, hicieron que la fabricación de jabón artesanal sea un proceso más sofisticado y una industria cada vez más importante (Flores Rodríguez, 2017).



Figura 38. a. Jabón de Almonas, también conocido como jabón “de Castilla”.
b. Jabón fabricado a base de grasas de origen animal.
Fuente: Google – jabones artesanales en la antigüedad.

Sin embargo, en el siglo XX se produjo una escasez de materias primas (grasas de origen animal y vegetal) producto de las grandes guerras. Esto llevó a los productores de jabón a buscar alternativas de origen químico, que fueron aceptados en el mercado y que además suponían un incremento de la rentabilidad de la industria. Este periodo marca el abandono de la fabricación artesanal y el surgimiento de la producción sintética del jabón (Flores Rodríguez, 2017). En la siguiente figura se presenta una comparación entre la producción artesanal y la industrial:

Tabla 3
Comparación entre la producción artesanal e industrial de jabón de tocador en Ecuador.

Comparación de los métodos de producción.		
	Método artesanal	Método Industrial
Nivel de producción	Limitados	Masivos
Grado químico/natural	Su composición es más natural.	Altos valores químicos
Costo de fabricación	Elevados	Bajos
Potencial de personal	Elevados	Mínimo
Inversión inicial	Mínima	Elevada
Calidad final	Poca	Óptima
Tiempo de secado y maduración	16-25 días	1-2 horas

Fuente: (Barbosa Lanchimba, 2012).
 Adaptado de "Estudio de factibilidad para la creación de una microempresa productora y comercializadora de jabón artesanal exfoliante de harina de maíz y efervescente en la ciudad de Quito", Barbosa Lanchimba, 2012, URL: file:///C:/Users/user/Downloads/T-UCE-0003-13.pdf

En la actualidad el jabón de tocador es un producto ampliamente utilizado principalmente para la higiene personal. Es comercializado por un gran número de empresas que imponen su marca en el mercado y que de acuerdo a ello presentan diferentes conceptos, con diferentes formas, tamaños y composiciones (Figura 39). La tecnología desarrollada en estos jabones ha mejorado significativamente durante las últimas décadas, destacándose, sobre todo, la eliminación de gérmenes, la remoción de manchas y en algunos casos el cuidado de la piel.



Figura 39. Jabones comerciales más populares en Latinoamérica.
Fuente: Google – jabones comerciales de diferentes marcas.

Empero, es cierto que las grandes industrias del jabón de tocador buscan ventas masivas al mínimo coste, es decir, conseguir la máxima rentabilidad. Esto implica la utilización de materias primas sintéticas con características que en algunas ocasiones no son tan compatibles con la biología humana, o que por lo general no tienen los beneficios que productos naturales ofrecen al mismo costo. Es por ello que Caisaguano Chiquito (2010) afirma que “los jabones artesanos son de mejor calidad y más beneficiosos para la piel que los jabones comerciales”. (p. 17).

De hecho, por simple lógica, es fácil de intuir que jabones artesanales fabricados con materias primas naturales, tengan mejores efectos sobre la salud humana que jabones fabricados masivamente con materiales sintéticos. Por este motivo, en un mundo globalizado con jabones sintéticos derivados del petróleo, la elaboración de jabones artesanales es una tendencia al alza, que es fácil de realizar, gratificante y ecológica. Además, es posible personalizar el jabón mediante la adición de diferentes aceites esenciales o principios activos, que le aportan propiedades específicas (aliviar el

dolor, mejorar la circulación, cuidar la piel, etc.), (Jabones de elaboración artesanal [pdf], 2016).

Tal es el caso de la empresa Apaika, que produce jabones artesanales, entre otros productos de higiene personal, utilizando materias primas de primera calidad y sin ingrediente químicos, como colorantes, perfumes y espumantes; de tal manera que los jabones son 100% naturales.

2.7. PROCESO DE ELABORACIÓN DEL JABÓN ARTESANAL.

El jabón es un producto químico de tipo agente tensoactivo o surfactante. Su principal propiedad es promover la reducción de la tensión superficial del agua para remover la suciedad; también presenta una gran poder humectante y emulsionante y la capacidad de formar espuma y eliminar los residuos (Flores Rodríguez, 2017).

La fabricación del jabón artesanal se fundamenta en la saponificación, que es una reacción química entre un cuerpo graso (grasa o aceite) y una disolución alcalina (sosa sódica o potásica). Durante la reacción el cuerpo graso se descompone en la disolución alcalina, obteniéndose como productos jabón y glicerina (Figura 40).

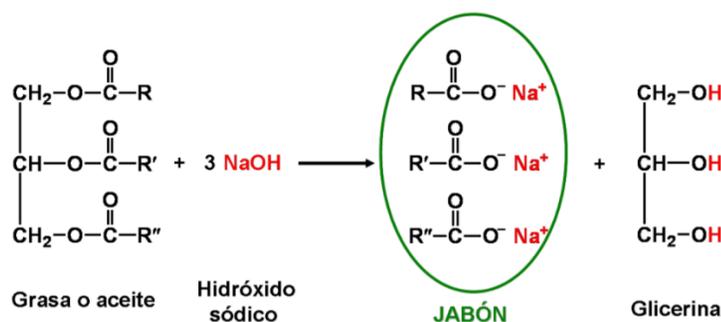


Figura 40. Reacción de Saponificación.

Fuente: (Flores Rodríguez, 2017).

Adaptado de "Ingeniería básica de una Planta de Producción de Jabón Sólido", Flores Rodríguez, 2017,

URL:<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/91407/fichero/TFG+MARTA+FLORES%252FTFG+1617+MARTA+FLORES+RODRIGUEZ.pdf>

En la empresa Apaika la elaboración del jabón es un proceso artesanal que se realiza a mano, entre los principales insumos que intervienen en el mismo están:

- **Aceite de Oliva (*Olea europea*):** con propiedades suavizantes, hidratantes, antioxidantes y antienvjecimiento.
- **Aceite de Laurel (*Laurus nobilis*):** con propiedades antiinflamatorias, antisépticas y antioxidantes. Ayuda a equilibrar las pieles grasas. Aporta aroma al jabón.
- **Hidróxido de Sodio (NaOH):** también llamado sosa cáustica o soda cáustica. Es necesario para la saponificación. Se obtiene de la planta "Salsola Kali" o de la Sal marina (Cloruro de Sodio).

- **Agua (H₂O):** agua pura de manantial.

Y se sigue el siguiente procedimiento:

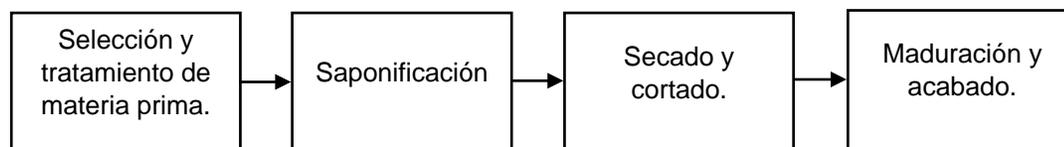


Figura 41. Proceso de elaboración del jabón artesanal en Apaika.
Fuente: elaboración propia.

1. Se seleccionan las materias primas: el aceite de oliva de primera presión en frío, el aceite de laurel, el hidróxido de sodio y el agua pura.
2. Tiene lugar la saponificación. Es un proceso en caliente, dura más de una semana. El aceite de oliva, el hidróxido de sodio y el agua hierven durante varios días en un gran caldero a 200 °C, siendo removidos con palas de madera y convirtiéndose en un jabón líquido espeso. Una vez realizada la cocción, se añade el aceite de laurel. Para comprobar la excelencia de la pasta, el maestro jabonero examina con sus manos la textura y untuosidad de la misma, e incluso prueba la pasta para reconocer en ella un ligero sabor azucarado.
3. La pasta se extiende en el suelo y, una vez endurecida, se procede a su corte manual con alguna cuchilla, trazando líneas horizontales y verticales. Los

jabones resultantes tienen una forma más o menos prismática de sección rectangular.

4. Los jabones necesitarán unos nueve meses para su secado. Para ello se colocan en un lugar fresco, oscuro y seco, apilados con huecos entre ellos para que circule el aire. El aire y el paso del tiempo, hacen que el jabón se enfríe lentamente y pierda un elevado porcentaje de agua.

Para su venta, se empaqueta en cajas personalizadas para cada tipo de jabón.

2.8. PROPIEDADES DEL JABÓN ARTESANAL DE APAIKA.

La empresa Apaika ha realizado el registro sanitario de algunos de sus jabones artesanales más vendidos. En el proceso se han llevado a cabo pruebas cuyos resultados corroboraron la existencia y efectividad de las propiedades de los jabones con determinada composición. Así, por ejemplo, algunas de las propiedades de los jabones artesanales de Apaika son:

- Humectan y cuidan la piel (todos).
- Acción antioxidante (todos).
- Humectan y refrescan (jabón de naranja, limón y mandarina, jabón de cítricos y palo santo).
- Combaten el acné (jabón de cúrcuma, rosas y sábila).

- Acción antiséptica, desinflamatoria y cicatrizante (jabón de Manzanilla y caléndula).
- Acción astringente y balance de PH (jabón de cerveza).
- Alivian sarpullidos e irritaciones (jabón de piña, romero y tomillo).

En lo que se refiere a las propiedades químicas el jabón de Apaika presenta un PH que va desde 9.8 hasta 10.2, dependiendo del aditamento natural. Su humedad es de un máximo un 25%. Entre sus propiedades físicas se destaca su densidad de 1010 Kg/m³.

Por otro lado, durante algunas pruebas reológicas los jabones artesanales de Apaika demostraron ser de muy buena calidad al poseer excelentes propiedades mecánicas.

Durante una prueba llevada a cabo con jabón artesanal base, se notó que este tendía a fluir y deformarse con bastante facilidad sin romper su estructura integral, es decir, sin dividirse en pequeños retazos de jabón base, por lo que aparentaba ser una sola “masa” (Figura 42. a.). La apariencia de esta “masa integral” se rompió solo al cabo de unos segundos para formar una especie de “rodillos” independientes con un vértice común ubicado en el centro (Figura 42. b.). De esta manera, lo que era un disco de jabón se convirtió en una pseudoestrella de jabón que, sin embargo, aún podía considerarse como una sola “masa”.

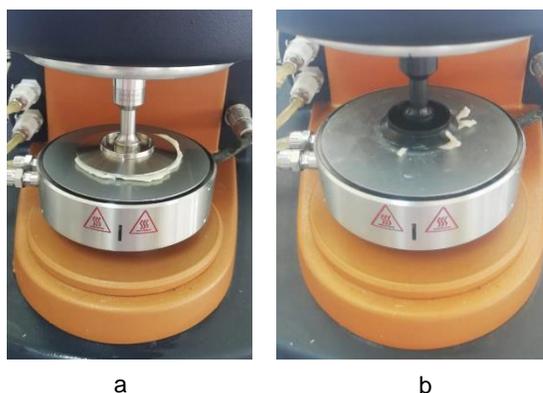


Figura 42. Prueba reológica llevada a cabo con jabón artesanal base de Apaika.
Fuente: Elaboración propia.

Esto también se comprobó mediante los resultados de las pruebas realizadas: se llevó a cabo un experimento en la máquina para pruebas reológicas del Laboratorio de Fluidos de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE (Figura 43), con los siguientes parámetros:

Tabla 4
Parámetros de la máquina para prueba reológica.

Parámetro	Valor
Material del plato.	Plato Peltier de Acero -111990
Geometría del plato.	Plato paralelo de 40 mm de diámetro.
Temperatura de la base.	40 °C
Taza de corte.	20 1/s



Figura 43. Máquina para pruebas reológicas del Laboratorio de Fluidos de la ESPE.
Fuente: Elaboración propia.

Se utilizó una temperatura de la base de 40 °C porque es la temperatura a la que el jabón empieza a fluir con mayor facilidad; y una taza de corte de 20 1/s bajo la consideración de que durante el proceso de extrusión la velocidad a la que se transporta, calienta, compacta y extruye el jabón se desarrolla a esa frecuencia.

En esta investigación se ensayaron cuatro pruebas, en todas ellas se dio un cambio abrupto en los valores de las variables medidas al cabo de 4 segundos, luego de iniciada la prueba (Anexo 1, gráficas). Esto se produjo por la transformación de la muestra de jabón base que se puede observar en la Fig. 30. b. Con esa nueva forma de la muestra en el centro del plato solo había una ínfima cantidad de jabón, la cual no era suficiente para la obtención de resultados reales. Por tal motivo, tomamos solo los datos arrojados durante los primeros 4 segundos de cada prueba. Estos datos y su respectiva gráfica se pueden observar en el Anexo 1.

A continuación, se presentan los resultados de todo el experimento:

Tabla 5
Resultados promedio de las cuatro pruebas reológicas llevadas a cabo con el Jabón base de Apaika.

Temperatura	Taza de corte	Esfuerzo	Viscosidad	Torque
[°C]	[1/s]	[Pa]	[Pa.s]	[N.m]
40	20	12884	644	0.1619

Se observa que se requieren bajos valores de esfuerzo y torque para poder moldear el jabón artesanal de Apaika, comprobándose así las propiedades mecánicas descritas anteriormente.

El experimento se realizó con el fin de determinar los valores de esfuerzo y torque necesarios para hacer fluir y moldear el jabón artesanal. Estos valores serán utilizados posteriormente para el diseño de los elementos de la máquina extrusora.

En cuanto a las propiedades geométricas, los jabones artesanales de Apaika (Figura 44) presentan las dimensiones mostradas en la Figura 45.



Figura 44. Variedad de jabones artesanales de Apaika.
Fuente: elaboración propia.

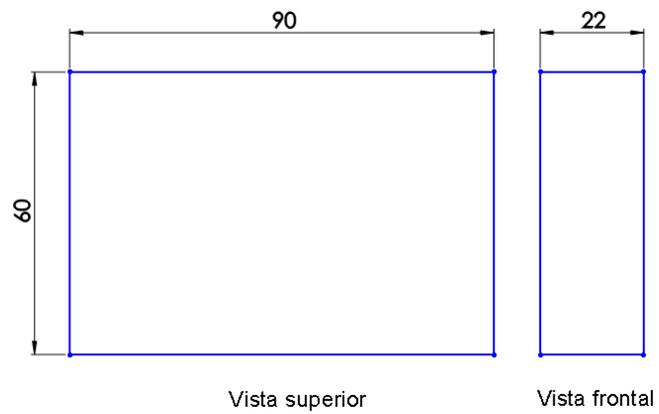


Figura 45. Dimensiones de los jabones artesanales de Apaika, en mm.
Fuente: elaboración propia.

CAPÍTULO 3

DISEÑO Y DESARROLLO DEL PRODUCTO

3.1. METODOLOGÍA.

La realización del presente proyecto se basará en la metodología del **proceso de desarrollo del producto** descrita por Ulrich & Eppinger (2013) en su libro “Diseño y desarrollo de productos”.

Un proceso de desarrollo del producto “es la secuencia de pasos o actividades que una empresa utiliza para concebir, diseñar y comercializar un producto”. (Ulrich & Eppinger, 2013, pág. 12). Este proceso está conformado por 6 fases fundamentales, que se llevarán a cabo para el diseño y desarrollo de la máquina extrusora de jabón artesanal, las fases están descritas a continuación:



Figura 46. Proceso genérico de desarrollo del producto.
Fuente: (Ulrich & Eppinger, 2013).

En cada una de las fases existen métodos estructurados para el desarrollo de actividades. Los métodos estructurados son valiosos por tres razones: primera, hacen explícito el proceso de toma de decisiones, reduciendo, así, la posibilidad de avanzar sin decisiones no fundamentadas. Segunda, actúan como una “lista de verificación” de los pasos clave en cada actividad de desarrollo, por lo que aseguran que no se olviden los aspectos importantes. Tercera, los métodos estructurados son sumamente autodocumentados, de esta manera se tiene pleno registro de las decisiones tomadas durante el desarrollo (Ulrich & Eppinger, 2013).

La fase 4 (pruebas y refinamiento) le otorga un ciclo de mejoramiento continuo al proceso de desarrollo del producto, ya que en ella se realiza un bucle de diseño, pruebas y verificación, que permite refinar aspectos minuciosos del producto hasta su versión final. Este aspecto se muestra a continuación:

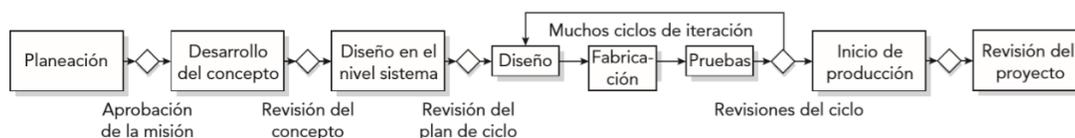


Figura 47. Ciclo de mejoramiento continuo en el proceso de desarrollo del producto.

Fuente: (Ulrich & Eppinger, 2013).

De esta manera, siguiendo los métodos estructurados de cada fase de desarrollo y aplicando el ciclo de mejoramiento continuo, se espera obtener la mejor versión de una máquina extrusora de jabón artesanal para la empresa Apaika.

3.2. PLANEACIÓN DEL PRODUCTO.

El plan del proyecto maximiza la efectividad del trabajo de desarrollo del producto al definir los recursos y el tiempo necesarios para llevarlo a cabo. Además, la planificación produce un ahorro de costos, al identificar los posibles riesgos que podrían impactar y por ende elevar el coste del proyecto. También define una misión enfocada del proyecto, que servirá como guía durante las posteriores etapas del desarrollo.

La planeación del producto es un proceso que consta de 4 pasos.

3.2.1. Identificación de oportunidades.

Para la máquina extrusora de jabón artesanal se identificaron las siguientes oportunidades, las cuales se basaron en el estudio teórico del Capítulo 2:

- Utilizar un sistema motorreductor que conecte el eje del motor con el husillo de extrusión, que permita un fácil montaje y aumente la transmisión de potencia (torque).
- Definir un buen ángulo de alimentación en la tolva para que la entrada y flujo de material sea constante.

- Incorporar un tornillo Cramer u otro mecanismo similar dentro de la tolva, que permita mezclar constantemente el material de entrada.
- Desarrollar una boquilla fácilmente desmontable e intercambiable, con diversidad de formas y tamaños.
- Conseguir una excelente capacidad de producción, mediante una buena sincronización del husillo y las resistencias eléctricas.

3.2.2. Evaluación del proyecto.

Estrategia competitiva.

Debido a que la máquina extrusora de jabón artesanal será diseñada y fabricada exclusivamente para la empresa Apaika, la estrategia competitiva que se propone para este proyecto, es la **Concentración en el Cliente**. Se escogió esta estrategia, ya que se considera que la razón de ser de todo proyecto, debe ser cubrir las necesidades y preferencias de su patrocinador, en este caso la empresa Apaika.

Segmentación de mercados.

Los resultados de la investigación indican que la demanda de producción de jabones artesanales cuenta con la preferencia de 3/10 personas, las cuales han manifestado su preferencia por jabones con ingredientes orgánicos con respecto a los jabones elaborados con ingredientes artificiales. Este mercado está atendido por empresas según su tamaño, que manejan los siguientes tipos de máquinas extrusoras

- **Máquinas para pequeñas y medianas empresas:** son de tamaño pequeño, fáciles de transportar y utilizar. Estos equipos tienen una capacidad de producción promedio de 100 Kg/h.
- **Máquinas para grandes industrias:** tienen un gran tamaño, su utilización es más compleja, pues posee componentes que requieren más energía. Estos equipos tienen una capacidad de producción promedio de 1000 Kg/h⁹.

El presente proyecto de investigación, se enfocará en el primer segmento de mercado, puesto que la empresa Apaika está categorizada por el MIPYMES como una micro empresa.

⁹ Información obtenida de catálogos en: <https://spanish.alibaba.com/g/extruder-soap.html>

Trayectoria tecnológica.

En la máquina extrusora de jabón los elementos no requieren de mucha tecnología, ya que sus componentes son estándar, que se consiguen o fabrican fácilmente en la actualidad, lo cual es suficiente para lograr buenos resultados.

Sin embargo, se podría formular una trayectoria tecnológica trazando una curva S que muestre el desempeño de la máquina extrusora a lo largo del tiempo, al cambiar el diseño del husillo de extrusión (revisar sección 2.3).

Planeación de plataformas del producto.

La máquina extrusora de jabón es de producción única para la empresa Apaika. Por este motivo no existirán productos derivados de tal máquina y todos sus componentes se adquirirán una sola vez durante el ciclo de vida del proyecto.

Tabla 6
Mapa de tecnología de la máquina extrusora de jabón artesanal.

Subsistemas	Tecnologías		
Extrusión	Vástago de extrusión	Husillo de extrusión	Motor
Ingreso de material	Tolva	Tornillo cramer	

continúa

Conformación y moldeo	Cabezal	Boquilla fácilmente desmontable
Control de procesos	Control de temperatura	Control de velocidad

Evaluación de oportunidades de productos fundamentalmente nuevos.

El desarrollo de la máquina extrusora de jabón es factible, viable y rentable, ya que será construida para el uso exclusivo de la empresa Apaika, quien la utilizará para aumentar su producción. Por lo tanto, es un proyecto que solventará una necesidad del cliente sin riesgos. Pues la empresa Apaika cubrirá todos los gastos durante la etapa de diseño y desarrollo del producto y posteriormente aportará con los materiales y dispositivos necesarios para su producción.

Equilibrio de la cartera.

El diseño, desarrollo y fabricación de la máquina extrusora será patrocinada por la empresa Apaika, cuya razón de ser es la producción y comercialización de jabones elaborados artesanalmente, cuyos ingredientes proceden de productos naturales.

3.2.3. Asignación de recursos y planeación de tiempos.

Asignación de recursos.

Los recursos con los que se cuenta para la fabricación del producto son:

- Asesoría de un profesional experto en la rama de la ingeniería mecatrónica.
- Taller metalmecánico bien equipado con máquinas industriales como torno, fresadora, taladro, equipos de soldadura MIG/MAG y SMAW, dobladora de chapas metálicas, entre otros.
- Una persona para la construcción.

La capacidad de uso definida para cada uno de los recursos, se establece en el 100%.

Programación del proyecto.

Se presenta el siguiente diagrama de actividades: las barras rojas representan las actividades críticas y las franjas grises la línea base.

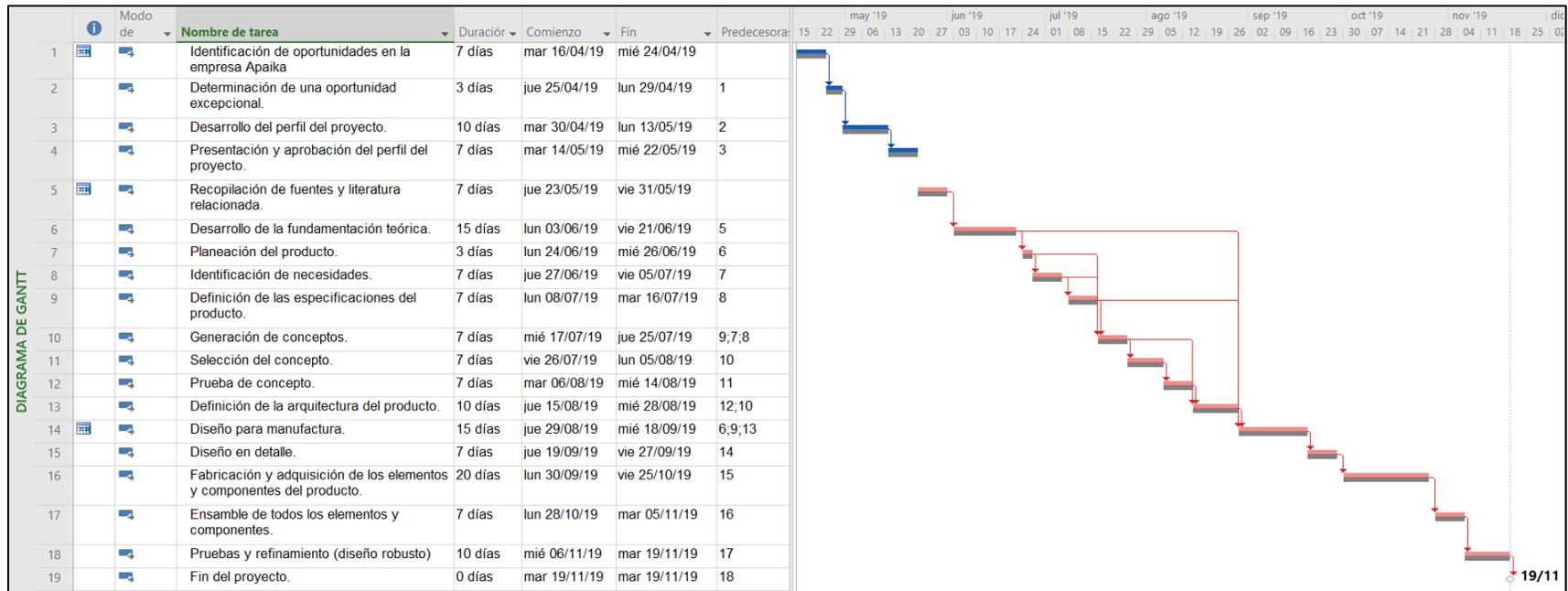


Figura 48. Diagrama de Gantt del proyecto.
Fuente: elaboración propia.

3.2.4. Definición de la planeación del anteproyecto.

Visión.

La visión del proyecto queda delimitada como:

Desarrollar una máquina extrusora de jabón que cuente con características óptimas en cada uno de sus elementos.

Misión.

Tabla 7
Declaración de la misión.

Declaración de la misión: máquina extrusora de jabón artesanal.	
Descripción del producto	Máquina para compactar y extruir jabón artesanal.
Propuesta de valor	* Mediano tamaño y fácil utilización.
	* Elementos optimizados.
	* Se satisfacen todas las necesidades de la empresa Apaika.
Objetivos clave de negocio	* Aumentar la producción de la empresa Apaika.
	* Servir como plataforma para productos artesanales naturales.
	* No contamina el ambiente. * Además de extruir el jabón también debe cortarlo.
Mercado primario	Empresa de fabricación de jabones artesanales

continúa

	naturales, Apaika.
Mercados secundarios	<ul style="list-style-type: none"> * Pequeñas empresas de jabones artesanales. * Pequeñas empresas de productos artesanales naturales. * Mercado de extrusión.
Suposiciones y restricciones	<ul style="list-style-type: none"> * Componentes adquiridos a través de proveedores locales. * Elementos fabricados con materiales de calidad. * Producto desarrollado bajo la norma VDI 2206. * Financiamiento total por parte de la empresa Apaika. * Costos convenientes.
Involucrados	<ul style="list-style-type: none"> * Empresa de jabones artesanales naturales Apaika. * Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE. * Operaciones de manufactura. * Proveedores locales de componentes.

3.3. IDENTIFICACIÓN DE NECESIDADES.

En este apartado se presenta la identificación completa de un conjunto de necesidades del cliente. En este sentido, los objetivos de esta etapa son:

- Asegurar que el producto se enfoque en las necesidades del cliente y asegurar que todas y cada una de ellas, en especial las críticas, sean cubiertas.
- Identificar necesidades latentes u ocultas, así como necesidades explícitas.
- Proporcionar una base de datos para justificar las especificaciones del producto.
- Crear un registro de archivos que documente las actividades desarrolladas durante el proceso de identificación de necesidades.

El proceso de identificación de necesidades consta de 4 pasos:

3.3.1. Recopilación de datos sin procesar de los clientes.

Para recopilar la información de los clientes se utilizó los métodos de la entrevista y la observación, la misma que fue tabulada para observar los resultados:

Entrevista.

Tabla 8
 Tabla de entrevista a un cliente líder.

Entrevistado:	Ing. Fernando Olmedo	Entrevistador:	Ramiro Galindo
Dirección:	ESPE	Fecha:	18/04/2019
Teléfono:	098-796-6584		
¿Dispuesto a otra llamada?	si		
Pregunta/sugerencia	Enunciado del entrevistado	Necesidad interpretada	
		Se llevará a cabo un análisis reológico de la masa inicial de jabón, para conocer el torque y la presión necesarios para lograr compactarla y extruirla.	
Potencia de extrusión.	Se debe realizar un análisis reológico del fluido con el que se va a trabajar.		
Acople entre el motor y el husillo de extrusión.	Por lo general las máquinas extrusoras cuentan con una caja reductora que acopla el motor y el husillo de extrusión. Esta configuración ayuda a aumentar el torque de este último. Sin embargo, se podría saber exactamente si se requiere o no una caja reductora mediante el análisis reológico.	El uso de una caja reductora para acoplar el motor y el husillo de extrusión depende del análisis reológico de la masa inicial de jabón.	

continúa

Tornillo de extrusión.	Usar doble tornillo de extrusión en lugar de uno solo trae muchos beneficios, principalmente reducción de tiempos y aumento de producción. Empero, esta configuración resulta bastante costosa.	Analizar la posibilidad de utilizar un doble tornillo de extrusión de acuerdo a los recursos económicos disponibles.
------------------------	---	--

Tabla 9
 Tabla de entrevista al cliente (representante de Apaika).

Entrevistado:	Lic. Mario Galindo	Entrevistador:	Ramiro Galindo
Dirección:	Apaika, Urb. Álamo, Manta	Fecha:	20/04/2019
Teléfono:	096-094-9151		
¿Dispuesto a otra llamada?	Si		
Pregunta/sugerencia	Enunciado del entrevistado	Necesidad interpretada	
Tamaño de la máquina	La máquina extrusora debe ser de tamaño mediano, para que la producción sea continua y no ocupe mucho espacio.	La máquina extrusora de jabón tiene las dimensiones acordes a una máquina de mediana producción.	

continúa

Mezcla inicial	La idea es alimentar la máquina con la masa inicial de jabón estándar, y allí mismo, dentro de la tolva, agregar el resto de componentes (aceites y fragancias esenciales) para que todo se homogenice ese momento.	La máquina extrusora de jabón homogeniza todos los componentes dentro de la tolva y el tornillo de extrusión.
Material	Las sustancias para elaborar el jabón son de carácter básico: bastante caústicos. Debe evitarse por completo cualquier tipo de reacción química espontánea al hacer contacto con materiales altamente reactivos.	La máquina extrusora de jabón está fabricada con materiales reactivamente inertes, especiales para trabajar con productos de aseo.

Observación:

Tabla 10
 Tabla de observación 1.

Observado:	Extrusión y conformación de jabón	Fuente: YouTube
Empresa:	A2 Ingeniería LTDA	
Observador:	Ramiro Galindo	
Fecha:	19/04/2019	
Link:	https://www.youtube.com/watch?v=2QGqFo_SNM&t=24s	
Atributo	Observación	Necesidad interpretada
Capacidad de producción.	La máquina extrusora es capaz de producir de 50 a 100 kg/h de jabón.	La máquina extrusora de jabón tiene una capacidad de producción competitiva al de la máquina observada.
Arquitectura de la máquina	La máquina es totalmente desarmable.	En la máquina extrusora de jabón todos los componentes son de fácil desmontaje.
Paro de seguridad.	Existe un fin de carrera en la tapa de la tolva de alimentación.	La máquina extrusora de jabón cuenta con un fin de carrera en la tapa de la tolva de alimentación, para así detectar cuándo la tapa ha sido abierta.
Sentido de giro del husillo de extrusión.	Un interruptor fija el sentido de giro del tonillo de extrusión. Puede girar en sentido horario o	El tornillo de extrusión de la máquina extrusora de jabón gira en sentido horario o antihorario.

continúa

antihorario.

Velocidad de giro del tornillo de extrusión.	Es posible controlar la velocidad de giro del tornillo de extrusión mediante un potenciómetro ubicado en el tablero de control.	La velocidad de giro del tornillo de extrusión de la máquina extrusora de jabón es regulable.
Vástago de extrusión.	La máquina incluye un disco de homogenización al final del vástago de extrusión.	La máquina extrusora de jabón posee un disco de homogenización al final del vástago de extrusión. (!)
Control de temperatura	La temperatura necesaria para el proceso es proporcionada por una resistencia eléctrica.	La temperatura de la masa de jabón en la máquina extrusora es controlada mediante una resistencia eléctrica.

Tabla 11
Tabla de observación 2.

Observado:	Extrusora de jabón 1 10 2018.	Fuente:	YouTube
Empresa:	Esteban y concepción		
Observador:	Ramiro Galindo		
Fecha:	22/04/2019		
Link:	https://www.youtube.com/watch?v=m_-b8lcoSCU		
Atributo	Observación	Necesidad interpretada	

continúa

Tolva de alimentación.	La tolva de alimentación tiene un gran tamaño en comparación con el resto de la máquina.	La tolva de alimentación de la máquina extrusora de jabón posee una gran capacidad en volumen.
Vástago de extrusión.	El vástago de extrusión es de longitud reducida. Parece tener menos de 60 cm de largo.	La máquina extrusora de jabón cuenta con un vástago de extrusión corto de longitud.
Resistencia eléctrica.	La resistencia eléctrica se encuentra ubicada al final del vástago de extrusión, envolviendo la boquilla.	La resistencia eléctrica para controlar la temperatura en la máquina extrusora de jabón está ubicada al final, sobre la boquilla de extrusión.
Indicadores de variables.	El panel de control cuenta con indicadores de temperatura de la resistencia eléctrica y velocidad del husillo de extrusión.	El panel de control de la máquina extrusora de jabón tiene indicadores de temperatura y velocidad.

3.3.2. Interpretación de datos sin procesar.

En esta etapa los datos son procesados con el objetivo de identificar y redactar eficazmente las necesidades del cliente. Este proceso busca alinear las necesidades que mejor se adapten a la misión definida para el proyecto, las mismas que se detallan a continuación.

Tabla 12
Lista de necesidades del cliente interpretadas.

Número		Necesidad
1	Tornillo de extrusión	El tornillo de extrusión puede comprimir y extruir la masa inicial de jabón.
2	Caja reductora	La máquina extrusora de jabón cuenta con una caja reductora que acopla el eje del motor con el tornillo de extrusión y proporciona más torque a este último.
3	Máquina extrusora de jabón	La máquina extrusora de jabón es competitiva a nivel del mercado en su capacidad de producción.
4	Máquina extrusora de jabón	En la máquina extrusora de jabón todos sus componentes son desmontables.
5	Tolva de alimentación	La tolva de alimentación cuenta con un fin de carrera en su tapa.
6	Tornillo de extrusión	El tornillo de extrusión puede girar en sentido horario y antihorario.
7	Tornillo de extrusión	El tornillo de extrusión gira con velocidad variable - regulable.
8	Vástago de extrusión	Al final del vástago de extrusión existe un disco de homogenización fácilmente intercambiable.
9	Resistencia eléctrica	La resistencia eléctrica proporciona la temperatura adecuada a la masa de jabón.
10	Máquina extrusora de jabón	La máquina extrusora de jabón es de tamaño mediano.
11	Máquina extrusora de jabón	La máquina extrusora homogeniza todos los componentes del jabón.

continúa

12	Máquina extrusora de jabón	La máquina extrusora está fabricada con materiales reactivamente inertes a los componentes del jabón.
13	Tolva de alimentación	La tolva de alimentación tiene gran capacidad en volumen.
14	Vástago de extrusión	El vástago de extrusión es corto de longitud.
15	Resistencia eléctrica	La resistencia eléctrica envuelve la boquilla de extrusión.
16	Panel de control	El panel de control cuenta con indicadores de temperatura y velocidad.

3.3.3. Organización de las necesidades en una jerarquía.

A fin de concentrar la atención y los esfuerzos en satisfacer las necesidades más relevantes, se agruparon los enunciados de necesidades similares y se jerarquizaron. Esto permitió identificar las necesidades primarias, las generales que comprenden otras necesidades más específicas o secundarias de la misma naturaleza.

El objetivo de esta actividad es eliminar los enunciados de necesidades generales e identificar enunciados de necesidades específicas, hasta lograr obtener una lista de necesidades más específica, lo que facilitará la atención y satisfacción de las mismas. Es así que las necesidades jerarquizadas son las siguientes:

Tabla 13
Lista jerárquica de necesidades primarias y secundarias del cliente.

<p>La máquina extrusora cuenta con suficiente energía para compactar y extruir jabón.</p>	<p>La máquina extrusora de jabón es competitiva en el mercado.</p>
<p>*** El tornillo de extrusión puede comprimir y extruir la masa inicial de jabón.</p>	<p>*** La máquina extrusora de jabón tiene muy buena capacidad de producción.</p>
<p>** La máquina extrusora de jabón cuenta con una caja reductora que acopla el eje del motor con el tornillo de extrusión y proporciona más torque a este último.</p>	<p>** El tornillo de extrusión puede girar en sentido horario y antihorario.</p>
<p>En la máquina extrusora de jabón todos sus componentes son desmontables.</p>	<p>*** El tornillo de extrusión gira con velocidad variable - regulable.</p>
<p>** Al final del vástago de extrusión existe un disco de homogenización fácilmente intercambiable.</p>	<p>**! La máquina extrusora homogeniza todos los componentes del jabón.</p>
<p>La máquina extrusora de jabón es de tamaño mediano.</p>	<p>*** La máquina extrusora está fabricada con materiales reactivamente inertes a los componentes del jabón.</p>
<p>** El vástago de extrusión es corto de longitud.</p>	<p>** La tolva de alimentación tiene gran capacidad en volumen.</p>
<p>La resistencia eléctrica proporciona la temperatura adecuada a la masa de jabón.</p>	<p>* El panel de control cuenta con indicadores de temperatura y velocidad.</p>
<p>* La resistencia eléctrica envuelve la boquilla de extrusión.</p>	<p>La tolva de alimentación cuenta con un fin de carrera en su tapa.</p>

Obsérvese que las calificaciones de importancia para las necesidades secundarias están indicadas por el número de asteriscos; tres asteriscos denotan necesidades de importancia crítica. Las necesidades latentes están denotadas por el signo (!).

3.3.4. Establecimiento de la importancia relativa de las necesidades.

De la lista jerárquica de necesidades del cliente (Tabla 13) se considera únicamente los enunciados de necesidades secundarias. Se establece la importancia relativa con una escala del 1 al 5; 1 denota una importancia mínima y 5 una importancia máxima. En base a esto, se obtiene la siguiente lista de necesidades definitiva:

Tabla 14
Listado de necesidades del cliente definitivo.

Núm.		Necesidad	Imp.
1	Tornillo de extrusión	El tornillo de extrusión puede comprimir y extruir la masa inicial de jabón.	5
2	Caja reductora	La máquina extrusora de jabón cuenta con una caja reductora que acopla el eje del motor con el tornillo de extrusión y proporciona más torque a este último.	4
3	Máquina extrusora de jabón	La máquina extrusora de jabón tiene muy buena capacidad de producción.	5
4	Tornillo de extrusión	El tornillo de extrusión puede girar en sentido horario y antihorario.	4

continúa

5	Tornillo de extrusión	El tornillo de extrusión gira con velocidad variable - regulable.	5
6	Máquina extrusora de jabón	La máquina extrusora homogeniza todos los componentes del jabón.	5
7	Máquina extrusora de jabón	La máquina extrusora está fabricada con materiales reactivamente inertes a los componentes del jabón.	5
8	Tolva de alimentación	La tolva de alimentación tiene gran capacidad en volumen.	4
9	Panel de control	El panel de control cuenta con indicadores de temperatura y velocidad.	3
10	Vástago de extrusión	Al final del vástago de extrusión existe un disco de homogenización fácilmente intercambiable.	4
11	Vástago de extrusión	El vástago de extrusión es corto de longitud.	3
12	Resistencia eléctrica	La resistencia eléctrica envuelve la boquilla de extrusión.	3
13	Tolva de alimentación	La tolva de alimentación cuenta con un fin de carrera en su tapa.	3

3.4. ESPECIFICACIONES DEL PRODUCTO.

Las necesidades del cliente se expresan generalmente en el “lenguaje del mismo”. Estas expresiones o enunciados de necesidades son útiles para crear un sentido claro de los problemas que son de interés para el cliente, pero sirven de muy

poco respecto a cómo diseñar y construir el producto. Simplemente dejan demasiado margen para interpretación subjetiva. Por esta razón es imperativo establecer un conjunto de especificaciones que explican, con detalles precisos y medibles, lo que el producto tiene que hacer.

En este apartado se desarrollará una lista de especificaciones que denoten la descripción precisa de lo que el producto tiene que ser.

Este proceso consta de 10 pasos:

3.4.1. Elaboración de la lista de métricas.

En base a la lista de necesidades del cliente (Tabla 14) se formula la lista de métricas de acuerdo a la satisfacción de las necesidades. Estas métricas permitirán establecer todos los aspectos técnicos con los que debe contar el producto para satisfacer al cliente.

La investigación estableció un total de 16 métricas, las cuales se ordenaron de acuerdo al orden de importancia relativa y a la unidad de medida respectivas:

Tabla 15
Lista de métricas para la máquina extrusora de jabón artesanal.

Métrica Núm.	Núm. de necesidad	Métrica	Imp.	Unidades
1	1,2,4	Torque del motor.	5	Nm
2	1,4,5	Tipo de motor.	4	Lista.
3	1,4	Voltaje de alimentación del motor.	4	V
4	4,6,9	Capacidad de producción.	5	Kg/h
5	9	Volumen de la tolva de alimentación.	4	L
6	8	Material de los componentes en contacto con el jabón.	5	Lista.
7	4,12	Tamaño de la máquina extrusora.	4	Subj.
8	5	Sentido de giro del tornillo de extrusión.	3	CW/CCW
9	6	Velocidad de giro del tornillo de extrusión.	5	rpm
10	7	Homogenización de todos los componentes del jabón.	5	Subj.
11	1,4,13	Temperatura de extrusión	5	°C
12	11	Todos los componentes de la máquina extrusora son desmontables.	4	si/no
13	10	El panel de control cuenta con indicadores de temperatura y velocidad.	3	si/no
14	11	Longitud del vástago de extrusión.	3	mm
15	14	Fin de carrera en la tapa de la tolva.	4	si/no
16	13	Boquilla de extrusión calentada.	5	si/no

En la tabla se incluyó una columna para identificar las necesidades que son satisfechas por cada una de las métricas. Así, por ejemplo, se puede observar, la primera métrica satisface las necesidades 1, 2 y 4 (ver Tabla 14).

Algunas métricas no son medibles técnicamente, un ejemplo es la métrica “Homogenización de todos los componentes del jabón”, la cual no se puede medir mediante una unidad física pero sí se puede comprobar mediante otros criterios cualitativos. La unidad de medida de este tipo de métricas es subjetiva (subj.).

3.4.2. Matriz de comparación necesidades vs métricas.

La importancia de la relación entre necesidades y métricas radica en verificar en qué medida las métricas establecidas cubren todas las necesidades del cliente.

Las métricas más útiles son aquellas que reflejan el grado al cual el producto satisface las necesidades del cliente. La relación entre necesidades y métricas es esencial para todo el concepto de especificaciones (Ulrich & Eppinger, 2013).

Para tener una visión general y gráfica de lo expuesto, se construyó la matriz de comparación necesidades vs métricas (Tabla 16).

3.4.3. Benchmarking con la competencia.

Con la finalidad de evaluar a los competidores de máquinas extrusoras, se realiza una comparación tecnológica entre productos similares de varios fabricantes de acuerdo a las métricas establecidas. De esta manera se conocerán los valores de las métricas (especificaciones) que deberá poseer el producto, objeto de esta investigación, para que sea competitivo.

Se compararon 5 fabricantes de máquina extrusoras de jabón. Los resultados se muestran a continuación.

Tabla 17
Benchmarking con la competencia basado en métricas.

Métrica Núm.	Núm. de necesidad	Métrica	Imp.	Unid.	Pure Chemistry	Xinda	BNT	Small soap machines	Rameshwar
1	1,2,4	Torque del motor.	5	Nm	-	2000	-	200	3182
2	1,4,5	Tipo de motor.	4	Lista.	trifásico	trifásico	monofásico	trifásico	trifásico
3	1,4	Voltaje de alimentación del motor.	4	V	220	380	220	230	-
4	4,6,9	Capacidad de producción.	5	Kg/h	50	1000	100	50	1000
5	9	Volumen de la tolva de alimentación.	4	L	-	250	8	10	200
6	8	Material de los componentes en	5	Lista.	acero inoxidable	Q235 acero	acero inoxidable	acero inoxidable	acero inoxidable

continúa

		contacto con el jabón.	inoxidable						
			304						
7	4,12	Tamaño de la máquina extrusora.	4	Subj.	pequeña	grande	pequeña	mediana	grande
8	5	Sentido de giro del tornillo de extrusión.	3	CW/CCW	CW y CCW	-	CW y CCW	CW y CCW	CW y CCW
9	6	Velocidad de giro del tornillo de extrusión.	5	rpm	20 (variable)	-	60 (variable)	100 (variable)	-
10	7	Homogenización de todos los componentes del jabón.	5	Subj.	no	si	no	no	no
11	1,4,13	Temperatura de extrusión	5	°C	40	60	40	50	60
12	11	Todos los componentes de la máquina extrusora son desmontables.	4	si/no	si	no	no	no	no
13	10	El panel de control cuenta con indicadores de temperatura y velocidad.	3	si/no	no	no	no	no	si
14	11	Longitud del vástago de extrusión.	3	mm	300	1500	500	600	1300
15	14	Fin de carrera en la tapa de la tolva.	4	si/no	si	no	no	no	no
16	13	Boquilla de extrusión calentada.	5	si/no	si	no	si	si	si

3.4.4. Benchmarking basado en la de satisfacción de las necesidades.

También se llevó a cabo un benchmarking con la competencia basado en la percepción de satisfacción de las necesidades del cliente (una mayor cantidad de puntos corresponde a una mayor percepción de satisfacción de la necesidad).

Tabla 18
Benchmarking con la competencia basado en la percepción de satisfacción de las necesidades del cliente.

Núm.	Necesidad	Imp.	Pure Chemistry	Xinda	BNT	Small soap machines	Rameshwar
1	El tornillo de extrusión puede comprimir y extruir la masa inicial de jabón.	5	*****	*****	*****	*****	*****
2	La máquina extrusora de jabón cuenta con una caja reductora que acopla el eje del motor con el tornillo de extrusión y proporciona más torque a este último.	4	****	*	*****	*****	****
3	La máquina extrusora de jabón tiene muy buena capacidad de producción.	5	***	*****	****	***	*****
4	El tornillo de extrusión puede girar en sentido horario y antihorario.	4	*****	-	*****	*****	*****
5	El tornillo de extrusión gira con velocidad variable - regulable.	5	*****	-	*****	*****	-

continúa

6	La máquina extrusora homogeniza todos los componentes del jabón.	5	**	****	*	****	****
7	La máquina extrusora está fabricada con materiales reactivamente inertes a los componentes del jabón.	5	*****	*****	*****	*****	*****
8	La tolva de alimentación tiene gran capacidad en volumen.	4	****	*****	***	*****	*****
9	El panel de control cuenta con indicadores de temperatura y velocidad.	3	**	**	**	***	*****
10	Al final del vástago de extrusión existe un disco de homogenización fácilmente intercambiable.	4	*****	*	****	*****	*****
11	El vástago de extrusión es corto de longitud.	3	*****	***	****	***	**
12	La resistencia eléctrica envuelve la boquilla de extrusión.	3	*****	*	*****	*****	*
13	La tolva de alimentación cuenta con un fin de carrera en su tapa.	3	*	*	*	*	*

Nótese que la empresa que mejor satisface las necesidades de nuestro cliente es la empresa Small Soap Machines (columna en verde). Basarnos en la arquitectura

y especificaciones de su producto podría ser de mucha ayuda en las siguientes fases del proceso de desarrollo de la máquina extrusora de jabón artesanal.

3.4.5. Valores objetivo ideales y marginalmente aceptables.

Tras sintetizar la información obtenida mediante el benchmarking con la competencia se determinan los valores objetivo. Se plantean dos tipos de valores objetivo: un valor ideal, que es el mejor resultado que se puede esperar para la métrica, y un valor marginalmente aceptable, que es el valor de la métrica que apenas haría viable el producto desde el punto de vista tecnológico.

Los valores objetivo ideales y marginalmente aceptables para la máquina extrusora de jabón artesanal se muestran a continuación:

Tabla 19
Lista de especificaciones objetivo.

Métrica Núm.	Núm. de necesidad	Métrica	Imp.	Unid.	Valor marginal	Valor ideal
1	1,2,4	Torque del motor.	5	Nm	≥ 200	≥ 250
2	1,4,5	Tipo de motor.	4	Lista.	monofásico	trifásico
3	1,4	Voltaje de alimentación del motor.	4	V	220-380	220
4	4,6,9	Capacidad de producción.	5	Kg/h	≥ 40	≥ 50
5	9	Volumen de la tolva de alimentación.	4	L	8-10	≥ 10
6	8	Material de los componentes en	5	Lista.	acero	acero

continúa

		contacto con el jabón.			inoxidable	inoxidable
7	4,12	Tamaño de la máquina extrusora.	4	Subj.	pequeña	mediana
8	5	Sentido de giro del tornillo de extrusión.	3	CW/CCW	CW	CW y CCW
9	6	Velocidad de giro del tornillo de extrusión.	5	rpm	30 (variable)	60 (variable)
10	7	Homogenización de todos los componentes del jabón.	5	Subj.	no	si
11	1,4,13	Temperatura de extrusión	5	°C	≥ 40	≤ 60
12	11	Todos los componentes de la máquina extrusora son desmontables.	4	si/no	no	si
13	10	El panel de control cuenta con indicadores de temperatura y velocidad.	3	si/no	no	si
14	11	Longitud del vástago de extrusión.	3	mm	≥ 200	≤ 600
15	14	Fin de carrera en la tapa de la tolva.	4	si/no	no	si
16	13	Boquilla de extrusión calentada.	5	si/no	no	si

En el escenario perfecto, el objetivo al fabricar la máquina extrusora sería alcanzar las especificaciones ideales, sin embargo, esto puede significar un aumento del costo, por lo que se hace necesario efectuar concesiones a fin de lograr buenos resultados sin sobredimensionar los elementos y componentes del producto, con lo cual se evita superar el presupuesto disponible.

3.4.6. Desarrollo de modelos técnicos del producto.

Un modelo técnico del producto es una herramienta para predecir los valores de las métricas para un conjunto particular de decisiones de diseño. Estos modelos se pueden usar para pronosticar el rendimiento del producto en varias dimensiones. También permiten predecir con rapidez qué tipo de rendimiento se puede esperar de una selección particular de las variables de diseño, sin necesidad de costosas experimentaciones físicas.

Se desarrollaron dos modelos técnicos: uno del motor y otro para la capacidad de producción. Se eligieron estos modelos porque son los aspectos que más interesan en una máquina extrusora, ya que de ellos depende principalmente su competitividad.

- **Modelo dinámico del torque del tornillo de extrusión:**

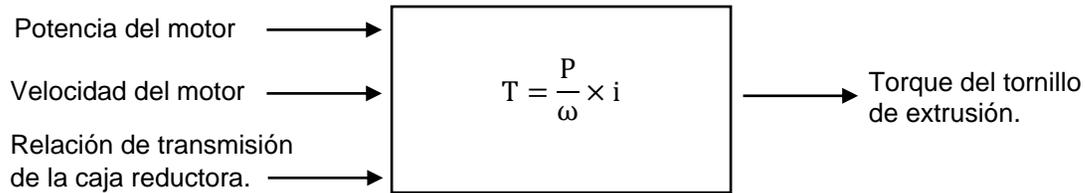


Figura 49. Modelo técnico del torque del motor.

En donde:

T = torque del motor [Nm].

P = potencia del motor [W].

ω = velocidad angular del eje del motor [rad/s].

i = relación de transmisión total de la caja reductora.

El modelo del torque del motor está definido por una ecuación que depende de tres variables de diseño. Este modelo se podrá utilizar más adelante para realizar concesiones con respecto al motor.

- **Modelo de capacidad de producción de la máquina extrusora de jabón:**

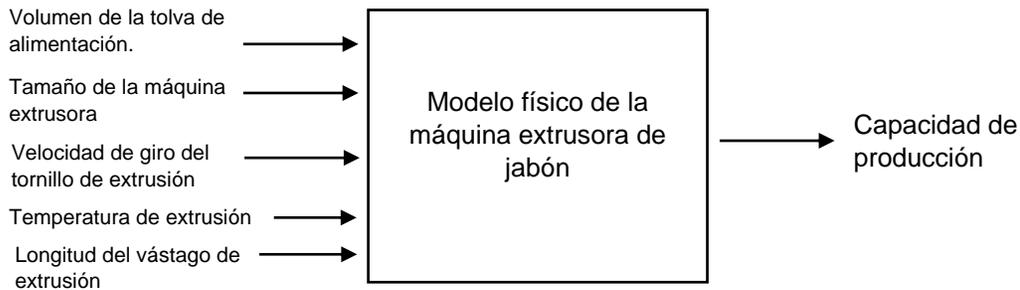


Figura 50. Modelo técnico de la capacidad de producción.

La capacidad de producción no tiene un modelo estrictamente técnico, esta depende más de aspectos físicos como el tamaño y forma de los componentes y del producto en persé.

3.4.7. Desarrollo de un modelo de costo del producto.

A continuación, se presenta el modelo de costos objetivo del producto. Se ha desarrollado en base al costo de los materiales y los recursos necesarios para su fabricación.

Se realizó una lista de estimaciones de costo alto y bajo para cada componente. Esto ayuda a entender con mayor claridad el margen de incertidumbre de las estimaciones.

Tabla 20
Estimación de costos del producto.

Componente	Cantidad	Alto (\$c/u)	Bajo (\$ c/u)	Total alto (\$ USD)	Total bajo (\$ USD)
Material para la estructura de la máquina extrusora.	1	500	400	500	400
Motor trifásico.	1	360	190	360	190
Caja reductora.	1	350	300	350	300
Tornillo de extrusión.	1	100	50	100	50
Variador de frecuencia.	1	800	150	800	150
Indicador de velocidad angular.	1	20	10	20	10
Resistencia eléctrica.	1	15	5	15	5
Elementos electromecánicos	1	150	80	150	80
Módulo de control ON/OFF de temperatura.	1	30	20	30	20
Elementos eléctricos y electrónicos.	1	30	20	30	20
Módulo generador de señales.	1	20	10	20	10
Otros	1	30	30	30	30
Total				2405	1265

3.4.8. Refinamiento de las especificaciones.

Las especificaciones técnicas del producto deben alinearse a las necesidades del cliente, de lo contrario estas podrían sobredimensionarse y elevar el costo del producto innecesariamente. Esta investigación buscará centrarse en la concesión de los siguientes elementos:

- Motor.
- Capacidad de producción.

- **Concesiones con respecto al motor:**

Aunque las especificaciones finales del motor se definen en el diseño técnico, es importante optimizarlo en esta fase para cubrir al menos las especificaciones objetivo. Es así que se elabora un mapa competitivo o mapa de concesiones, en el cual se muestra una gráfica de dispersión de los productos de la competencia a lo largo de dos dimensiones seleccionadas del conjunto de métricas. Las dimensiones seleccionadas son el torque del motor en las abscisas y su precio en el mercado en las ordenadas. También se incluyó una curva de concesión, que describe el comportamiento del modelo técnico del motor.

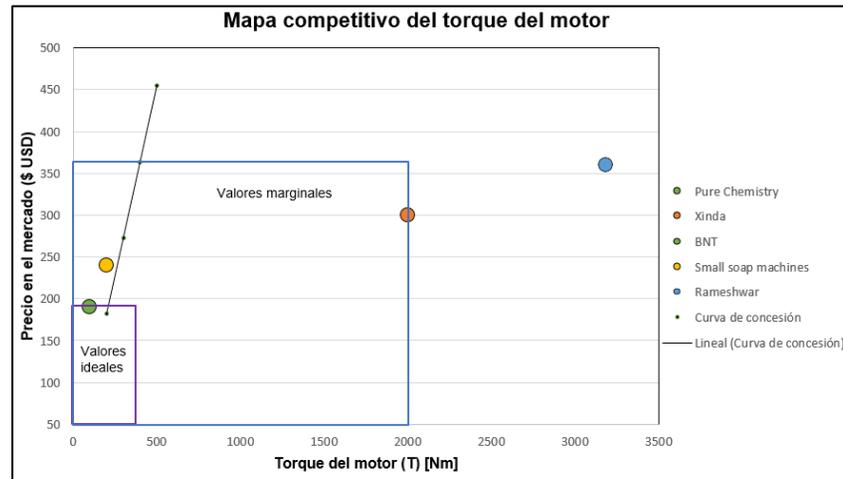


Figura 51. Mapa competitivo del motor con curva de concesión respecto al torque.

El motor ideal para la máquina extrusora de jabón cae dentro de los valores marginales de torque y precio. Sin embargo, está muy próximo a los valores ideales, por ello se abogará por entrar en esta zona consiguiendo un motor de al menos 200 Nm de torque a un precio de aproximadamente \$190 dólares. Es oportuno aclarar que estos valores son completamente referenciales y solo deben tomarse como un valor inicial de esta métrica.

- **Concesiones con respecto a la capacidad de producción.**

Se podría analizar también un mapa competitivo con respecto a la capacidad de producción, pero para esa métrica no existe un modelo técnico específico, debido a que la capacidad de producción depende de muchas variables. Por lo tanto, se elige

un valor final de la capacidad de producción basado en las necesidades (Tabla 14) del cliente y en el benchmarking con la competencia (Tabla 17).

3.4.9. Evaluación de las especificaciones.

Luego del análisis realizado para refinar las especificaciones a través de la aplicación de concesiones, se determina que no es necesario reducir el nivel de las mismas, ya que el benchmarking con la competencia arroja datos útiles para establecer las especificaciones objetivo adecuadas. La máquina extrusora de jabón con las especificaciones hasta ahora planteadas es suficiente para satisfacer las necesidades del cliente (Tabla 19) y, además para lograr que el producto sea competitivo a nivel tecnológico.

3.4.10. Establecimiento de las especificaciones finales.

Las especificaciones finales de la máquina extrusora de jabón artesanal se muestran a continuación.

Tabla 21
Especificaciones finales del producto.

Núm.	Métrica	Unidades	Valor
1	Torque del motor.	Nm	≥ 200
2	Tipo de motor.	Lista.	trifásico
3	Voltaje de alimentación del motor.	V	220
4	Capacidad de producción.	Kg/h	≥ 50
5	Volumen de la tolva de alimentación.	L	≥ 8
6	Material de los componentes en contacto con el jabón.	Lista.	acero inoxidable
7	Tamaño de la máquina extrusora.	Subj.	mediana
8	Sentido de giro del tornillo de extrusión.	CW/CCW	CW y CCW
9	Velocidad de giro del tornillo de extrusión.	rpm	40 (variable)
10	Homogenización de todos los componentes del jabón.	Subj.	completa
11	Temperatura de extrusión	°C	≤ 60
12	Todos los componentes de la máquina extrusora son desmontables.	si/no	si
13	El panel de control cuenta con indicadores de temperatura y velocidad.	si/no	si
14	Longitud del vástago de extrusión.	mm	≤ 600
15	Fin de carrera en la tapa de la tolva.	si/no	si
16	Boquilla de extrusión calentada.	si/no	si

Adicionalmente, se muestra la casa de la calidad (QFD):

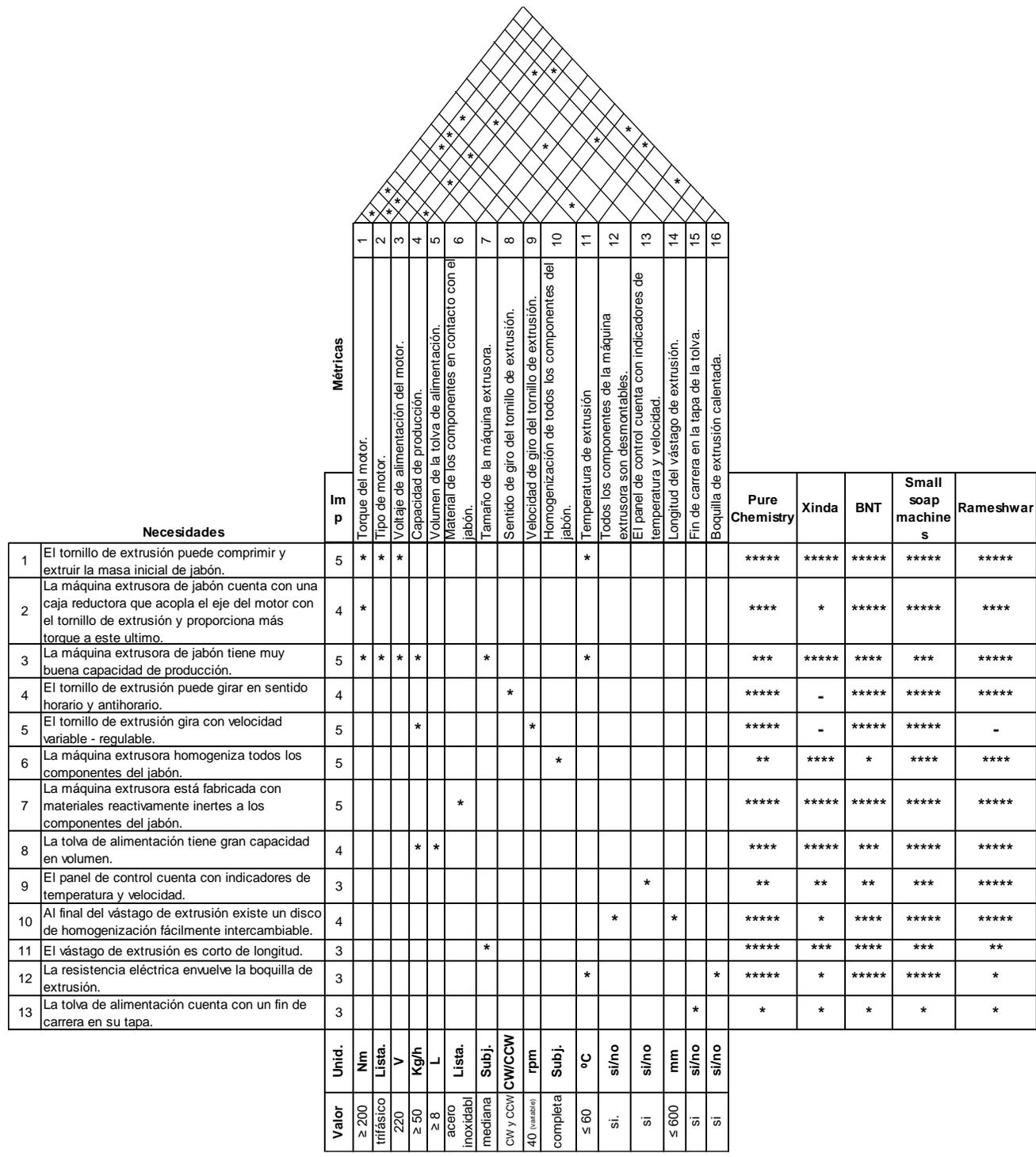


Figura 52. QFD de la máquina extrusora de jabón artesanal.

3.5. GENERACIÓN DE CONCEPTOS.

En esta etapa de la investigación ya se cuenta con un conjunto de necesidades del cliente (Tabla 14) y especificaciones objetivo (Tabla 21). En base a las cuales se desarrollarán los conceptos del producto, esto arrojará un conjunto de conceptos de los que se hará una selección final.

El concepto de un producto es una descripción aproximada de la tecnología, principios de trabajo y forma del producto. Es una descripción concisa de la forma en que el producto va a satisfacer las necesidades del cliente (Ulrich & Eppinger, 2013).

El proceso de generación de conceptos involucra 4 pasos:

3.5.1. Aclaración del problema.

El problema fundamental que surge es conceptualizar técnicamente la máquina extrusora. En el Capítulo 2 se describe el fundamento teórico de máquinas extrusoras, incluido su funcionamiento, partes y subsistemas. Ahora es el momento de decidir las tecnologías específicas que escogeremos para la fabricación de la máquina extrusora de jabón artesanal. Con el fin de que esta actividad sea más sencilla, se descompone el problema en subproblemas, para así analizar por separado cada una las partes y obtener los mejores resultados.

Para comprender mejor el problema se realizó un diagrama funcional:

Diagrama funcional de la máquina extrusora de jabón artesanal.

- **Descomposición funcional: “caja negra” general.**

En primer lugar, se representa al problema como una caja negra que opera en flujos de material, energía y señales. Las líneas continuas finas denotan la transferencia y conversión de energía, las continuas gruesas representan el movimiento de material dentro del sistema y las líneas discontinuas son las señales de flujos de control y retroalimentación dentro del sistema.

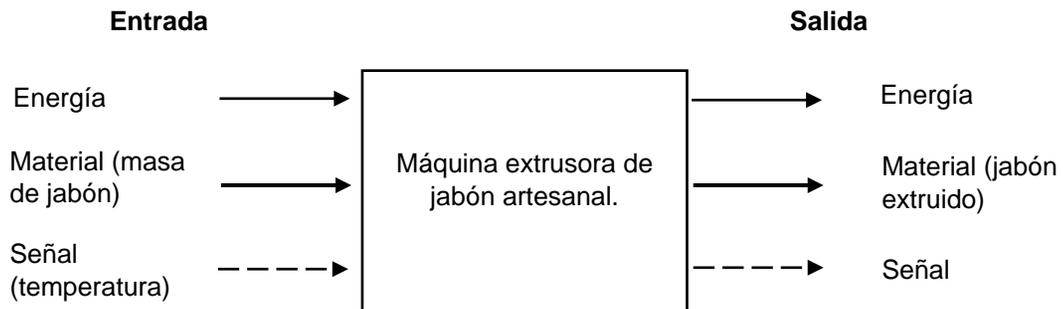


Figura 53. Caja negra que surge de la descomposición funcional del problema.

Luego se refina la descomposición funcional en términos del proceso que debe cumplir la máquina extrusora, y se divide la caja negra en subfunciones para crear

una descripción más específica de lo que los elementos del producto podrían hacer para implementar la función general del producto.

El resultado es un diagrama funcional que contiene subfunciones conectadas por energía, material y flujos de señal.

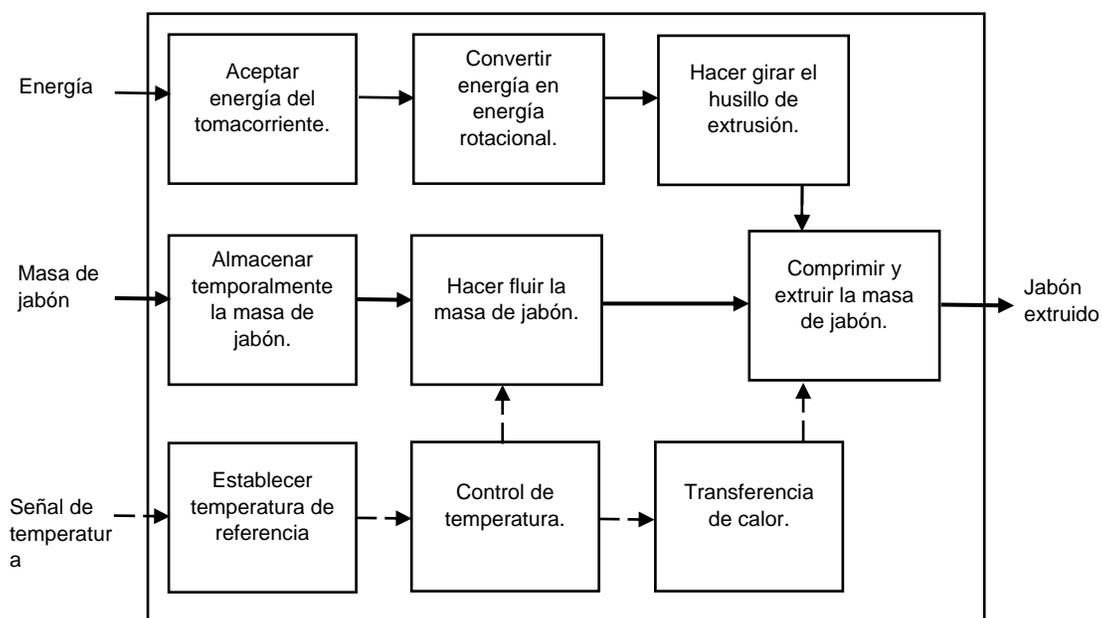


Figura 54. Refinamiento y descomposición del problema en subproblemas o subfunciones.

También se efectuaron otro tipo de descomposiciones de problema:

- **Descomposición por secuencia de acciones del usuario.**

Para el uso de la máquina extrusora son necesarias las siguientes acciones a ser efectuadas por el usuario:

1. Establecer la velocidad y temperatura de extrusión.
2. Introducir la masa de jabón en la zona de alimentación.
3. Verificar la calidad de extrusión.

- **Descomposición por necesidades clave de usuario.**

Algunas necesidades clave del usuario son:

- Buen torque para extrusión.
- Velocidad variable del husillo.
- Gran capacidad de producción.
- Homogenización del jabón.
- Tamaño mediano.

3.5.2. Búsqueda externa.

La búsqueda externa nos brinda una guía para conocer las tecnologías ya existentes en el mercado, esto nos ayuda a generar conceptos de solución a los subproblemas identificados en la descomposición funcional del problema general.

Se indagó las probables soluciones a los subproblemas identificados en fuentes externas, es así que se consultó a expertos, se buscó patentes, se revisó literatura publicada y se realizó un benchmarking con productos relacionados.

- **Consulta a expertos.**

Se consultó a un experto en máquinas extrusoras, mecanismos y tornillos sin fin.

Tabla 22
Tabla de entrevista a un experto en mecanismos.

Entrevistado:	Ing. Fernando Olmedo	Entrevistador:	Ramiro Galindo
Dirección:	ESPE	Fecha:	16/05/2019
Teléfono:	098-796-6584		
¿Dispuesto a otra llamada?	Si		
Subproblemas	Enunciado del entrevistado	Concepto interpretado	
Convertir energía eléctrica en energía rotacional.	Esto se puede lograr fácilmente con un motor trifásico.	Un motor trifásico se alimenta con energía del tomacorriente y transforma esta energía en movimiento rotacional del eje del motor.	
Hacer girar el husillo de extrusión.	Para el proceso de extrusión se requiere torque y presión elevados. Por ello es recomendable utilizar una caja	Una caja reductora permite hacer girar el husillo con el torque suficiente para lograr la compresión y extrusión de la	

continúa

	<p>reductora de velocidad que conecte el eje del motor con el husillo de extrusión, en pro de aumentar el torque de este último.</p>	<p>masa de jabón.</p>
<p>Almacenar temporalmente la masa de jabón.</p>	<p>Con una tolva de alimentación de sección rectangular lo suficientemente grande en volumen se puede almacenar material hasta para 2 horas de trabajo continuo.</p>	<p>Una tolva grande de sección rectangular almacena temporalmente la masa de jabón.</p>
<p>Hacer fluir la masa de jabón.</p>	<p>En general, el material que se encuentra en la tolva fluye por si sola por la acción de la gravedad. Sin embargo, para un proceso más óptimo es necesario utilizar un tornillo Cramer.</p>	<p>Un tonillo Cramer hace fluir la masa de jabón desde la tolva hacia el husillo de extrusión con bastante facilidad.</p>

Para reforzar la investigación también se consultó a un experto en automatización.

Tabla 23
 Tabla de entrevista a un experto en automatización.

Entrevistado:	Ing. Alejandro Gómez	Entrevistador:	Ramiro Galindo
Dirección:	ESPE	Fecha:	16/05/2019
Teléfono:	097-937-1744		
¿Dispuesto a otra llamada?	Si		

Subproblemas	Enunciado del entrevistado	Concepto interpretado
Control de temperatura.	Para controlar la temperatura de extrusión del material basta con un control ON/OFF, que se consigue fácilmente con un módulo electrónico de temperatura.	Un módulo electrónico de control de temperatura efectúa un control ON/OFF de la temperatura durante la extrusión de la masa de jabón.
Transferencia de calor.	La transferencia de calor desde el cilindro hacia la masa de jabón se puede lograr mediante una resistencia eléctrica en forma de anillo.	Una resistencia eléctrica en forma de anillo, que envuelva el cilindro, proporcionará el calor necesario para extruir la masa de jabón.

- **Búsqueda de patentes.**

De la exploración de patentes encontramos:

La extrusora de la patente US5160684 (A), (Figura 55), se emplea en la conformación de materiales cerámicos, con múltiples capas de materiales orgánicos

estructurales, mediante extrusión. Posee un pistón como actuador de compresión y extrusión.

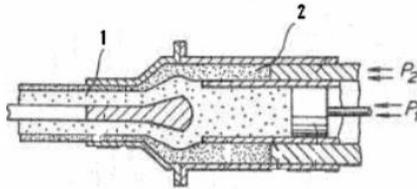


Figura 55. Extrusora para la conformación de piezas cerámicas.
Fuente: (Del Río R, 2011).

La extrusora de película de plástico de la patente CN2177580Y, (Figura 56), posee una tolva de alimentación de sección rectangular, un tornillo sinfín y un cabezal divisor de flujo.

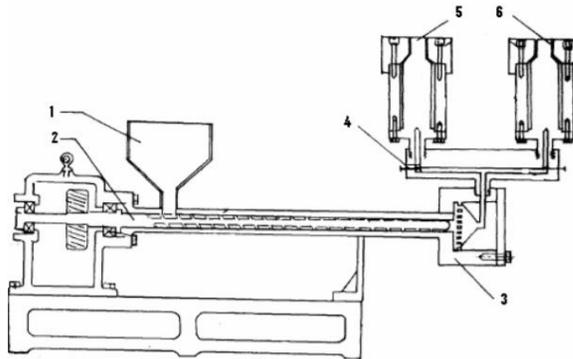


Figura 56. Extrusora de película de plástico.
Fuente: (Del Río R, 2011).

La patente CN2278582Y, (Figura 57), es una máquina extrusora para procesamiento de alimentos que cuenta con dos tolvas de alimentación de sección cuadrada y un solo sistema de compresión por tornillo sinfín.

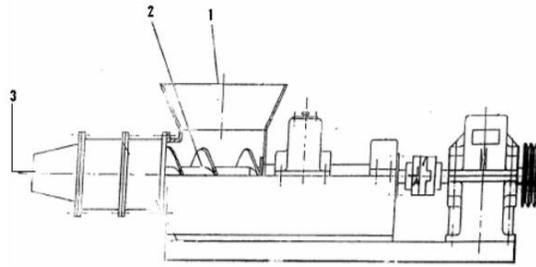


Figura 57. Extrusora para el procesamiento de alimentos.
Fuente: (Del Río R, 2011).

Otra máquina es la extrusora doble para ladrillos huecos de gran resistencia de la patente CN86208005U, (Figura 58). Posee un solo sistema de alimentación y un solo tornillo sinfín con dos pasos diferentes.

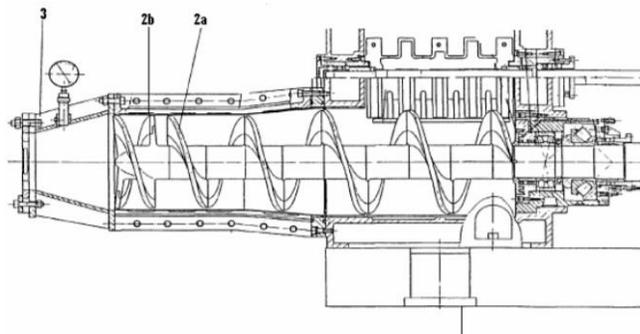


Figura 58. Extrusora doble para ladrillos.
Fuente: (Del Río R, 2011).

- **Búsqueda en literatura publicada.**

De acuerdo a las fuentes consultadas, en la Unión Soviética (URSS) del siglo XX se contaba con la siguiente tecnología:

La máquina extrusora universal de un husillo para fabricar películas (Figura 59), cuenta con un motor eléctrico y un sistema de reducción basado en engranes. Posee una tolva de alimentación de sección circular, un solo husillo de extrusión y un sistema de calentamiento basado en resistencias eléctricas.

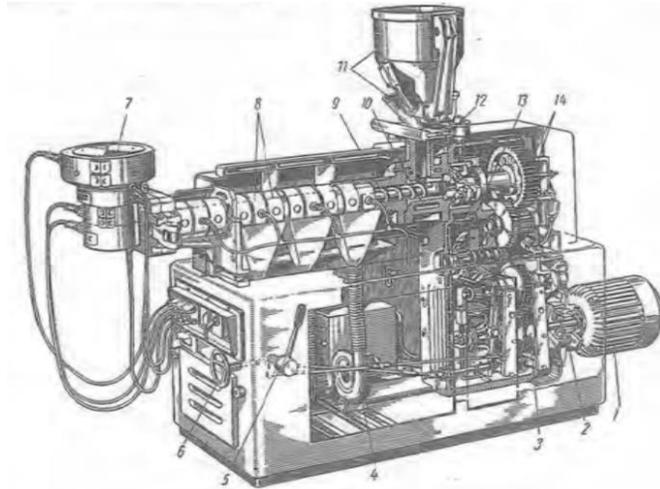


Figura 59. Extrusora de un husillo con accionamiento electromecánico.
Fuente: (Savgorodny, 1973).

Otra máquina extrusora es la de la casa inglesa Barand (Figura 60), que cuenta con un motor hidráulico, un solo tornillo sinfín o husillo y una tolva de alimentación grande de sección circular.

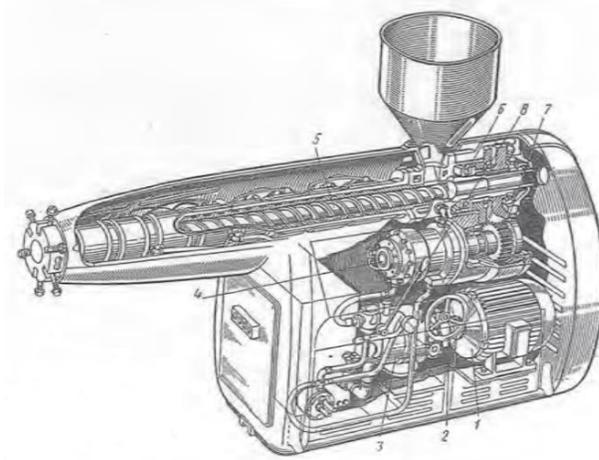


Figura 60. Extrusora con accionamiento hidráulico.
Fuente: (Savgorodny, 1973).

La máquina extrusora tipo RAE-90 de la casa inglesa Burtonwood (Figura 61), es accionada, indiferentemente, por un motor de corriente alterna o continua; la reducción de velocidad se efectúa por un sistema electromagnético, posee una tolva de alimentación pequeña de sección circular, un solo husillo de extrusión y calentadores de inducción, que rodean el cilindro.

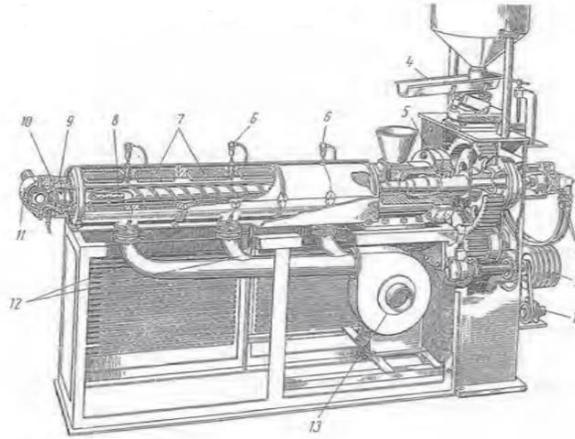


Figura 61. Extrusora con calentamiento eléctrico por inducción.
Fuente: (Ulrich & Eppinger, 2013).

Por otro lado, en la actualidad se ha encontrado las siguientes tecnologías:

La máquina extrusora de plásticos (Figura 62), posee un motor trifásico conectado a un único husillo mediante una caja reductora de velocidad basada en engranes. En la zona de alimentación cuenta con una tolva pequeña de sección circular y utiliza resistencias eléctricas que transmiten calor al material por conducción al cilindro.

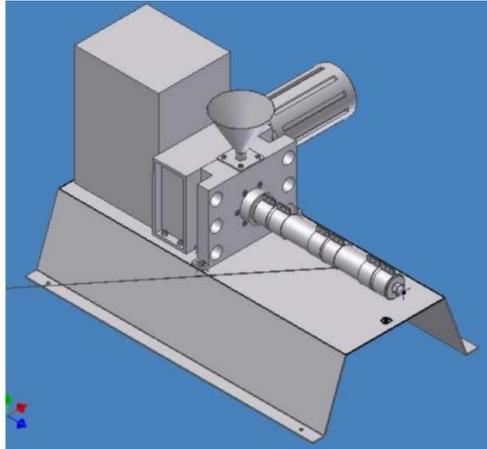


Figura 62. Máquina extrusora para plásticos.
Fuente: (Gómez Gómez & Gutiérrez Bedoya, 2007).

Los laboratorios del DECEM (Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica), cuentan con una máquina extrusora de plásticos que posee conceptos más actuales (Figura 63). Tiene un solo husillo dentro de un cilindro o barril de forma prismática y con una tolva de alimentación grande de sección cuadrada. La máquina es impulsada por un motor trifásico con un sistema de reducción basado en poleas.



Figura 63. Máquina extrusora del laboratorio de Mecánica de Materiales del DECEM.
Fuente: ([Capítulo 2. Marco Teórico. Proceso de extrusión de plásticos], s. f.).

La empresa Small Soap Machines fabrica máquinas extrusoras de jabón (Figura 64) que cuentan con un motor trifásico y una caja de engranes reductora de velocidad. Poseen tolva de alimentación de gran tamaño de sección rectangular y un único husillo envuelto por un cilindro con barril prismático. En estas máquinas el jabón es calentado por un calentador rectangular que se encuentra justo antes de la boquilla.



Figura 64. Máquina extrusora de jabón marca Small Soap Machines.
Fuente: www.smallsoapmachines.com

- **Benchmarking con productos relacionados.**

En la exploración de productos con funcionalidad similar encontramos que los molinos industriales poseen conceptos parecidos que serán de gran utilidad.

El molino industrial para grano (Figura 65) de la empresa Agroterra¹⁰ presenta un sistema impulsor de motor eléctricos con un sistema de reducción de poleas y una tolva grande de sección cuadrada.



Figura 65. Molino industrial de grano marca Agroterra.
Fuente: www.agroterra.com

El molino de carne de la marca BBG¹¹ cuenta con un motor de corriente alterna, sin reducción de velocidad, y una tolva de alimentación en forma de bandeja rectangular.

¹⁰ Para más información visitar: <https://www.agroterra.com/p/molino-de-grano-industrial-con-motor-electrico-y-gasolinos-3024681/3024681>

¹¹ Para más información visitar: <https://www.basculasymaquinariadealimentos.com/basculas/vp209/sp/molino-industrial-para-carnes-bbg-mg-42>



Figura 66. Molino industrial de carne marca BBG
Fuente: <https://www.basculasymaquinariadealimentos.com>

Por otro lado, en las impresoras 3D el sistema de calentamiento de material se basa en una resistencia prismática de aluminio de sección cuadrada (Figura 67).

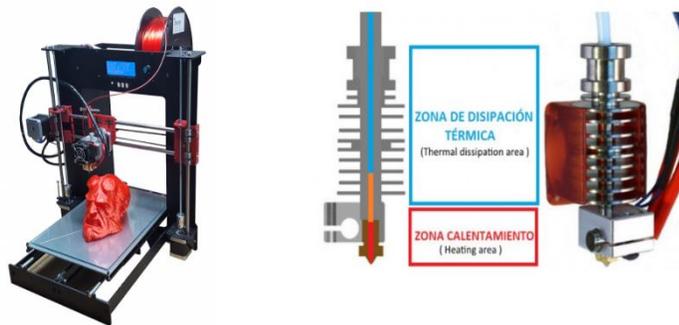


Figura 67. Sistema de calentamiento de una impresora 3D.
Fuente: google – resistencia de calentamiento en impresoras 3D.

3.5.3. Búsqueda interna.

En la búsqueda interna acudiremos a experiencia, conocimiento y criterios personales para poder establecer los conceptos de solución para cada subproblema.

Esta actividad se realizó en conjunto con expertos jaboneros que aportaron con valiosos criterios:

Tras un consenso y consideraciones de factibilidad se zanjó lo siguiente.

Tabla 24

Tabla de generación de conceptos basado en búsqueda interna.

Subproblema	Concepto
Convertir energía en energía rotacional.	Motor trifásico.
Hacer girar el husillo de extrusión.	Reducción de velocidad: <ul style="list-style-type: none"> - Engranés. - Poleas.
Almacenar temporalmente la masa de jabón.	Tolva: <ul style="list-style-type: none"> - Grande/sección cuadrada. - Grande/sección circular. - Grande/sección rectangular.
Comprimir y extruir la masa de jabón.	Tornillo sinfín.
Hacer fluir la masa de jabón.	Tornillo Cramer.
Control de temperatura.	Módulo electrónico.
Transferencia de calor.	Conducción: <ul style="list-style-type: none"> - Resistencia en forma de anillo. - Resistencia prismática.

Se observa que la mayoría de subproblemas poseen un concepto de solución bien definido. Sin embargo, algunos subproblemas críticos poseen varias alternativas de conceptos, de las que habrá que decidir cuál es la más conveniente.

3.5.4. Exploración sistemática.

La exploración sistemática está destinada a navegar el espacio de posibilidades al organizar y sintetizar los fragmentos de solución recolectados durante la búsqueda externa e interna.

Nos enfocamos en los subproblemas que aún no tienen conceptos de solución específicos, los mismos que en esta investigación son: hacer girar el husillo de extrusión, almacenar temporalmente la masa de jabón y la transferencia de calor.

Aplicamos dos herramientas básicas para el uso de la exploración sistemática: el árbol de clasificación de conceptos y la tabla de combinación de conceptos. El árbol de clasificación de conceptos se emplea para dividir todo el espacio de posibles soluciones en varias clases que facilitarán la comparación y eliminación, mientras que la tabla de combinación de conceptos contiene una forma de considerar en forma sistemática combinaciones de fragmentos de solución.

- **Árbol de clasificación de conceptos.**

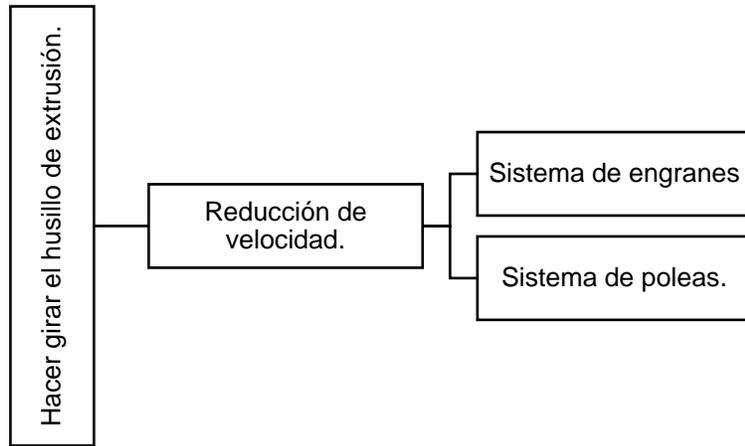


Figura 68. Árbol de clasificación de conceptos para el subproblema de hacer girar el husillo de extrusión.

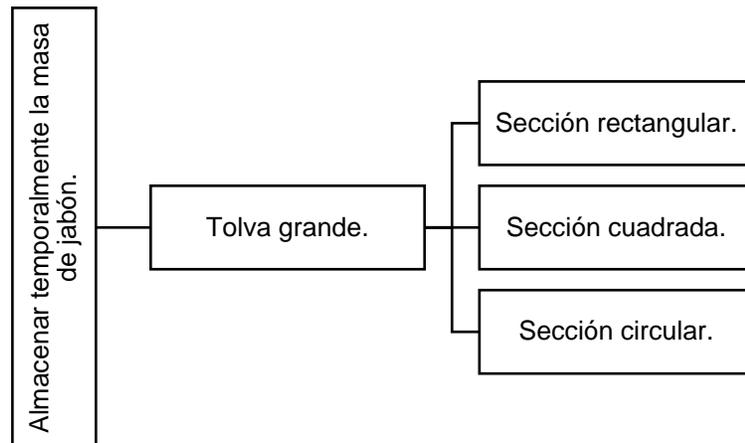


Figura 69. Árbol de clasificación de conceptos para el subproblema de almacenar temporalmente la masa de jabón.

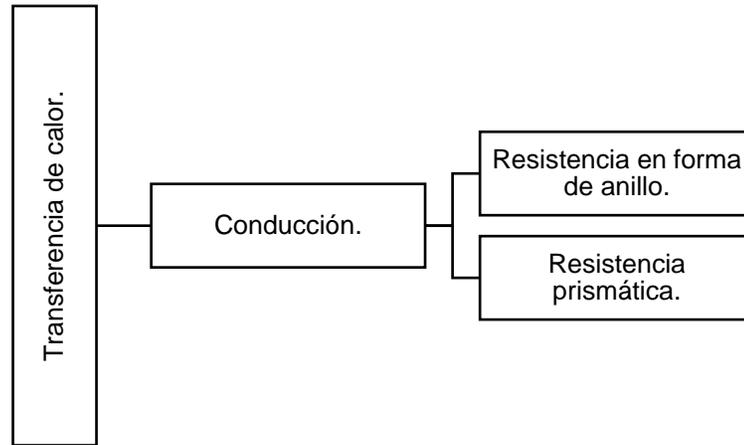


Figura 70. Árbol de clasificación de conceptos para el subproblema de transferencia de calor.

- **Tabla de combinación de conceptos.**

Desarrollamos tablas de confinación con respecto a la energía, material y señal.

Energía.

Tabla 25
 Tabla de combinación de conceptos para flujo de energía 1.

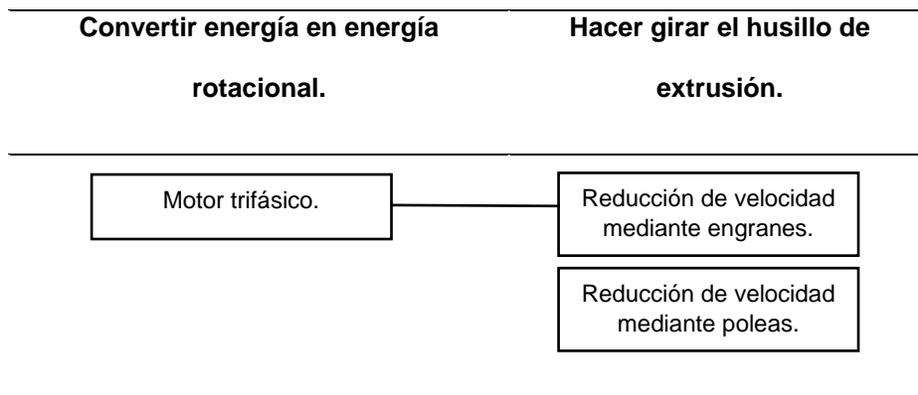
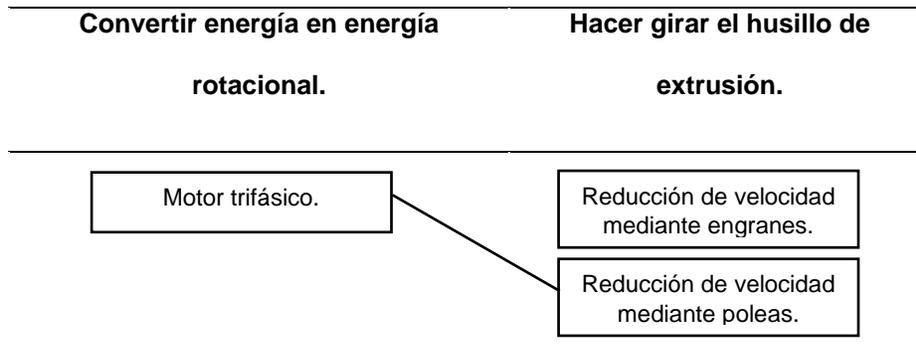


Tabla 26
 Tabla de combinación de conceptos para flujo de energía 2.



Material.

Tabla 27
 Tabla de combinación de conceptos para flujo de material 1.

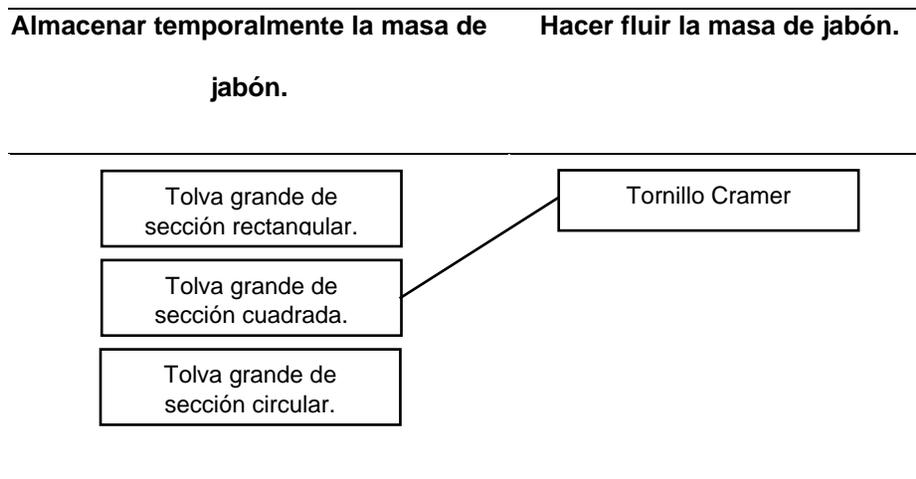
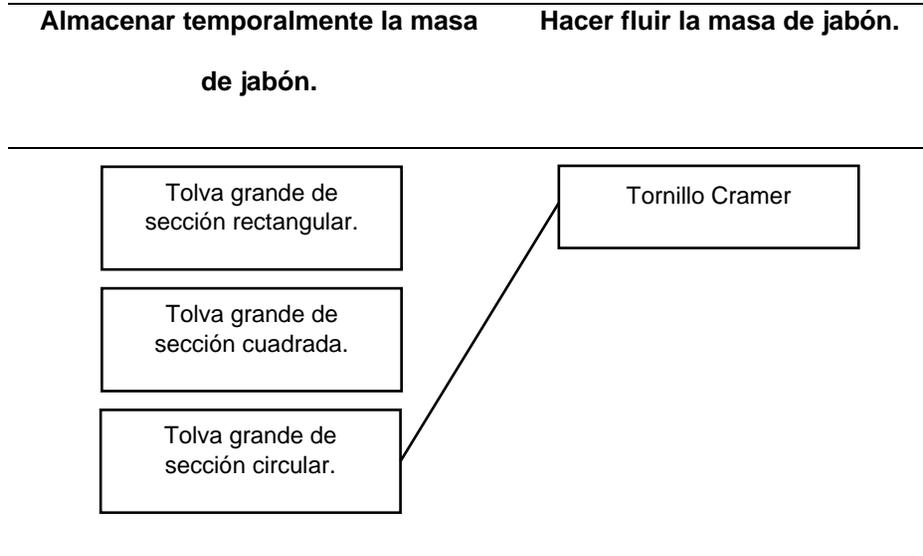


Tabla 28
 Tabla de combinación de conceptos para flujo de material 2.



Señal.

Tabla 29
 Tabla de combinación de conceptos para flujo de señal 1.

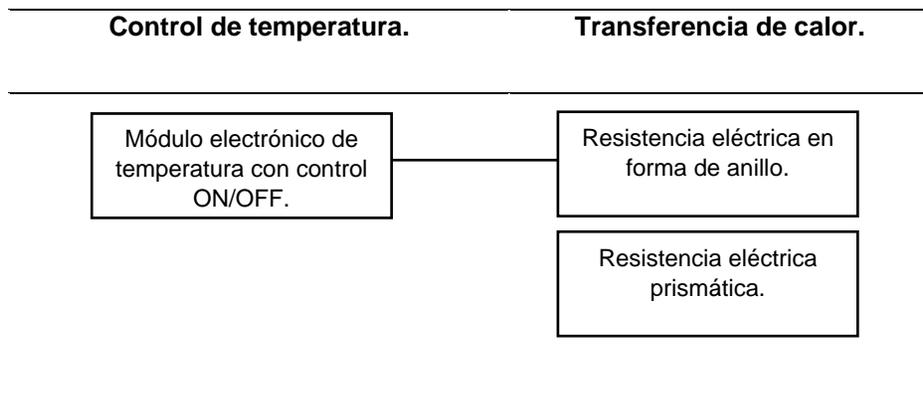
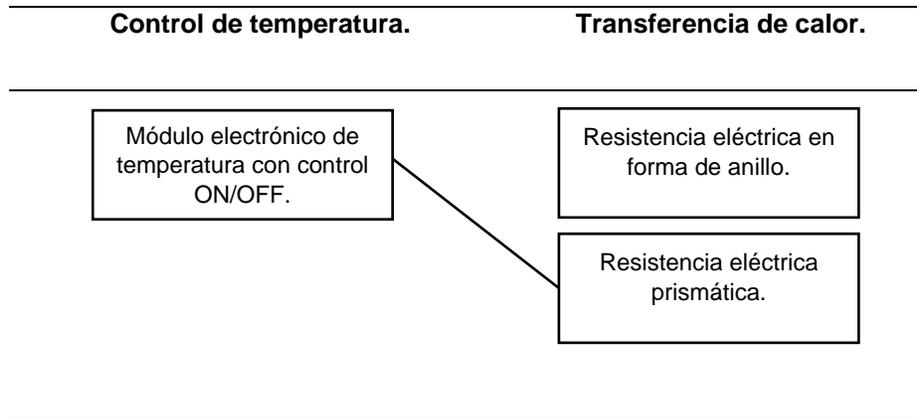


Tabla 30
 Tabla de combinación de conceptos para flujo de señal 2.



Como resultado de la exploración sistemática obtenemos una visión gráfica general de los conceptos más convenientes para cada subproblema analizado. En la siguiente fase de desarrollo del producto decidiremos cuál de los conceptos es el más adecuado.

3.6. SELECCIÓN DEL CONCEPTO.

La selección del concepto es el proceso para evaluar conceptos con respecto a las necesidades del cliente y otros criterios, comparando los puntos relativamente fuertes y débiles de los conceptos, y seleccionando uno o más de éstos para su posterior investigación, prueba o desarrollo (Ulrich & Eppinger, 2013).

La selección del concepto se construyó alrededor del uso de matrices de decisión para evaluar cada concepto con respecto a un conjunto de criterios de selección.

Ulrich & Eppinger (2013) describen una metodología de dos etapas para selección del concepto. La primera etapa se denomina filtrado de conceptos y la segunda, evaluación de conceptos. Cada una se apoya en una matriz de decisiones que se utiliza para filtrar, ordenar y seleccionar los mejores conceptos. El filtrado es una evaluación rápida y aproximada destinada a producir algunas alternativas viables. La evaluación es un análisis más cuidadoso de estos conceptos, con el propósito de escoger el aquel que tenga más probabilidad de llevar el producto al éxito.

3.6.1. Filtrado de conceptos.

Se elaboraron las matrices de selección de acuerdo a la exploración sistemática. Los criterios de selección establecidos se basaron en las necesidades del cliente y en criterios básicos de un producto. Se utilizaron los signos + “mejor que”, 0 “igual a”, – “peor que” para evaluar cada concepto con respecto a los criterios de selección. La evaluación se realizó comparando los conceptos definidos con aquellos de referencia de la máquina extrusora de jabón de la empresa Small Soap Machines (ver Figura 64, Tabla 17 y Tabla 18).

La evaluación neta se calcula restando la cantidad de signos “-” de la cantidad de signos “+”. Y la fila “Ganador” se refiere al número de criterio que es mejor satisfecho por cada concepto.

A continuación, se aplicará esta metodología a los siguientes subproblemas.

- **Hacer girar el husillo de extrusión.**

Tabla 31

Tabla de filtrado de conceptos para el subproblema de hacer girar el husillo de extrusión.

Subproblema: Hacer girar el husillo de extrusión.	Conceptos	
	Reducción de velocidad mediante:	
Criterios de selección.	Engranés	Poleas
Acople entre el eje del motor y el husillo de extrusión.	+	0
Torque.	+	0
Giro del husillo de extrusión en sentido horario y antihorario.	0	0
Velocidad del husillo variable.	0	0
Durabilidad.	+	-
Facilidad de manufactura.	-	+
Costo.	0	+
Peso.	0	+
Suma +	3	3

continúa

Suma 0	4	4
Suma -	1	1
<hr/>		
Evaluación neta.	2	2
Ganador	5	6
¿Continuar?	si	si
<hr/>		

Los dos conceptos de este subproblema merecen un mayor análisis. Se evaluarán con mayor detalle en la siguiente etapa.

- **Almacenar temporalmente la masa de jabón.**

Tabla 32

Tabla de filtrado de conceptos para el subproblema de almacenar temporalmente la masa de jabón.

Subproblema: Almacenar temporalmente la masa de jabón.	Conceptos		
	Tolva grande de:		
Criterios de selección.	sección cuadrada	sección rectangular	sección circular
La máquina extrusora de jabón tiene muy buena capacidad de producción.	0	0	+
Gran capacidad en volumen.	0	+	-
Flujo continuo.	0	-	+

continúa

Facilidad de limpieza.	-	-	+
Tolva con tapa y fin de carrera.	+	+	0
Facilidad de manufactura.	+	0	0
Costo.	+	0	0
Suma +	3	2	3
Suma 0	3	3	3
Suma -	1	2	1
Evaluación neta.	2	0	2
Ganador	6	2	3
¿Continuar?	si	no	si

Para este subproblema se seleccionan los conceptos “Tolva grande de sección cuadrada” y “Tolva grande de sección circular” y se descarta el concepto “Tolva grande de sección rectangular”. Los conceptos seleccionados serán evaluados con mayor detalle en la siguiente etapa

- **Transferencia de calor.**

Tabla 33
 Tabla de filtrado de conceptos para el subproblema de
 transferencia de calor.

Conceptos		
Subproblema: Transferencia de calor.	Conducción de calor mediante resistencia eléctrica en forma de:	
	Anillo	Prisma
	Criterios de selección.	
La resistencia eléctrica envuelve la boquilla de extrusión.	+	0
Facilidad de manufactura.	+	-
Durabilidad.	0	0
Costo.	+	0
Peso.	+	-
Tamaño	+	-
Suma +	5	0
Suma 0	1	3
Suma -	0	3
Evaluación neta.	5	-3
Ganador	1	3
¿Continuar?	si	si

Se selecciona el concepto de “Conducción de calor mediante resistencia eléctrica en forma de anillo”, porque es el que más se ajusta a las necesidades del cliente.

3.6.2. Evaluación de conceptos.

En esta etapa, se pondera la importancia relativa de los criterios de selección y se enfoca en comparaciones más refinadas con respecto a cada criterio. Las evaluaciones del concepto están determinadas por la suma ponderada de las calificaciones. De igual manera, el concepto de referencia fue el producto de la empresa Small Soap Machines.

Se elaboraron las siguientes matrices de selección, evaluando los conceptos con respecto a cada criterio mediante una escala más fina:

Desempeño relativo	Calificación
Mucho peor que la referencia	1
Peor que la referencia	2
Igual que la referencia	3
Mejor que la referencia	4
Mucho mejor que la referencia	5

Figura 71. Escala de evaluación para la etapa de evaluación de conceptos.
Fuente: (Ulrich & Eppinger, 2013).

- **Hacer girar el husillo de extrusión.**

Tabla 34
 Matriz de evaluación de conceptos para el subproblema de hacer girar el husillo de extrusión.

Criterios de selección.	Peso %	Conceptos			
		Reducción de velocidad mediante:			
		Engranés		Poleas	
		Calificación	Evaluación ponderada.	Calificación	Evaluación ponderada.
Acople entre el eje del motor y el husillo de extrusión.	15	3	0,45	3	0,45
Torque.	30	3	0,9	1	0,3
Giro del husillo de extrusión en sentido horario y antihorario.	5	3	0,15	3	0,15
Velocidad del husillo variable.	5	3	0,15	3	0,15
Durabilidad.	15	4	0,6	2	0,3
Facilidad de manufactura.	10	3	0,3	4	0,4
Menor costo.	15	3	0,45	4	0,6
Menor peso.	5	3	0,15	4	0,2
Total puntos.			3,15		2,55
Lugar			1		2
¿Continuar?			si		no

Se elige el concepto “Reducción de velocidad mediante engranes” para solventar el subproblema de hacer girar el husillo de extrusión.

- **Almacenar temporalmente la masa de jabón.**

Tabla 35
Matriz de evaluación de conceptos para el subproblema de almacenar temporalmente la masa de jabón.

Subproblema: Almacenar temporalmente la masa de jabón.	Conceptos				
	Tolva grande de:				
		sección cuadrada		sección circular	
Criterios de selección.	Peso %	Calificación	Evaluación ponderada.	Calificación	Evaluación ponderada.
La máquina extrusora de jabón tiene muy buena capacidad de producción.	40	4	1,6	4	1,6
Gran capacidad en volumen.	20	5	1	3	0,6
Flujo continuo.	5	4	0,2	4	0,2
Facilidad de limpieza.	10	2	0,2	4	0,4
Tolva con tapa y fin de carrera.	5	4	0,2	2	0,1
Facilidad de manufactura.	10	3	0,3	3	0,3
Costo.	10	3	0,3	3	0,3
Total puntos.			3,8		3,5
Lugar			1		2
¿Continuar?			si		probar

Como se puede observar, ambos conceptos de este subproblema obtuvieron un puntaje total muy similar, esto quiere decir que cualquiera de los dos solventaría con éxito el subproblema de almacenar temporalmente la masa de jabón. Sin embargo, cada uno tiene puntos fuertes y débiles que es necesario analizar con mayor detalle. Provisionalmente se escoge el concepto “Tolva grande de sección cuadrada” y se decide probar el concepto “Tolva grande de sección circular”.

Como producto de la generación de conceptos se obtiene la siguiente tabla de conceptos.

Tabla 36
Definición de conceptos para cada subproblema.

Subproblema	Concepto
Convertir energía en energía rotacional.	Motor trifásico.
Hacer girar el husillo de extrusión.	Reducción de velocidad mediante engranes.
Almacenar temporalmente la masa de jabón.	- Tolva grande de sección cuadrada. - Tolva grande de sección circular (probar).
Comprimir y extruir la masa de jabón.	Tornillo sinfín.
Hacer fluir la masa de jabón.	Tornillo Cramer.
Control de temperatura.	Módulo electrónico.

continúa

Transferencia de calor.	Conducción de calor mediante resistencia eléctrica en forma de anillo.
-------------------------	--

3.7. PRUEBA DE CONCEPTO.

En esta fase del desarrollo del producto se prueba los conceptos definidos en la fase de selección de conceptos. Para ello se muestra cada concepto al cliente y se pide su opinión para conocer si está conforme o no con los resultados. En la prueba de concepto también se puede elegir y refinar conceptos que no se hayan definido. Para poder elegir entre los conceptos, estos se muestran al cliente y se pide una respuesta basada en sus necesidades y criterios.

En esta etapa se comunica a la empresa Apaika el concepto de la máquina extrusora de jabón artesanal; indicando el concepto general, el mismo que solventa el problema general (Figura 53), así como los conceptos específicos, que solventan a su vez los subproblemas (Figura 54).

El proceso de prueba de concepto consta de 6 pasos:

3.7.1. Definición del propósito de la prueba de concepto.

En esta sección probaremos los conceptos concernientes al subproblema de “almacenar temporalmente la masa de jabón”. También probaremos el concepto concerniente al problema general: la máquina extrusora de jabón artesanal. Con el objetivo de definir el propósito de estas pruebas surgen las siguientes interrogantes:

1. ¿Cuál concepto debe perseguirse para solventar de manera eficaz y eficiente el problema de almacenar temporalmente la masa de jabón en la máquina extrusora: tolva de sección cuadrada o tolva de sección circular?
2. ¿Cuál de estos conceptos satisface más las necesidades del cliente?
3. ¿Cómo se pueden mejorar los conceptos para satisfacer de manera eficaz las necesidades del cliente?
4. ¿Cuál de estos conceptos permite una mejor experiencia al momento de utilizar la máquina extrusora de jabón?
5. ¿Los conceptos definidos son suficientes para alcanzar un nivel de competencia que apruebe el cliente?

3.7.2. Definición de la población a encuestar.

La estrategia competitiva elegida durante la fase de planeación del producto fue **concentrarse en el cliente**, porque el desarrollo de la máquina extrusora de jabón artesanal se lleva a cabo para satisfacer exclusivamente las necesidades y preferencias de la empresa Apaika. Por este motivo la población que se elige para encuestar son los principales directivos y personal encargado de la fabricación del jabón artesanal en la empresa Apaika.

3.7.3. Selección de un formato de encuesta.

Se llevará a cabo la encuesta mediante **interacción personal** y directa con miembros activos de la empresa Apaika.



Figura 72. Interacción personal con el gerente general de Apaika.

3.7.4. Comunicación del concepto.

Descripción verbal.

El producto es una máquina extrusora de jabón artesanal compacta con una capacidad de producción no menor a 100 Kg/h, que puede instalarse prácticamente en cualquier micro y mediana empresa. Posee un motor trifásico a 220 V con caja moto-reductora de engranes conectada a un tornillo extrusor de acero inoxidable, el cual puede girar en sentido horario o anti-horario. Todos los elementos en contacto con el jabón son de acero inoxidable, incluida la tolva de alimentación que es de sección cuadrada y tiene una capacidad de aproximadamente 8 L. La velocidad de extrusión de la máquina es fácilmente regulable al igual que la temperatura, la cual se logra mediante una resistencia eléctrica. Además de extruir el material también sirve para mezclarlo y homogeneizarlo. Todos los componentes de la máquina son fácilmente desmontables, lo cual facilita mucho su limpieza y mantenimiento.

Bosquejo.

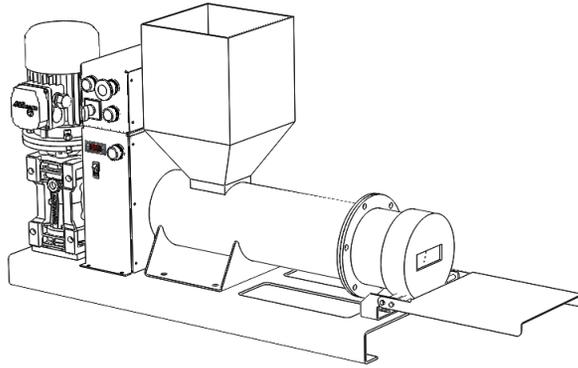


Figura 73. Bosquejo de la máquina extrusora de jabón artesanal.

Ilustración.

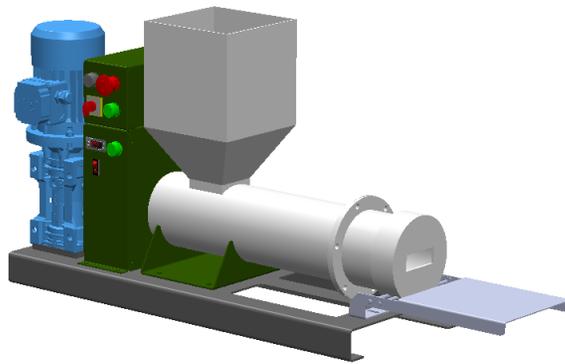


Figura 74. Ilustración de la máquina extrusora de jabón artesanal.

Modelo de aspecto físico.

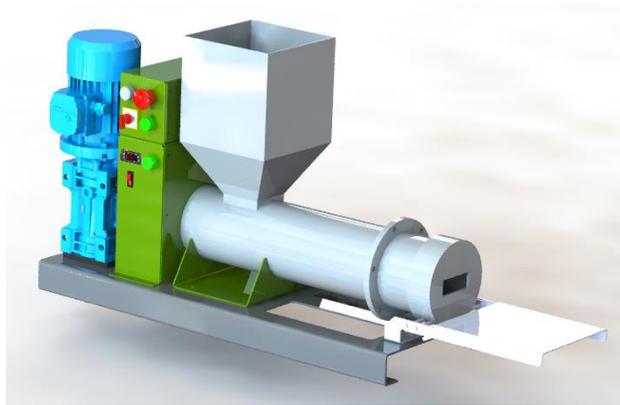


Figura 75. Modelo renderizado de la máquina extrusora de jabón artesanal.

3.7.5. Medición de la respuesta del cliente.

El cliente reaccionó positivamente a todos los conceptos definidos y mostrados, y comunicó explícitamente su satisfacción con respecto al producto. Sin embargo, solo estuvo en desacuerdo con el concepto “Tolva grande de sección cuadrada”, de la cual dijo que “resulta más complicada la limpieza en comparación con una tolva de sección circular, la cual no tiene esquinas en donde se pueda acumular el jabón” (Figura 76).



Figura 76. Medición de la respuesta de gerente general de Apaika.

3.7.6. Interpretación de los resultados.

Para la empresa Apaika es más conveniente que la tolva de la máquina extrusora de jabón artesanal sea de sección circular, ya que facilita en gran medida su limpieza.

De esta manera, un modelo definitivo de la máquina extrusora de jabón es:

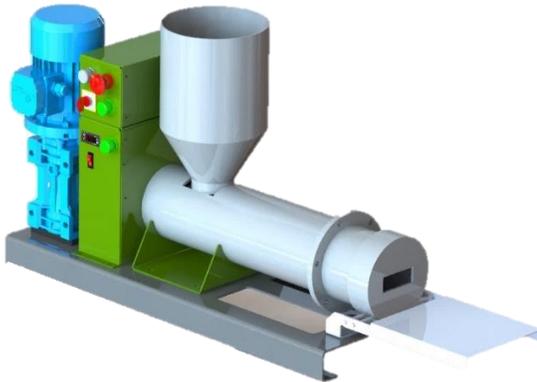


Figura 77. Modelo renderizado definitivo de la máquina extrusora de jabón artesanal.

En esta fase del desarrollo también se definió la arquitectura del producto, basada principalmente en productos ya existentes de la competencia. La arquitectura es en gran medida funcional, ayuda a ahorrar espacio y sus componentes están bien distribuidos (Figura 77), además, agradó al cliente. Por estas razones, se afirma que la arquitectura ya está definida.

CAPÍTULO 4.

DISEÑO DE DETALLE.

4.1. DISEÑO MECÁNICO DE LOS ELEMENTOS.

4.1.1. Diseño del husillo de extrusión.

Ángulo de hélice.

Hablando en términos matemáticos el trabajo de una máquina extrusora de husillo (como bomba helicoidal) puede obtenerse aplicando conjuntamente las ecuaciones correspondientes a las leyes de la conservación de la masa, energía y número de movimientos, con las cuales se describe el estado físico de un líquido a presión (en nuestro caso, la masa de jabón), (Savgorodny, 1973).

En la Figura 78 se muestra esquemáticamente un cilindro con husillo de un canal. Por razones constructivas la mayoría de las extrusoras se fabrican con el husillo giratorio y el cilindro fijo, pero para comprender más fácilmente, supondremos que es el cilindro el que gira y el husillo el que permanece fijo; en este caso, a lo largo del husillo se desplazará principalmente aquel material que tiende a girar con el cilindro y no el que se adhiere al husillo (Savgorodny, 1973) (Savgorodny, 1973).

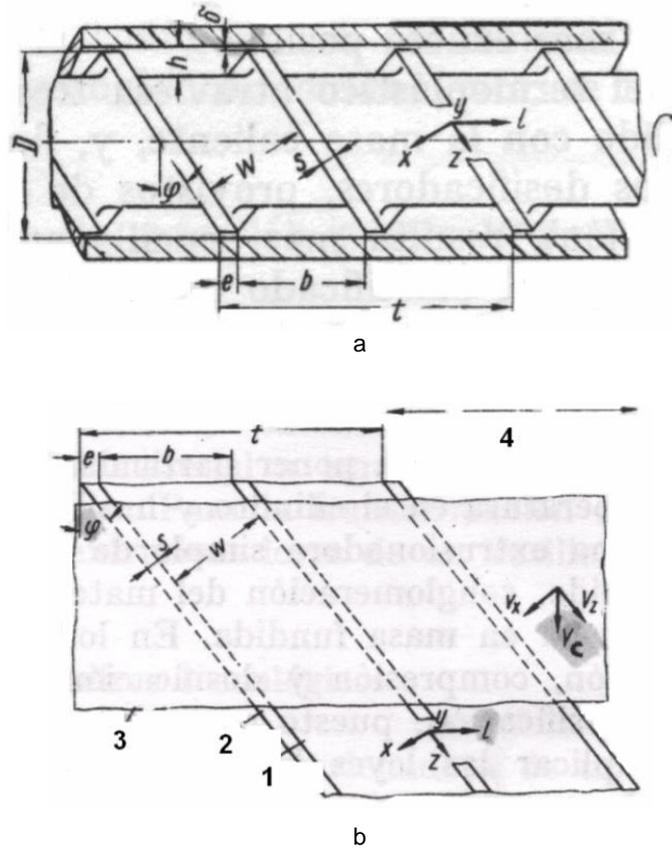


Figura 78. Segmento de un cilindro con husillo de un solo canal.
 Vista general. b. Esquema del desarrollo.
 Fuente: (Gómez Gómez & Gutiérrez Bedoya, 2007).

En donde:

D: diámetro del husillo.

h: profundidad del canal.

φ : ángulo de hélice.

δ : holgura entre el husillo y el cilindro.

W: anchura del canal.

e: anchura de la cresta del filete.

t: paso del husillo.

V: velocidad en cualquier punto de la masa del canal en los puntos x y y.

V_z : componente de la velocidad circunferencial en el canal.

V_c : velocidad circunferencial del cilindro con respecto al husillo ($V_c = \pi \times d \times \eta$).

Las direcciones positivas de los ejes x, y, z del sistema de coordenadas fijas y eje auxiliar I vienen indicadas con flechas (Figura 78). El eje y es perpendicular al plano seleccionado, z va dirigido en sentido longitudinal y x es transversal al canal helicoidal; I va dirigido longitudinalmente al husillo (Savgorodny, 1973). El **ángulo de hélice φ** del canal helicoidal aumenta desde su valor mínimo hasta el máximo, desde el diámetro exterior hasta en el núcleo del husillo.

Este ángulo será:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{t}{\pi \times D_z}\right)$$

En donde:

D_z : diámetro variable del canal del husillo.

t: paso del husillo.

Tomando en cuenta que para este tipo de husillos se cumple que $t = D_z$, tenemos:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{1}{\pi}\right)$$

$$\varphi = 17.66^\circ$$

De esta manera se puede generalizar diciendo que, para husillos no complejos, en lo que se refiere a la clase de material a procesar, siempre se utilizará el ángulo $\varphi = 17,66^\circ$ para cualquier diámetro; cumpliéndose que $t = D_z$.

Se ha elegido un paso de $t = 70$ mm, ya que es el valor mínimo del diámetro que se podría admitir para para extruir el jabón de Apaika (Figura 79). Por otro lado, debido a que comercialmente no existen cilindros de extrusión de ese diámetro, es evidente que el diámetro del husillo será el mayor inmediato disponible. Por tal motivo, y con el objetivo de simplificar, se tomará el valor mínimo del ángulo de la hélice, que se refiere al diámetro mínimo del husillo, es decir $t = D_{\min}$, ya que en los husillos con poca profundidad del canal este ángulo varía muy poco (Savgorodny, 1973).

Si se prescinde de la curvatura del canal, éste se puede desarrollar en un plano, tal como se ve en la Figura 78. b. En este caso el cilindro se muestra como un plano infinito (3), que se transporta frente a los canales (1) y filetes desarrollados (2) del husillo, en dirección perpendicular al eje 4.

La velocidad circunferencial del cilindro V_c se puede descomponer en dos componentes perpendiculares entre sí V_z y V_x , dirigidas longitudinal y transversalmente respecto al canal del husillo. La velocidad de la masa de jabón fundida en cualquier punto del canal se caracteriza por las componentes análogas V_z y V_x . La velocidad V_x , conservando el flujo continuo, provoca el movimiento de la masa fundida en la dirección y a una velocidad V_y . Esta velocidad es mayor en las paredes delanteras y traseras del canal, donde la masa fundida que corre en dirección transversal cambia el sentido de la corriente. Puesto que la componente V_y surge solamente a consecuencia del cambio de la velocidad V_x , correspondiente a la corriente transversal, el efecto de V_x en la producción se puede despreciar. Por esta razón en lo sucesivo se considerará que $V_y = 0$ (Savgorodny, 1973).

Parámetros geométricos.

En la Figura 45 se presentan las dimensiones del jabón artesanal de Apaika. Este tiene un largo de 90 mm, un ancho de 60 mm y un espesor de 22 mm. Debido a su ancho y espesor el diámetro de la boquilla debe ser de mínimo 70 mm, ya que de otro modo el producto extruido tendría dimensiones menores.

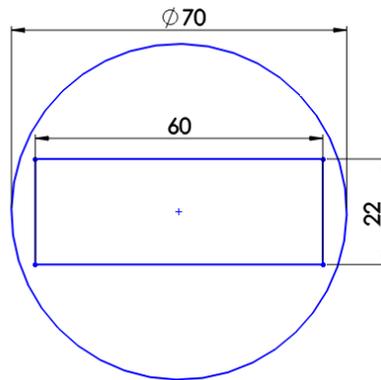


Figura 79. Vista frontal de la boquilla de extrusión.

Comercialmente el diámetro mayor inmediato a 70 mm para cilindros de extrusión es 3 in (76.20 mm). Por esta se razón se propone un diámetro de husillo igual a 76.20 mm, con el cual se podrá obtener un extruido con las dimensiones requeridas y un juego preciso con el cilindro de extrusión.

$$D = 76.20 \text{ mm}$$

Los parámetros geométricos del husillo extrusor son el punto de partida para su diseño mecánico. Estos parámetros influirán en gran medida en la capacidad de producción de la máquina extrusora, por lo tanto, es imperativa su correcta definición. Estos parámetros dependen en gran medida de la naturaleza y características de la aplicación, las cuales brindan al diseñador los criterios suficientes y necesarios para definir su geometría. Savgorodny (1973) sugiere las siguientes ecuaciones para el cálculo de dichos parámetros.

- **Paso del husillo:**

$$t = D_{\min}$$

$$t = 70 \text{ mm}$$

- **Profundidad del canal en la zona de alimentación:**

$$h_1 = 0.16D$$

$$h_1 = 0.16(76.2) = 12.20 \text{ mm}$$

- **Profundidad del canal en la zona de extrusión:**

$$h_3 = 0.5 \left[D - \sqrt{D^2 - \frac{4h_1}{i}(D - h_1)} \right]$$

En donde

i: grado de compresión.

El grado de compresión, es decir, la relación de los volúmenes entre los canales helicoidales en las zonas de alimentación y extrusión, se sitúan en el intervalo de 1.5:1 a 5:1 (Savgorodny, 1973). Para el jabón artesanal se busca un grado de compresión normal, por ello $i = 3$.

$$h_3 = 0.5 \left[(76.20) - \sqrt{(76.20)^2 - \frac{4(12.20)}{3} (76.20 - 12.20)} \right] = 3.60 \text{ mm}$$

- **Anchura de la cresta del filete:**

$$e = 0.1D$$

$$e = 0.105(76.2) = 8 \text{ mm}$$

Estos datos se volcaron en la siguiente tabla:

Tabla 37
Parámetros geométricos del husillo, en [mm].

Diámetro (D)	Paso (t)	Profundidad del canal en la zona de alimentación (h_1)	Profundidad del canal en la zona de extrusión (h_3)	Anchura del filete (e)
76.20	70	12.20	3.60	8

Longitud de las zonas del husillo.

La configuración geométrica del husillo depende fundamentalmente del material a transformar. De acuerdo a las especificaciones del producto (Tabla 21) la longitud del husillo no debe superar los 600 mm, por lo tanto nos planteamos una longitud $L = 490$ mm. La cual se considera suficiente para el propósito de extruir jabón artesanal y, al ser de escasa longitud, contrarresta los efectos de los esfuerzos de flexión.

El husillo en cuestión estará dividido en tres zonas. La zona de extrusión es la más importante; debemos asegurar que sea la de mayor longitud, ya que una mayor longitud de la zona de extrusión “garantiza la buena homogenización del material”. (Savgorodny, 1973, pág. 18). Con esto cumpliríamos una especificación más del producto (Tabla 21).

Savgorodny (1973) recomienda utilizar la siguiente ecuación para calcular la longitud de la zona de extrusión:

$$L_3 = 3t$$

Reemplazando:

$$L_3 = 3(70) = 210 \text{ mm}$$

El alargamiento de la zona de extrusión favorece no sólo el calentamiento por fricción, sino también la refrigeración de husillo. Por otro lado, el alargamiento de la zona de extrusión con la reducción adecuada de la profundidad del canal se puede conseguir un avance continuo del material, reduciendo prácticamente las pulsaciones (Savgorodny, 1973).

Para las zonas de alimentación y compresión (transición) se recomienda la misma longitud, de esta manera se asegurará una compresión y calentamiento uniformes de la masa de jabón. Las longitudes de dichas zonas serán:

$$L_1 = 140 \text{ mm}$$

$$L_2 = 140 \text{ mm}$$

Tenemos entonces un husillo distribuido de la siguiente manera: zona de alimentación 2t, zona de compresión 2t y zona de extrusión 3t.

Capacidad de producción.

La capacidad de producción, expresada en flujo volumétrico, se calcula mediante la siguiente expresión:

$$Q = \frac{\frac{A}{\tan(\varphi)} \left(\frac{L_1}{h_1^2} + \frac{L_2}{h_1 h_3} + \frac{L_3}{h_3^2} \right)}{\frac{\psi}{K} + \left(\frac{1}{\sin(\varphi)} \right)^2 \left(\frac{L_1}{h_1^3} + \frac{L_2(h_1 + h_3)}{2h_1^2 h_3^2} + \frac{L_3}{h_3^3} \right)}$$

Siendo

$$A = \frac{\pi^2 D^2 n}{2} \quad \psi = \frac{\pi D}{12}$$

En donde

K: constante total de la cabeza perfiladora.

n: velocidad del husillo en rpm.

El cabezal y la boquilla de la máquina extrusora de jabón artesanal deben ser fácilmente desmontables (Tabla 21) y la boquilla debe asegurar el reposo de la masa de jabón fundida antes de ser extruida (sección 2.3). Para ello se propone dos etapas: una cónica (cabezal) y otra rectángular (boquilla). La configuración cónica se encargará de guiar la masa de jabón hacia la configuración rectángular, atribuyéndole de esta manera la forma requerida al jabón de Apaika. Se propone una longitud de 50 mm para la etapa cónica y una longitud de 30 mm para la etapa rectángular. Además, se utilizará una malla filtrante o también conocida como plato rompedor de 5 mm de espesor, con 30 agujeros de 5 mm de diámetro:

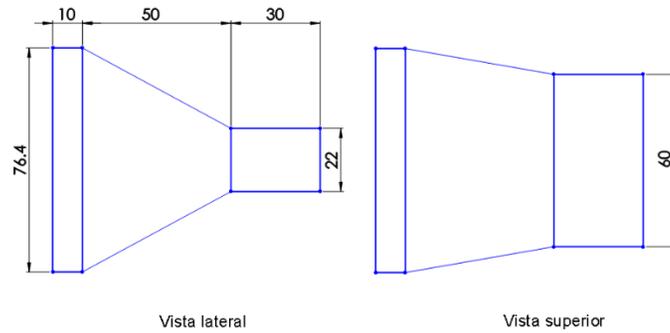


Figura 80. Esquema de la forma geométrica de la cabeza perfiladora.

Con esta información podemos calcular la constante total de la forma geométrica de la cabeza perfiladora (K) como se muestra a continuación:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3}}$$

En donde:

k_1 : constante del plato rompedor.

k_2 : constante de la etapa cónica.

k_3 : constante de la etapa rectangular.

A continuación, calculamos cada una de estas constantes.

- **Plato rompedor:**

$$k_1 = \frac{\pi n_a d_a^4}{128b}$$

En donde:

n_a : número de agujeros.

d_a : diámetro de los agujeros.

b : espesor del plato.

El plato debe ser lo suficientemente ancho como para evitar el contacto entre el cilindro y la cabeza perfiladora, pero aun así asegurar un ajuste hermético (sección 2.3), (Figura 80).

$$k_1 = \frac{\pi(30)(5)^4}{128(10)} = 46.02 \text{ mm}^3$$

- **Etapa cónica:**

$$k_2 = \frac{3\pi d_0^3 d_1^3}{128L_c(d_0^2 + d_0 d_1 + d_1^2)}$$

En donde:

d_0 : diámetro de entrada del material.

d_1 : diámetro de salida del material.

L_c : longitud del canal de la etapa.

En la Tabla 1 se muestran holguras típicas en función del diámetro del husillo. Evidentemente se selecciona el segundo valor ($\delta = 0.10$ mm).

El diámetro de entrada de esta etapa es igual al diámetro interno del cilindro de extrusión, que es igual al diámetro del husillo más la holgura ($d_0 = 76.20 + 2(0.10) = 76.40$ mm). El diámetro de salida es igual al ancho de los jabones Apaika ($d_1 = 60$ mm), (Figura 80).

$$k_2 = \frac{3\pi(76.40)^3(60)^3}{128(50)((76.40)^2 + (76.40)(60) + (60)^2)} = 1.01 \times 10^4 \text{ mm}^3$$

- **Etapla rectangular.**

$$k_3 = \frac{b_r h_r^3}{12L_c}$$

En donde:

b_r : longitud de la rendija rectangular.

h_r : ancho de la rendija rectangular.

La longitud y el ancho de la rendija rectangular son los mismos que el ancho y espesor del jabón de Apaika (Figura 45, Figura 79 y Figura 80), es decir, 60 mm y 22 mm, respectivamente.

$$k_3 = \frac{(60)(22)^3}{12(30)} = 1.78 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

Entonces la constante geométrica total es:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{46.02} + \frac{1}{1.01 \times 10^4} + \frac{1}{1.78 \times 10^3}} = 44.66 \text{ mm}^3$$

En este punto es importante puntualizar que la velocidad del husillo recomendada para máquinas extrusoras de jabón es mínimo 40 rpm.

$$n = 40 \text{ rpm}$$

Con esta información tenemos que:

$$A = \frac{\pi^2(76.2)^2(40)}{2} = 1.15 \times 10^6 \frac{\text{mm}^2}{\text{min}} \quad \psi = \frac{\pi(76.2)}{12} = 19.95 \text{ mm}$$

La capacidad de producción es:

$$Q = \frac{\frac{(1.15 \times 10^6)}{\tan(17.66)} \left(\frac{140}{(12.20)^2} + \frac{140}{(12.20)(3.60)} + \frac{210}{(3.60)^2} \right)}{\frac{19.95}{44.66} + \left(\frac{1}{\sin(17.66)} \right)^2 \left(\frac{140}{(12.20)^3} + \frac{(140)(12.20 + 3.60)}{2(12.20)^2(3.60)^2} + \frac{210}{(3.60)^2} \right)} = 1.29 \times 10^6 \frac{\text{mm}^3}{\text{min}}$$

El valor de la producción se debe expresar en Kg/h (Tabla 21). Para realizar la conversión se considera la densidad del jabón, que es igual a 1010 Kg/m³ (sección 2.8). Convirtiendo las unidades y operando obtenemos:

$$Q = \left(1.29 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \right) \left(1010 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right) \left(60 \frac{\text{min}}{\text{h}} \right)$$

$$Q = 78.20 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

Esto indica que la producción de la máquina extrusora será de 78.20 kilogramos de jabón por hora de operación. Este valor es correcto y suficiente, además cumple con las especificaciones definidas en la Tabla 21 de la sección 3.4.10.

Como se describió en la sección 2.4 la producción del husillo es el resultado de tres tipos diferentes de flujos. El flujo de arrastre (α), el flujo de presión (β) y el flujo de pérdidas (γ) (Figura 27). Otro modo de calcular la capacidad de producción relacionar estos flujos con la velocidad del husillo y la constante geométrica de la cabeza perfiladora:

$$Q = \left(\frac{\alpha K}{K + \beta + \gamma} \right) n$$

En donde:

α : constante del flujo directo o de arrastre.

β : constante del flujo inverso o de presión.

γ : constante del flujo de pérdidas.

K : constante total de la cabeza perfiladora.

n : velocidad del husillo en rpm.

Las constantes están definidas por:

$$\alpha = \frac{\pi m D h_3 \left(\frac{t}{m} - e \right) \cos^2(\varphi)}{2}$$

$$\beta = \frac{mh_3^3 \left(\frac{t}{m} - e \right) \sin(\varphi) \cos(\varphi)}{12L}$$

$$\gamma = \frac{\pi^2 D^2 \delta^3 \tan(\varphi)}{10eL}$$

En donde:

m: número de canales del husillo.

D: diámetro del husillo.

h_3 : profundidad del canal en la zona de extrusión o dosificación.

t: paso del husillo.

e: anchura de la cara del filete.

φ : ángulo de hélice del husillo.

L: longitud del husillo.

δ : holgura del filete del husillo con respecto al cilindro.

Ahora bien, reemplazando los valores señalados en la Tabla 1 y considerando que $m = 1$, tenemos:

$$\alpha = \frac{\pi(1)(76.20)(3.60) \left(\frac{70}{1} - 8 \right) \cos^2(17.66)}{2} = 2.41 \times 10^4 \text{ mm}^3$$

$$\beta = \frac{(1)(3.60)^3 \left(\frac{70}{1} - 8\right) \sin(17.66) \cos(17.66)}{12(490)} = 0.14 \text{ mm}^3$$

$$\gamma = \frac{\pi^2(76.2)^2(0.1)^3 \tan(17.66)}{10(8)(490)} = 4.65 \times 10^{-4} \text{ mm}^3$$

La capacidad de producción será:

$$Q = \left(\frac{(2.41 \times 10^4)(44.66)}{44.66 + 0.14 + 4.65 \times 10^{-4}} \right) (40)$$

$$Q = 9.63 \times 10^5 \frac{\text{mm}^3}{\text{min}}$$

$$Q = \left(9.63 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \right) \left(1010 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right) \left(60 \frac{\text{min}}{\text{h}} \right)$$

$$Q = 58.33 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

Vemos que de igual manera se cumple la especificación del producto con respecto a la capacidad de producción (Tabla 21).

Viscosidad efectiva del jabón artesanal de Apaika.

Como se describió en la sección 2.8 el jabón de Apaika fue sometido a pruebas en un reómetro rotacional. El experimento se realizó con el jabón a 40 °C (temperatura a la que fluye con mayor facilidad) y con una velocidad de cortadura de 20 1/s (Anexo 1), la cual es similar a la velocidad de corte para jabones en procesos de extrusión. Del experimento se obtuvo la siguiente gráfica.

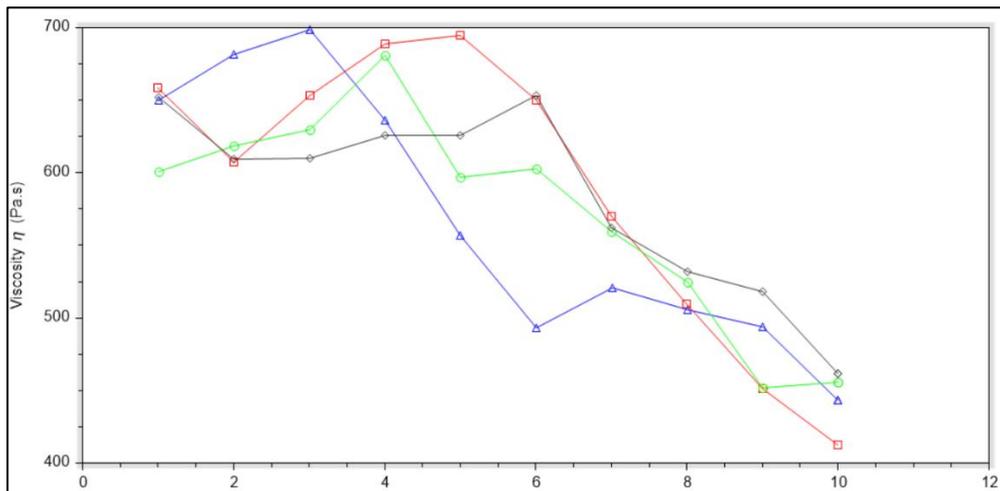


Figura 81. Gráfica de Viscosidad vs Tiempo de las 4 pruebas reológicas realizadas.

Las 4 curvas representan cada una de las pruebas llevadas a cabo. Se observa que la velocidad decrece a través del tiempo. Esto se debe a que las partículas del fluido se rompen y fluyen una sobre otra, haciendo que la fuerza de corte necesaria para deformar el jabón sea cada vez menor.

En la Tabla 5 se muestran los resultados promedio de las pruebas realizadas (promedio de las curvas de la Figura 81). De allí obtenemos que la viscosidad efectiva del jabón de Apaika (μ) es 644 Pa.s.

$$\mu = 644 \text{ Pa.s}$$

Relación longitud diámetro (L:D).

En este punto es bien conocido que tanto la capacidad de producción de la máquina extrusora como su funcionamiento dependen principalmente del tamaño del husillo, de la velocidad de giro, de la relación de su longitud al diámetro (L:D) y de las particularidades geométricas del canal helicoidal.

Savgorodny (1973) asegura que la relación de longitud al diámetro más corriente, para todo tipo de aplicaciones, es “una relación L:D = (20 - 25):1”. (p. 17). Sin embargo, este autor se enfoca más en extrusoras de uso industrial. Como no es nuestro caso, ya que la máquina extrusora será para uso a nivel de microempresa (como se definió en la planeación del producto, sección 3.2), la relación longitud al diámetro que nos planteamos es la que considera los parámetros ya establecidos de longitud L = 490 mm, diámetro D = 76.2 mm. Es decir 6.43:1.

$$L:D = 6.43:1$$

Tolerancias del husillo/cilindro.

En secciones anteriores ya se definió una holgura entre el husillo y el cilindro de $\delta = 0.1$ mm. Este valor fue elegido en base a la Tabla 1, y resulta suficiente de acuerdo a los recursos disponibles para la fabricación de la máquina extrusora y a la recomendación de Savgorodny (1973), quien recomienda un valor de $\delta = 0.002D$ mm (para nuestro caso $\delta = 0.002(76.2) = 0.15$ mm).

Por otro lado, para la holgura del radio del filete se toma el radio de raíz ($R = 3.60$ mm). De esta manera, la holgura no debe ser menor que $\frac{1}{2}$ de la profundidad del filete.

Es importante definir que todos los filetes serán perpendiculares al eje del husillo. Para este aspecto nos planteamos una tolerancia de $\pm 0.006^\circ$.

Número de filetes del husillo.

El número de filetes del husillo se calcula en base a la relación de longitud ($L = 490$ mm) al paso ($t = 70$ mm), la cual para nuestro caso es: 7:1.

Por lo tanto, el número de filetes será:

$$N_f = \frac{7}{1} = 7 \text{ filetes}$$

Relación de compresión.

La relación de compresión es probablemente la constante más empleada en la terminología de diseño de husillos. Es importante para determinar problemas de degradación que tienen que ver con la profundidad del canal o la alta velocidad de giro. La relación de compresión está definida por:

$$\beta_c = \frac{h_1}{h_3}$$

De acuerdo a la Tabla 37 este valor es:

$$\beta_c = \frac{12.20}{3.60} = 3.40$$

El cual es un valor común para uso generales.

Presión.

La presión se genera en la zona de dosificación debido a la reducción de diámetro que experimenta la sección por donde pasa el material al ser extruido. La

presión cumple un importante papel en el proceso de extrusión e influye directamente en la calidad del acabado del material. El cálculo de la presión es importante porque de ella se derivan varios cálculos de diseño.

La presión, suponiendo que el material extruido se comporta como un fluido newtoniano y que el proceso es isotérmico, se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\Delta P = \mu \left(\frac{Q}{K} \right)$$

En donde Q está en $\frac{\text{mm}^3}{\text{s}}$.

$$Q = 2.15 \times 10^3 \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}$$

Reemplazando tenemos:

$$\Delta P = (644) \left(\frac{2.15 \times 10^3}{44.66} \right) = 0.31 \text{ MPa}$$

La presión a lo largo de todo el husillo durante el proceso de extrusión será de 0.31 MPa.

Selección del material.

Durante el proceso de extrusión el husillo estará en permanente contacto con la masa de jabón de Apaika, la cual, por su naturaleza, posee propiedades causticas y corrosivas. Es importa que no se presente ningún tipo de reacción química entre el jabón y el husillo, ya que esto influiría en gran medida en las propiedades del producto final. Por esta razón se ha seleccionado acero inoxidable AISI 304, que es ideal para esta aplicación y, además, es el más común en el mercado, en Quito, Ecuador.

La aleación AISI 304 (Fe/Cr18/Ni10) es un acero inoxidable austenítico de uso general con una estructura cúbica de caras centradas y con una concentración de cromo al 18%, lo que lo vuelve altamente resistente a esfuerzos y a la corrosión. Es esencialmente no magnético en estado recocido y sólo puede endurecerse en frío. Su bajo contenido en carbono le otorga una mejor resistencia a la corrosión en estructuras soldadas. Además, su alto contenido de níquel le brinda gran ductilidad, tenacidad y resistencia a la corrosión en ambientes ácidos. También fomenta la formación y estabilización de la Austenita. En el Anexo 3 se muestran las propiedades mecánicas de los aceros inoxidables de la serie 300.

Este material se utiliza para la fabricación de pasamanos, mangones, bancas, fittings, cicloparqueaderos, monumentos, acoples, mesas rotatorias, ruedas dentadas, etc. Sus principales aplicaciones se dan en la construcción, cocina y medicina.

- **Maquinabilidad.**

Los aceros inoxidable Austeníticos tienen buena ductilidad, tenacidad y resistencia a la corrosión, y presentan una gran elongación durante la aplicación de cargas tensiles. Una de las mayores ventajas que presentan estos aceros es su gran soldabilidad y maquinabilidad o formabilidad (Gámez Campos, 2017).

- **Soldabilidad.**

La soldabilidad describe como los materiales afectados por la soldadura (material de aporte y material base) retienen sus propiedades como resistencia y resistencia a la corrosión (Gámez Campos, 2017).

La American Welding Society la define como la capacidad de un material para ser soldado bajo condiciones de fabricación impuestas dentro de una estructura específica y convenientemente diseñada para tener un rendimiento satisfactorio en el servicio que se pretende.

Por otro lado, la soldabilidad significa la susceptibilidad del acero a la fractura debido a la fragilización por hidrógeno, la cual sucede principalmente en los aceros de alta resistencia (Gámez Campos, 2017).

En los aceros inoxidable, la zona afectada por el calor (ZAC) es de un tamaño muy reducido o prácticamente nulo en comparación con los aceros al carbono debido a

su baja conductividad térmica (Coahuila, 2009). Además, está comprobado que el acero inoxidable 304, por su bajo contenido de carbono, previene la formación de carburos durante el proceso de soldadura. Su alto contenido de Níquel (10%) facilita la estabilización de la Austenita, evitando la formación de ferrita y el fenómeno de precipitación.

Peso del husillo.

Es importante calcular el peso del husillo porque de él se derivan posteriores cálculos de resistencia.

Primero calcularemos el volumen del alma del husillo.

Contamos con la siguiente información:

Tabla 38
Valores geométricos de las zonas del husillo.

Zona	Longitud (L_i) [mm]	Radio del alma (r_i) [mm]	Área transversal (A_i) [mm²]	Volumen (V_i) [mm³]
1. Alimentación	140	25.91	2.11×10^3	2.95×10^5
3. Extrusión	210	34.52	3.74×10^3	7.86×10^5

El área transversal se calcula mediante:

$$A_i = \pi(r_i)^2$$

El volumen:

$$V_i = A_i \times L_i$$

En la zona de compresión se desconoce la profundidad del canal, por lo que el volumen de esta zona se calcula mediante la siguiente expresión:

$$V_2 = \frac{\pi L_2}{3} (r_1^2 + r_1 r_3 + r_3^2)$$

En donde:

r_1 : radio del alma en la zona de alimentación.

r_3 : radio del alma en la zona de extrusión.

L_2 : longitud de la zona de compresión.

$$V_2 = \frac{\pi(140)}{3} ((25.91)^2 + (25.91)(34.52) + (34.52)^2) = 4.04 \times 10^5 \text{ mm}^3$$

Con esta información podemos calcular el volumen total del alma del husillo:

$$V_T = V_1 + V_2 + V_3$$

$$V_T = 2.95 \times 10^5 + 4.04 \times 10^5 + 7.86 \times 10^5 = 1.49 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

A continuación, calculamos el volumen de los filetes del husillo.

Contamos con la siguiente información:

Tabla 39
Valores geométricos de los filetes del husillo.

Zona	Ancho del filete (e) [mm]	Profundidad del canal (h _i) [mm]	Longitud del filete (L _{fi}) [mm]	Número de filetes (n _{fi})	Volumen (V _{fi}) [mm ³]
1. Alimentación	8	12.2	249.41	2	4.87 × 10 ⁴
3. Extrusión	8	3.60	249.41	3	2.15 × 10 ⁴

La longitud del filete es la misma para todas las zonas y se calcula mediante:

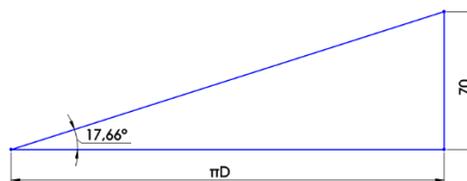


Figura 82. Triángulo rectángulo para el cálculo de la longitud del filete.

$$L_{fi} = \sqrt{(\pi D)^2 + (70)^2}$$

En donde D es el diámetro del husillo.

El volumen de los filetes en cada zona se calcula mediante:

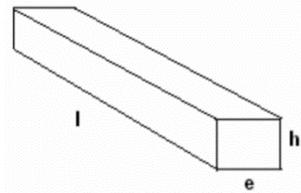


Figura 83. Sección del filete

$$V_{fi} = L_{fi} \cdot e \cdot h_i \cdot n_{fi}$$

En donde

n_{fi} : número de filetes en cada zona. Este dato se calcula como sigue:

$$n_{fi} = \frac{L_i}{t}$$

Una recta aproximada que define el decremento de la profundidad del canal en la zona de compresión es:

$$h_2 = \left(\frac{h_3 - h_1}{L_2} \right) (L_a - L_1) + h_1$$

El punto intermedio de zona de compresión está en $L_a = 210$ mm, por lo tanto, la altura del canal aproximada en esta zona será:

$$h_2 = \left(\frac{3.60 - 12.20}{140} \right) (210 - 140) + 12.20 = 7.90 \text{ mm}$$

El volumen de los filetes en esta zona es:

$$V_{f2} = (249.41)(8)(7.9)(2) = 3.15 \times 10^4 \text{ mm}^3$$

El volumen total de los filetes es:

$$V_{Tf} = V_{f1} + V_{f2} + V_{f3}$$

$$V_{Tf} = 4.87 \times 10^4 + 3.15 \times 10^4 + 2.15 \times 10^4 = 1.02 \times 10^5 \text{ mm}^3$$

El volumen total del husillo se consigue sumando el volumen del alma y el volumen de los filetes del husillo:

$$V_H = V_T + V_{Tf}$$

$$V_H = 1.49 \times 10^6 + 1.02 \times 10^5 = 1.59 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

Como el material del que se planea fabricar el husillo es acero inoxidable AISI 304, con una densidad de $\gamma = 8000 \text{ Kg/m}^3$ (Anexo 2), podemos calcular el peso del husillo como se muestra a continuación:

$$m_H = V_H \cdot \gamma$$

Entonces:

$$m_H = (1.59 \times 10^{-3})(8000) = 12.70 \text{ Kg}$$

Potencia requerida.

En el proceso de extrusión el material va avanzando hacia la boquilla a través de las hélices del husillo extrusor. Este desplazamiento es posible debido a la selección de un motor capaz de generar la potencia adecuada para vencer la oposición que presenta

el material al desplazarse. De acuerdo a Velilla Díaz & Maury Ramirez (2013) esta potencia es:

Expresada en nuestra nomenclatura:

$$N_t = -\frac{nD}{2} \left(\frac{3\mu nk}{k - \frac{1}{k}} + \tau_0 \right) \left(\frac{4\pi N_f \left(\frac{D_c^2 - 4D_c r_3}{8} \right)}{\cos(\varphi)} \right)$$

En donde:

n : velocidad rotacional del husillo, en rev/s

k : relación entre el diámetro del husillo y el cilindro, para nuestro caso $k = 0.998$

τ_0 : esfuerzo de corte inicial del material.

D_c : diámetro del cilindro.

r_3 : radio del alma del husillo en la zona de extrusión.

El esfuerzo de corte inicial de la masa de jabón se calcula como sigue:

$$\tau_0 = \frac{\mu_0}{t}$$

En donde t es el tiempo en segundos y μ_0 es la viscosidad inicial. Estudiando el Anexo 1 se puede constatar que cuando $t = 1$ s la viscosidad inicial promedio es $\mu_0 = 640.5$ Pa.s, por lo tanto:

$$\tau_0 = \frac{640.5}{1} = 640.5 \text{ Pa}$$

Por otro lado, el diámetro del cilindro se consigue sumando al diámetro del husillo el doble de la holgura:

$$D_c = D + 2\delta$$

$$D_c = 76.2 + 2(0.1) = 76.4 \text{ mm}$$

Entonces, la potencia requerida es:

$$N_t = -\frac{(0.67)(76.2 \times 10^{-3})}{2} \left(\frac{3(644)(0.67)(0.998)}{0.998 - \frac{1}{0.998}} + 640.5 \right) \left(\frac{4\pi(7) \left(\frac{(76.4 \times 10^{-3})^2 - 4(76.4 \times 10^{-3})(34.52 \times 10^{-3})}{8} \right)}{\cos(17.66)} \right)$$

$$N_t = 442.46 \text{ W}$$

Esta potencia es teórica, pues no se han considerado las pérdidas que se pueden producir al momento de instalar el motor. Según Enríquez Harper (2004) estas pérdidas son:

- **Pérdidas por instalación eléctrica:**

$$Z_e = 0.015(N_t)$$

$$Z_e = 0.015(442.46) = 6.64 \text{ W}$$

- **Pérdidas generales en motores:**

$$Z_m = 0.03(N_t)$$

$$Z_m = 0.03(442.46) = 13.27 \text{ W}$$

La mínima potencia real requerida es:

$$N = N_t + Z_e + Z_m$$

$$N = 442.46 + 6.64 + 13.27 = 462.37 \text{ W}$$

Sin embargo, de acuerdo al Benchmarking con la competencia realizado en la sección 3.4.3 (Tabla 17) y a las especificaciones del producto (Tabla 21), es un valor muy escaso, pues nos brinda un torque igual a:

$$T = 9550 \frac{0.462}{40} = 110.39 \text{ Nm}$$

Por esta razón consideramos que una potencia de $N = 1.5 \text{ KW}$ (2 HP) es suficiente para el propósito de extruir jabón, ya que es una potencia que se consigue fácilmente en el mercado de motores trifásicos y además cumple satisfactoriamente con las especificaciones de torque:

$$T = 9550 \frac{1.5}{40} = 358.13 \text{ Nm}$$

Por lo tanto, se define la potencia requerida en:

$$N = 1.5 \text{ KW} \quad \text{o} \quad N = 2 \text{ HP}$$

Análisis de resistencia.

La misión fundamental del cálculo de resistencia consiste en comprobar las dimensiones previamente determinadas del husillo y determinar la flecha máxima

admisible. Sobre el husillo se ejerce una fuerza axial P , un torque M_g y la carga uniforme repartida q , originada por su propio peso. Las fuerzas P y q inducen la flecha f del husillo. Los siguientes cálculos son realizados en base a lo descrito en Savgorodny (1973):

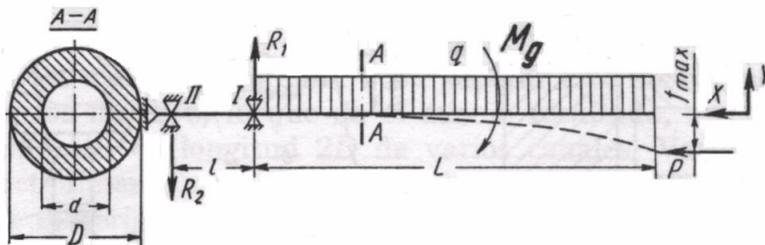


Figura 84. Diagrama de fuerzas del husillo.
Fuente: (Savgorodny, 1973).

Los valores iniciales para el cálculo del husillo son:

$$M_g = 9550 \frac{N}{n}$$

$$P = F \cdot p$$

En donde:

N: potencia del motor, en kW.

n: velocidad rotacional del husillo, en rpm.

F: superficie de la sección transversal del husillo, en m^2 .

p : presión del material en la parte delantera del husillo, en Pa.

Reemplazando obtenemos:

$$M_g = 9550 \frac{(1.5)}{(40)} = 358.13 \text{ Nm}$$

Para calcular las fuerzas que actúan sobre el husillo (Figura 84), antes se deberá comprobar su esbeltez mediante la siguiente fórmula:

$$\lambda = \frac{aL}{R_i}$$

En donde:

a : coeficiente que depende exclusivamente del procedimiento empleado para fijar el extremo del husillo (para nuestro caso $a = 2$).

L : longitud del husillo.

R_i : radio de inercia de la sección.

El radio de inercia se determina mediante la siguiente expresión:

$$R_i = \sqrt{\frac{J}{F}}$$

En donde J es el momento de inercia de la sección transversal A-A (Figura 84).

Se calcula mediante:

$$J = \frac{\pi D^4}{64} (1 - u^4)$$

En donde:

D: diámetro del husillo.

u: relación entre los diámetros del alma del husillo en las zonas de alimentación y extrusión.

Para calcular F determinamos el valor de la superficie transversal del husillo, es decir, la superficie del área rayada (área seccionada A-A) en la Figura 84.

$$F = \frac{\pi D^2}{4} (1 - u^2)$$

En donde:

$$u = \frac{d_a}{d_e}$$

Como la altura del filete en la zona de extrusión es $h_3 = 3.60$ mm, el diámetro del alma del husillo en esta zona será:

$$d_e = 76.2 - 2(3.60) = 69.04 \text{ mm}$$

La altura del filete en la zona de alimentación es $h_1 = 12.20$ mm, el diámetro del alma del husillo en esta zona será:

$$d_a = 76.2 - 2(12.20) = 51.82 \text{ mm}$$

Tenemos:

$$u = \frac{51.82}{69.04} = 0.75$$

El momento de inercia de la sección transversal es:

$$J = \frac{\pi(76.2)^4}{64} (1 - (0.75)^4) = 1.13 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

La superficie transversal del husillo es:

$$F = \frac{\pi(76.2)^2}{4} (1 - (0.75)^2) = 1.99 \times 10^3 \text{ mm}^2$$

El radio de inercia de la sección transversal es:

$$R_i = \sqrt{\frac{1.13 \times 10^6}{1.99 \times 10^3}} = 23.82 \text{ mm}$$

Con estos datos podemos calcular la esbeltez:

$$\lambda = \frac{(2)(490)}{(23.82)} = 41.14$$

Como se cumple que $\lambda < 120$ se puede proseguir con el cálculo del husillo.

Para efectos de diseño haremos que la presión específica del material en la parte delantera del husillo sea equivalente a la presión a lo largo de toda la extrusora. De acuerdo a esto, la fuerza axial en el husillo es:

$$P = (1.99 \times 10^3)(0.31) = 617.38 \text{ N}$$

La tracción tangencial máximo sobre la superficie del husillo se calcula como sigue:

$$\tau = \frac{M_g}{W_p}$$

En donde W_p es el momento polar de resistencia y es igual a:

$$W_p = \frac{\pi D^3}{16} (1 - u^4)$$

$$W_p = \frac{\pi(76.2 \times 10^{-3})^3}{16} (1 - (0.75)^4) = 5.93 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

Reemplazando:

$$\tau = \frac{(358.13)}{5.93 \times 10^{-5}} = 6.04 \text{ MPa}$$

Puesto que las tracciones normales se producen por causa de la fuerza axial P y la carga repartida q , las flexiones máximas surgirán en el apoyo del husillo (en el primer cojinete).

$$\sigma = \frac{P}{F} + \frac{M_f}{W_o}$$

La carga repartida q es:

$$q = \frac{m_H}{L}$$

$$q = \frac{12.70}{490 \times 10^{-3}} = 25.91 \frac{\text{Kg}}{\text{m}}$$

M_f es el momento de flexión máximo (en el apoyo I, Figura 84).

$$M_f = \frac{qL^2}{2}$$

$$M_f = \frac{(25.91)(490 \times 10^{-3})^2}{2} = 3.11 \text{ Kg.m}$$

Multiplicando por la gravedad ($g = 9.8 \text{ m/s}^2$):

$$M_f = 30.49 \text{ Nm}$$

W_o es el momento resistente respecto al eje neutro del husillo:

$$W_o = \frac{\pi D^3}{32} (1 - u^4)$$

$$W_o = \frac{\pi(76.2 \times 10^{-3})^3}{32} (1 - (0.75)^4) = 2.97 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

El esfuerzo de flexión máximo es:

$$\sigma = \frac{617.38}{1.99 \times 10^3} + \frac{30.49}{2.97 \times 10^{-5}}$$

$$\sigma = 0.31 + 1.03 = 1.34 \text{ MPa}$$

La solidez del husillo, aplicando la tercera teoría de resistencia, será:

$$\sigma_T = \frac{S_{ut}}{n_s}$$

En donde:

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$$

$$\sigma_T = \sqrt{(1.34)^2 + 3(6.04)^2} = 10.55 \text{ MPa}$$

El esfuerzo último a la tracción es $S_{ut} = 517 \text{ MPa}$, tenemos entonces:

$$10.55 = \frac{517}{n_s} \text{ MPa}$$

El factor de seguridad es:

$$n_s = \frac{517}{10.55} = 49$$

Con el cual se valida el diseño del husillo y se conoce con certeza que resistirá los esfuerzos de torsión y flexión implicados.

La flecha máxima del husillo es:

$$f_{\max} = \frac{qgL^4}{8EJ}$$

En donde:

E: módulo de elasticidad del acero inoxidable AISI 304.

g: aceleración gravitatoria (9.80 m/s²)

Para este acero E = 190 GPa

$$f_{\max} = \frac{(25.91)(9.8)(490 \times 10^{-3})^4}{8(190 \times 10^9)(1.13 \times 10^{-6})} = 8.53 \times 10^{-6} \text{ m}$$

Transformando:

$$f_{\max} = 8.53 \times 10^{-3} \text{ mm}$$

Como el valor de la flecha máxima es mucho menor que la holgura radial del sistema husillo-cilindro, se valida el diseño geométrico del husillo.

$$f_{\max} < \delta$$

$$8.53 \times 10^{-3} < 0.1 \text{ mm}$$

Para calcular las reacciones en los apoyos I y II (Figura 84) tenemos que determinar las fuerzas efectivas, basándonos en la fórmula de los momentos y la proyección de todas las fuerzas sobre el eje yy. Para ellos nos planteamos una longitud entre apoyos igual a $l = 150 \text{ mm}$.

$$\sum F_y = R_1 - R_2 - m_H g = 0$$

$$\sum M_I = m_H g \frac{L}{2} - R_2 l = 0$$

En donde:

m_H : peso del husillo, en Kg.

g : aceleración gravitacional, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$.

Las reacciones en los apoyos serán:

$$R_2 = \frac{m_H g L}{2l}$$

$$R_2 = \frac{(12.70)(9.8)(490)}{2(150)} = 203.24 \text{ N}$$

$$R_1 = m_H g + R_2$$

$$R_1 = (12.70)(9.8) + 203.24 = 327.67 \text{ N}$$

Diseño a fatiga (Diseño del muñón).

Debido a que el husillo es un elemento rotatorio estará sometido a cargas y esfuerzos de torsión y flexión variables. Por lo tanto, es imprescindible diseñarlo para evitar fallas por fatiga:

Un diagrama de cuerpo libre simplificado del husillo es:

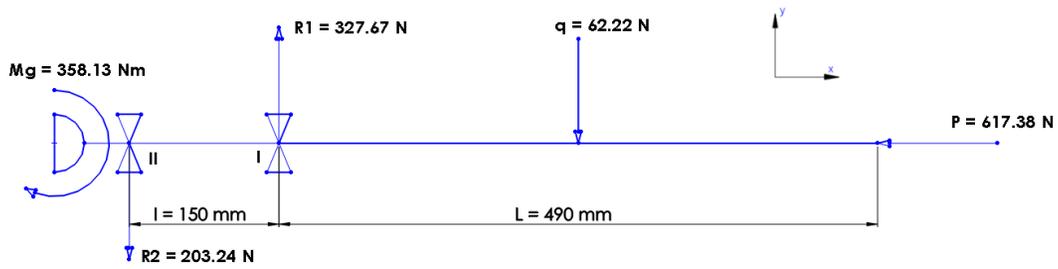


Figura 85. Diagrama de cuerpo libre del husillo.

Desarrollamos el diagrama de momento flector utilizando la aplicación MDSolids

4.0:

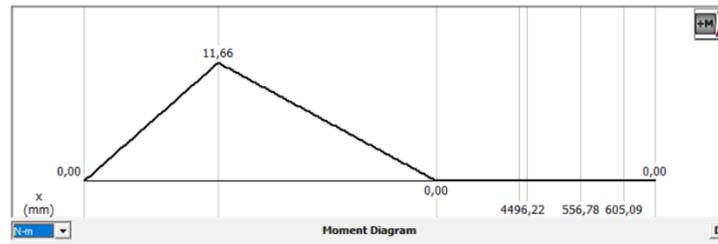


Figura 86. Diagrama de momento flector del husillo.

A continuación, presentamos el diagrama de torque a lo largo del husillo:

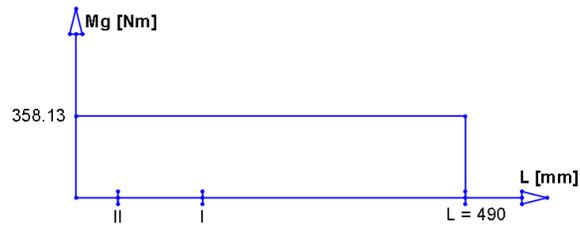


Figura 87. Diagrama del torque a lo largo del husillo.

De acuerdo a la Figura 85 y la Figura 86 comprobamos que el punto más crítico es el apoyo I. En donde se presentan los siguientes esfuerzos:

Esfuerzo cortante máximo:

$$\tau = 6.04 \text{ MPa}$$

Esfuerzo flexionante máximo:

$$\sigma = 1.34 \text{ MPa}$$

Caracterizando los esfuerzos:

$$\sigma_{\max} = 1.34 \text{ MPa} \qquad \tau_{\max} = 6.04 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\max} = -1.34 \text{ MPa} \qquad \tau_{\max} = 6.04 \text{ MPa}$$

$$\sigma'_m = \left| \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \right| \quad \tau'_m = \left| \frac{\tau_{\max} + \tau_{\min}}{2} \right|$$

$$\sigma'_\alpha = \left| \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \right| \quad \tau'_\alpha = \left| \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{2} \right|$$

$$\sigma'_m = \left| \frac{1.34 - 1.34}{2} \right| = 0 \text{ MPa} \quad \tau'_m = \left| \frac{6.04 + 6.04}{2} \right| = 6.04 \text{ MPa}$$

$$\sigma'_\alpha = \left| \frac{1.34 + 1.34}{2} \right| = 1.34 \text{ MPa} \quad \tau'_\alpha = \left| \frac{6.04 - 6.04}{2} \right| = 0 \text{ MPa}$$

El apoyo I forma parte del muñón. El muñón es la parte del husillo que permite acoplarlo al motor para que pueda girar y efectuar el proceso de extrusión. Un esquema del muñón a diseñar se presenta a continuación:

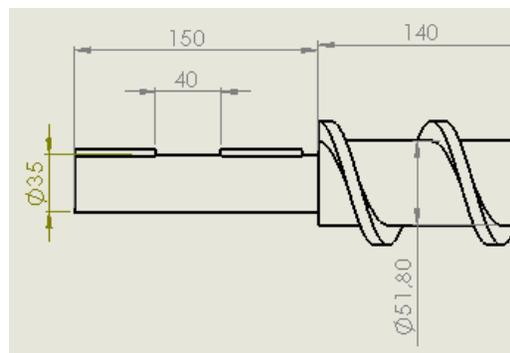


Figura 88. Esquema del muñón del husillo.

Como ya se mencionó antes, el eje a partir del cual se fabricará el husillo es de acero inoxidable AISI 304. En el Anexo 3 se presentan las propiedades mecánicas de este material, entre las cuales tenemos: $S_{ut} = 517$ Mpa, $S_y = 207$ Mpa, Elongación = 60 % y HB = 139.

La longitud del muñón es de $l = 150$ mm, y su diámetro, para que sea fácilmente acoplable a la caja reductora, se definirá en $d_m = 35$ mm. El cambio de sección inmediato entre el husillo y el muñón es el punto más crítico (apoyo I en Figura 85).

Para este punto se calculan los factores de concentración del esfuerzo de acuerdo a:

$$\frac{D_1}{d_m} = \frac{51.8}{35} \approx 1.50$$

$$\frac{r}{d_m} = \frac{2}{35} = 0.06$$

$r = 2$ mm es el radio de la herramienta con la que se maquinará el muñón.

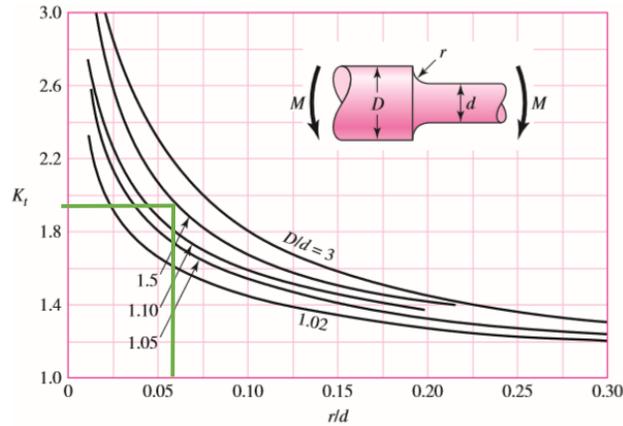


Figura 89. Diagrama para el cálculo del factor de concentración del esfuerzo a flexión.
Fuente: (Budynas & Nisbeth J, 2012).

Se elige un valor aproximado de $K_t = 1.95$

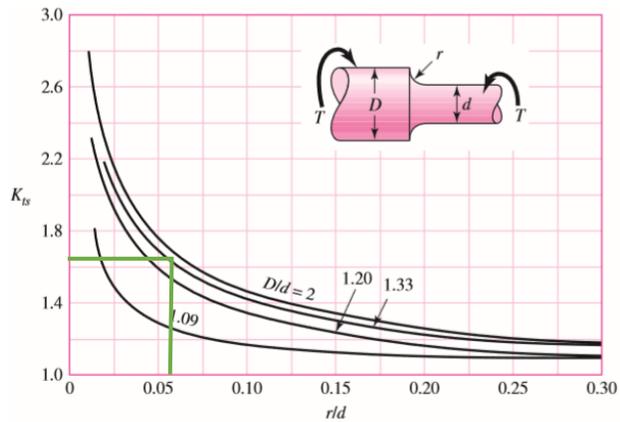


Figura 90. Diagrama para el cálculo del factor de concentración del esfuerzo a torsión.
Fuente: (Budynas & Nisbeth J, 2012).

Se elige un valor aproximado de $K_{ts} = 1.65$.

Para calcular la sensibilidad a la muesca a flexión q_m se tiene la siguiente ecuación:

$$q_m = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{r}}}$$

En donde \sqrt{a} se puede calcular mediante:

$$\sqrt{a} = 0.245799 - 0.307794 \times 10^{-2}(S_{ut}) + 0.150874 \times 10^{-4}(S_{ut})^2 - 0.266978 \times 10^{-7}(S_{ut})^3$$

Con $S_{ut} = 75$ Kpsi (Anexo 3):

$$\sqrt{a} = 0.089 \sqrt{\text{in}}$$

Transformando.

$$\sqrt{a} = 0.45 \sqrt{\text{mm}}$$

Entonces

$$q_m = \frac{1}{1 + \frac{0.45}{\sqrt{2}}} = 0.76$$

Para calcular la sensibilidad a la muesca a torsión q_{ms} se tiene $HB = 139$ (Anexo

3).

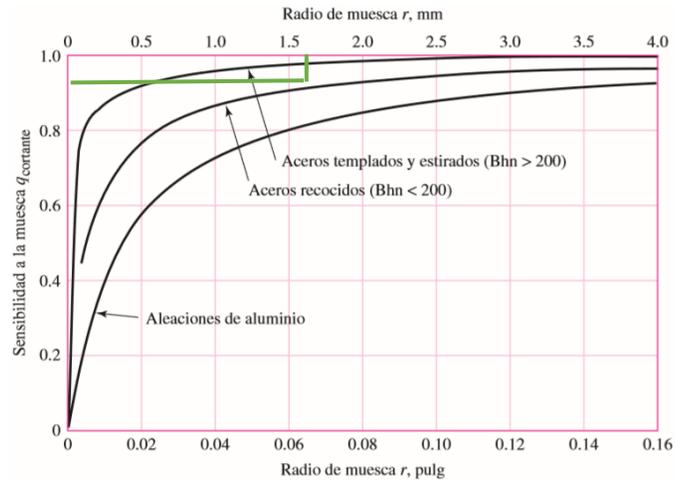


Figura 91. Diagrama para el cálculo de sensibilidad a la muesca de materiales sometidos a torsión inversa. Fuente: (Budynas & Nisbeth J, 2012).

Se elige un valor aproximado de $q_{ms} = 0.92$.

Con los valores de sensibilidad a la muesca podemos calcular los factores de concentración del esfuerzo por fatiga:

$$k_f = 1 + q_m(K_t - 1) \quad k_{fs} = 1 + q_{ms}(K_{ts} - 1)$$

$$k_f = 1 + (0.76)(1.95 - 1) \quad k_{fs} = 1 + (0.92)(1.65 - 1)$$

$$k_f = 1.72 \quad k_{fs} = 1.60$$

Con esta información ya podemos calcular los esfuerzos alternante y medio de

Von Mises:

$$\sigma_{\alpha} = \sqrt{(k_f \sigma'_{\alpha})^2 + 3(k_{fs} \tau'_{\alpha})^2}$$

$$\sigma_m = \sqrt{(k_f \sigma'_m)^2 + 3(k_{fs} \tau'_m)^2}$$

$$\sigma_{\alpha} = \sqrt{((1.72)(1.34))^2} = 2.30 \text{ MPa}$$

$$\sigma_m = \sqrt{3((1.60)(6.04))^2} = 16.71 \text{ MPa}$$

A continuación, calculamos el límite de resistencia a la fatiga.

$$S_e = K_a K_b K_c K_d K_e K_f S'_e$$

En donde:

K_a : factor de modificación de la condición superficial.

K_b : factor de modificación del tamaño.

K_c : factor de modificación de la carga.

K_d : factor de modificación de la temperatura.

K_e : factor de confiabilidad.

K_f : factor de modificación de efectos varios.

S'_e : límite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria, (Budynas & Nisbeth J, 2012).

Tenemos que el límite de resistencia a la fatiga general es:

$$S'_e = 0.5S_{ut}$$

Consultando el Anexo 3 sabemos que el $S_{ut} = 517$ MPa.

$$S'_e = 0.5(517) = 258.5 \text{ MPa}$$

- **Factor de modificación de la condición superficial.**

$$K_a = a(S_{ut})^b$$

En donde los valores de a y b se obtiene de:

Acabado superficial	Factor a		Exponente b
	S_{ut} kpsi	S_{ut} MPa	
Esmerilado	1.34	1.58	-0.085
Maquinado o laminado en frío	2.70	4.51	-0.265
Laminado en caliente	14.4	57.7	-0.718
Como sale de la forja	39.9	272.	-0.995

Figura 92. Parámetros en el factor de la condición superficial de Marin.
Fuente: (Budynas & Nisbeth J, 2012).

Tenemos entonces:

$$K_a = 1.58(517)^{-0.085} = 0.93$$

- **Factor de modificación del tamaño.**

$$K_b = 1.24(d_m)^{-0.107}$$

$$K_b = 1.24(35)^{-0.107} = 0.85$$

- **Factor de modificación de la carga.**

Para esfuerzos combinados:

$$K_c = 1$$

- **Factor de modificación de la temperatura.**

$$K_d = 0.975 + 0.432 \times 10^{-3}(T_F) - 0.115 \times 10^{-5}(T_F)^2 + 0.104 \times 10^{-8}(T_F)^3 - 0.595 \times 10^{-12}(T_F)^4$$

Como en el proceso de extrusión se espera una temperatura máxima de $T_C = 40^\circ\text{C}$ ($T_F = 104^\circ\text{F}$), debido a los esfuerzos de cizalladura:

$$K_d = 1.009$$

- **Factor de confiabilidad.**

Nos impondremos una confiabilidad del 99%.

Confiabilidad, %	Variación de transformación z_a	Factor de confiabilidad k_e
50	0	1.000
90	1.288	0.897
95	1.645	0.868
99	2.326	0.814
99.9	3.091	0.753
99.99	3.719	0.702
99.999	4.265	0.659
99.9999	4.753	0.620

Figura 93. Factores de confiabilidad correspondientes a 8 desviaciones estándar porcentuales del límite de resistencia a la fatiga.
Fuente: (Budynas & Nisbeth J, 2012).

$$K_e = 0.814$$

- **Factor de modificación de efectos varios.**

Como los esfuerzos en la zona analizada no son complejos, se considera:

$$K_f = 1$$

El límite de resistencia a la fatiga es:

$$S_e = (0.93)(0.85)(1)(1.009)(0.814)(1)(258.5)$$

$$S_e = 167.10 \text{ MPa}$$

Aplicando el criterio de Goodman modificado podemos calcular el factor de seguridad a fatiga.

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n_s}$$

En donde n_s es el factor de seguridad a Fatiga. Despejando la ecuación:

$$n_s = \frac{1}{\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}}}$$

$$n_s = \frac{1}{\frac{2.30}{167.10} + \frac{16.71}{517}}$$

$$n_s = 21.68$$

Obtenemos un factor de seguridad bastante alto, lo que indica que el diseño a fatiga es confiable y el husillo resistirá las cargas y esfuerzos implicados en el proceso de extrusión.

$$n_s = 22$$

Y como los análisis llevados a cabo se realizaron en la sección más crítica, la cual resiste los esfuerzos máximos, es obvio que todo el husillo resistirá los esfuerzos implicados.

Diseño de la chaveta.

Las cuñas o chavetas son elementos de máquinas que se utilizan sobre ejes para fijar elementos rotatorios, como engranes, poleas o ruedas (Budynas & Nisbeth J, 2012). Las cuñas se ubican entre el eje y la masa de una pieza que transmite potencia con el objetivo de permitir la transmisión del par de torsión (Gómez Gómez & Gutiérrez Bedoya, 2007). Las cuñas son desmontables para facilitar su montaje y desmontaje sobre el eje. Se ubica dentro de una ranura axial que se maquina en el eje, la cual lleva el nombre de cuñero o chavetero (Budynas & Nisbeth J, 2012).

En nuestro caso el elemento que transmite el par de torsión es el eje del motorreductor trifásico, el cual debemos fijar con el muñón del husillo a través de dos chavetas. Estas deberán ser rectangulares, ya que el proceso de extrusión se realizará por largas jornadas y porque deben ser capaz de resistir las presiones desarrolladas y las cargas y esfuerzos combinados ya analizados.

El diámetro del eje determina los tamaños estándar para el grosor, la altura y la profundidad de las chavetas (Figura 94). Por otro lado, el largo se calcula de modo que la chaveta sea apropiada para soportar la carga de torsión. La chaveta puede fallar ya sea por cortante directo, o por esfuerzo de apoyo.

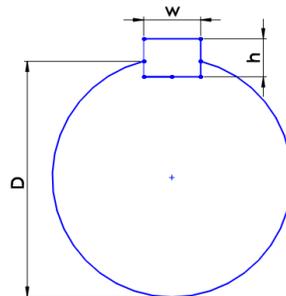


Figura 94. Dimensiones nominales de la chaveta.

La longitud máxima de una cuña está limitada por la longitud de la maza del elemento agregado, y por lo general no debe exceder 1.5 veces el diámetro del eje, para evitar la torcedura excesiva con la deflexión angular del eje. Deben evitarse los factores de seguridad excesivos en el diseño de cuñas, puesto que es deseable que la cuña falle en una situación de sobrecarga, en lugar de que lo hagan componentes más costosos (Budynas & Nisbeth J, 2012).

El diámetro del eje es $d_m = 35 \text{ mm}$ (1.378 in), las dimensiones de las chavetas se determinan mediante la siguiente tabla:

Diámetro del eje		Tamaño de la cuña		Profundidad del cuñero
Más de	Hasta (inclusive)	w	h	
$\frac{5}{16}$	$\frac{7}{16}$	$\frac{3}{32}$	$\frac{3}{32}$	$\frac{3}{64}$
$\frac{7}{16}$	$\frac{9}{16}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{3}{32}$	$\frac{3}{64}$
		$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{16}$
$\frac{9}{16}$	$\frac{7}{8}$	$\frac{3}{16}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{16}$
		$\frac{3}{16}$	$\frac{3}{16}$	$\frac{3}{32}$
$\frac{7}{8}$	$1\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{3}{16}$	$\frac{3}{32}$
		$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{8}$
$1\frac{1}{4}$	$1\frac{3}{8}$	$\frac{5}{16}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{8}$
		$\frac{5}{16}$	$\frac{5}{16}$	$\frac{5}{32}$
$1\frac{3}{8}$	$1\frac{3}{4}$	$\frac{3}{8}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{8}$
		$\frac{3}{8}$	$\frac{3}{8}$	$\frac{3}{16}$
$1\frac{3}{4}$	$2\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{8}$	$\frac{3}{16}$
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$
$2\frac{1}{4}$	$2\frac{3}{4}$	$\frac{5}{8}$	$\frac{7}{16}$	$\frac{7}{32}$
		$\frac{5}{8}$	$\frac{5}{8}$	$\frac{5}{16}$
$2\frac{3}{4}$	$3\frac{1}{4}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$
		$\frac{3}{4}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{3}{8}$

Figura 95. Dimensiones en pulgadas de algunas aplicaciones de cuñas cuadradas y rectangulares estándar.
Fuente: (Budynas & Nisbeth J, 2012).

Las dimensiones de las chavetas son:

$$w = \frac{3}{8} \text{ in} = 9.53 \text{ mm}$$

$$h = \frac{1}{4} \text{ in} = 6.35 \text{ mm}$$

$$\text{Profundidad del cuñero} = \frac{1}{8} \text{ in} = 3.18 \text{ mm}$$

Para calcular la longitud de las chavetas realizamos un análisis de resistencia enfocado en la fluencia a cortante, ya que si la chaveta llega hasta tal límite la

transmisión de potencia ya no sería segura. De acuerdo a la teoría de Von Misses (teoría de la energía de distorsión), la resistencia a la fluencia a cortante es:

$$S_{sy} = 0.577S_y$$

El material usual de la chaveta es acero laminado en frío de bajo carbono, y se fabrica de manera que sus dimensiones nunca excedan las dimensiones nominales (Budynas & Nisbeth J, 2012). Por este motivo el material elegido para fabricar la chaveta es acero AISI 1020 CD, con un $S_y = 390$ MPa (Anexo 4).

Tenemos entonces:

$$S_{sy} = 0.577(390) = 225.03 \text{ MPa}$$

La carga tangencial en el muñón es:

$$F_t = \frac{2M_g}{d_m}$$

$$F_t = \frac{2(358.13)}{(35 \times 10^{-3})} = 20.46 \text{ KN}$$

Esta carga tangencial provoca el esfuerzo cortante directo en la chaveta:

$$\tau_c = \frac{2n_c F_t}{L_c w}$$

En donde:

L_c : longitud de la chaveta.

n_c : factor de seguridad para la chaveta.

Como necesitamos que la chaveta falle antes que el muñón nos imponemos un factor de seguridad menor al factor de seguridad por fatiga y al factor de seguridad según el criterio de Von Misses, es decir $n_c = 2$. Por este motivo también hacemos que $\tau_c = S_{sy}$.

La longitud de la chaveta será:

$$L = \frac{2n_c F_t}{\tau_c w}$$

$$L = \frac{2(2)(20.46 \times 10^3)}{(225.03 \times 10^6)(9.53 \times 10^{-3})} = 0.038 \text{ m}$$

Transformando, la longitud mínima de la chaveta es:

$$L = 38 \text{ mm}$$

Utilizaremos chavetas de 50 mm de longitud, ya que estas son las dimensiones adecuadas para que se puedan sujetar a la caja reductora (Anexo 10).

Selección del mezclador.

Durante la identificación de necesidades para el producto (máquina extrusora), (sección 3.3, Tabla 14) se identificó que un requerimiento muy importante es satisfacer la necesidad de que la masa de jabón se mezcle antes de ser extruida, de manera que obtengamos un jabón homogenizado con todos sus aditivos (fragancia natural, color). La homogenización de todos los componentes del jabón es una especificación del producto (Tabla 21), por esta razón es imperativo cumplirla.

Cuando nos referimos a “mezclar” prácticamente nos referimos a un proceso para reducir la no uniformidad de un compuesto resultando en la reducción de diferencias de concentración, temperatura, volumen, etc. Esto es muy importante para los jabones de Apaika, ya que se busca que tengan buena apariencia, que inspiren confianza y que reflejen calidad.

En la sección 2.4 se habló del elemento denominado “mezclador” ubicado en la zona de dosificación o extrusión del husillo. En la Tabla 2 se presentaron varias alternativas de mezcladores con sus respectivas ventajas y desventajas. A continuación, realizamos una matriz de decisión para decidir cuál mezclador es el más

conveniente para nuestro caso de aplicación. Descartamos el mezclador tipo zorro debido a que manufactura es muy compleja.

La calificación del criterio de selección se hace en base a una escala del 1 al 5 (1 muy malo, 5 muy bueno).

Tabla 40
Matriz de decisión para la elección de un mezclador.

Problema: homogenizar todos los componentes del jabón.	Mezclador						
	Mezclador tipo:						
		De Agujas		De anillo		Saxton	
Criterios de selección.	Peso	Calf.	Eval.	Calf.	Eval.	Calf.	Eval.
	%		Pond.		Pond.		Pond.
Mínima caída de presión.	20	4	0.8	2	0.4	5	1
Lineamiento del flujo.	15	3	0,45	2	0.3	5	0.75
Limpieza del cilindro.	5	5	0,25	5	0.25	4	0.2
Fácil de manejar.	10	5	0,5	3	0.3	5	0.5
Durabilidad.	15	3	0.45	3	0.45	4	0.6
Facilidad de manufactura.	20	5	1	4	0.8	4	0.8
Menor costo.	10	5	0.5	4	0.4	3	0.3
Menor peso.	5	3	0.15	2	0.1	5	0.25
Total puntos.			4.1		3		4.4

continúa

Lugar	2	3	1
-------	---	---	---

De acuerdo a la matriz de decisión elegimos el mezclador tipo Saxton, que será maquinado en la zona de extrusión del husillo.

4.1.2. Selección de los rodamientos.

Para el apoyo I (Figura 85).

El apoyo I estará sometido a carga radial y axial. Es imprescindible que el rodamiento en esta zona sea muy confiable para evitar fallas de cualquier tipo. Por esta razón, nos imponemos una confiabilidad del 99.99% ($R_D = 0.9999$).

Las cargas radial y axial son (Figura 85):

$$F_{rI} = R_1 = 327.67 \text{ N}$$

$$F_{aI} = P = 617.38 \text{ N}$$

Del catálogo de rodamientos rígidos de bolas (Anexo 5) escogemos un rodamiento del mismo diámetro que el muñón. El rodamiento escogido es 61907, los factores de capacidad de carga básico son.

$$C_{10} = 10.8 \text{ KN}$$

$$C_0 = 7.8 \text{ KN}$$

Los factores de cálculo son:

$$k_r = 0.02$$

$$f_0 = 16$$

La relación entre la fuerza axial y radial es:

$$\frac{F_{aI}}{F_{rI}} = \frac{617.38}{327.67} = 1.88$$

La relación entre la carga axial y la capacidad de carga básica estática es

$$\frac{f_0 F_{aI}}{C_0} = \frac{(16)(617.38)}{7.8 \times 10^3} = 1.27$$

Realizamos un estudio de carga radial y axial combinadas. Determinamos los factores de carga radial equivalente mediante la siguiente tabla del catálogo:

Rodamientos de una hilera y de dos hileras Juego normal			
$f_0 F_a/C_0$	e	X	Y
0,172	0,19	0,56	2,3
0,345	0,22	0,56	1,99
0,689	0,26	0,56	1,71
1,03	0,28	0,56	1,55
1,38	0,3	0,56	1,45
2,07	0,34	0,56	1,31
3,45	0,38	0,56	1,15
5,17	0,42	0,56	1,04
6,89	0,44	0,56	1

Figura 96. Factores de cálculo para los rodamientos rígidos de bolas.
Fuente: (SKF, 2015).

Interpolamos entre los dos valores señalados:

$$e = \frac{0.26 - 0.22}{0.689 - 0.345} (1.27 - 0.345) + 0.22 = 0.33$$

$$Y = \frac{1.71 - 1.99}{0.689 - 0.345} (1.27 - 0.345) + 1.99 = 1.24$$

$$X = 0.56$$

Se comprueba que

$$\frac{F_{aI}}{F_{rI}} > e$$

De acuerdo a esto, la carga dinámica equivalente del rodamiento es:

$$P_{rb} = XF_{rI} + YF_{aI}$$

$$P_{rb} = (0.56)(327.67) + (1.92)(617.38) = 949.05 \text{ N}$$

Según el catálogo de rodamientos SKF la vida útil del rodamiento es:

$$L_{10m} = a_1 a_{SKF} \left(\frac{C_{10}}{P_{rb}} \right)^p$$

En donde:

a_1 : factor de ajuste de la vida útil para una mayor confiabilidad.

a_{SKF} : factor SKF de la modificación de la vida.

p : exponente de la ecuación de vida, para los rodamientos de bolas $p = 3$.

El factor a_1 lo obtenemos del catálogo:

Confiabilidad	Probabilidad de falla	Vida nominal SKF	Factor
%	n	L_{nm}	a_1
	%	millones de revoluciones	-
90	10	L_{10m}	1
95	5	L_{5m}	0,64
96	4	L_{4m}	0,55
97	3	L_{3m}	0,47
98	2	L_{2m}	0,37
99	1	L_{1m}	0,25

Figura 97. Valores del factor de ajuste de la vida útil.
Fuente: (SKF, 2015).

$$a_1 = 1$$

Para calcular el valor de a_{SKF} debemos definir antes otro parámetros:

La tasa de viscosidad se calcula mediante la siguiente expresión:

$$K_{SKF} = \frac{v}{v_1}$$

En donde v_1 es la viscosidad nominal del lubricante según la velocidad de giro (40 rpm) y el diámetro medio del rodamiento, que es:

$$d_{mr} = 0.5(d_r + D_r)$$

En donde d_r y D_r son los diámetros interno y externo del rodamiento, respectivamente. Consultando el Anexo 5 tenemos que:

$$d_{mr} = 0.5(35 + 55) = 45 \text{ mm}$$

La viscosidad efectiva del lubricante se determina mediante el siguiente diagrama del catálogo de rodamientos SKF:

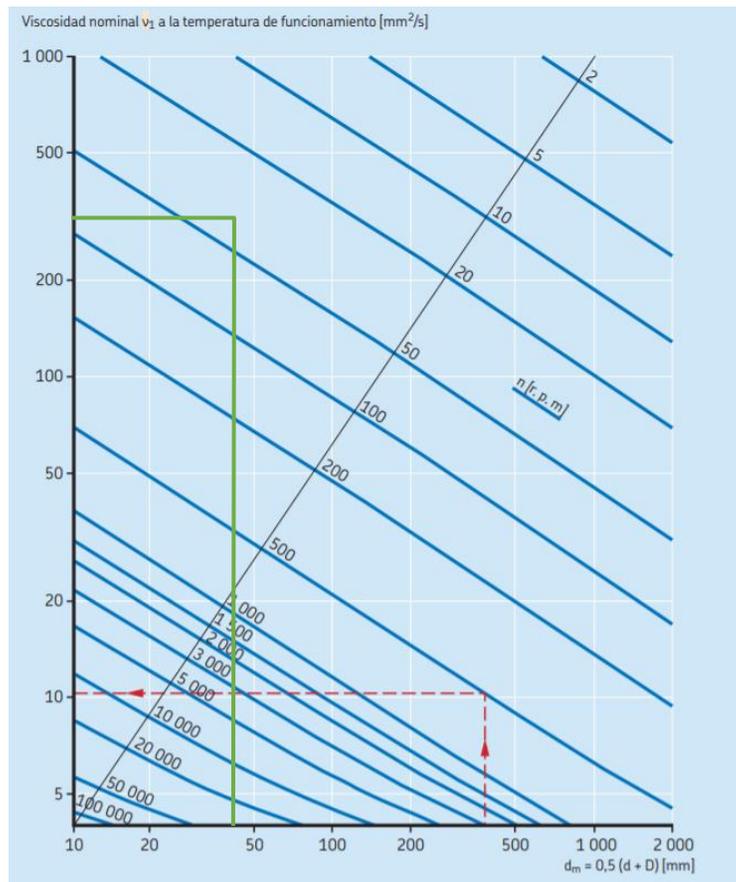


Figura 98. Diagrama para el cálculo de la viscosidad nominal a la temperatura de funcionamiento.
Fuente: (SKF, 2015).

Obtenemos que $v_1 = 350 \frac{\text{mm}^2}{\text{s}}$ aproximadamente.

La temperatura de operación será aproximadamente $40 \text{ }^\circ\text{C}$ (temperatura promedio del proceso de extrusión). La viscosidad de funcionamiento real del lubricante v se determina mediante el diagrama de la Figura 99. De acuerdo a este diagrama tenemos que se necesita un lubricante en la clase de viscosidad de la ISO VG 320, con una viscosidad real de al menos $v = 320 \frac{\text{mm}^2}{\text{s}}$.

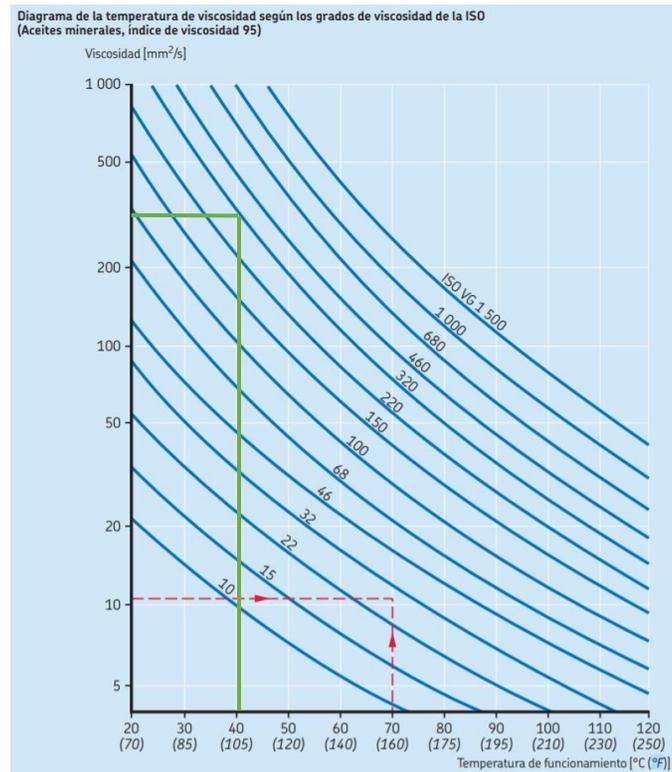


Figura 99. Diagrama de la temperatura de la viscosidad según los grados de viscosidad de la ISO.
Fuente: (SKF, 2015).

Empero, en el Anexo 7 escogemos el lubricante LGGB2, que aporta con la filosofía natural de Apaika, ya que es ecológico, biodegradable y con baja toxicidad. A la temperatura de operación indicada la viscosidad del lubricante es $\nu = 110 \frac{\text{mm}^2}{\text{s}}$.

La tasa de viscosidad es:

$$K_{\text{SKF}} = \frac{110}{350} = 0.31$$

La carga dinámica equivalente del rodamiento $P_{rb} = 872.16 \text{ N}$ se relaciona con la carga límite de fatiga. Este último se consulta en el Anexo 5.

$$\frac{P_u}{P_{rb}} = \frac{0.325 \times 10^3}{949.05} = 0.34$$

Para finalmente poder calcular el factor a_{SKF} determinamos el factor de nivel de contaminación η_c mediante la siguiente tabla:

Nivel de contaminación	Condiciones de funcionamiento	c_1	c_2
Gran limpieza	<ul style="list-style-type: none"> montaje muy limpio; sistema de sellado muy bueno en relación con las condiciones de funcionamiento; relubricación continua o en intervalos cortos rodamientos sellados lubricados con grasa de por vida, con una capacidad de sellado apropiada para las condiciones de funcionamiento 	0,0864	0,6796
Limpieza normal	<ul style="list-style-type: none"> montaje limpio; sistema de sellado bueno en relación con las condiciones de funcionamiento; relubricación de acuerdo con las especificaciones del fabricante rodamientos con placas de protección lubricados con grasa de por vida, con una capacidad de sellado apropiada para las condiciones de funcionamiento 	0,0432	1,141
Contaminación leve a típica	<ul style="list-style-type: none"> montaje limpio; capacidad de sellado moderada en relación con las condiciones de funcionamiento; relubricación de acuerdo con las especificaciones del fabricante 	0,0177	1,887 ²⁾
Contaminación severa	<ul style="list-style-type: none"> montaje en el taller; rodamiento y aplicación carente de limpieza adecuada antes del montaje; sellado ineficaz en relación con las condiciones de funcionamiento; intervalos de relubricación más largos que los recomendados por el fabricante 	0,0115	2,662
Contaminación muy severa	<ul style="list-style-type: none"> montaje en entornos contaminados; sistema de sellado inadecuado; intervalos de relubricación demasiado largos 	0,00617	4,06

Figura 100. Factores para determinar los niveles de contaminación de una aplicación lubricada con grasa de acuerdo con la norma ISO 281. Fuente: (SKF, 2015).

Utilizando la siguiente expresión:

$$\eta_c = \min\left(c_1 K_{SKF}^{0.68} d_{mr}^{0.55}, 1\right) \left[1 - \left(\frac{c_2}{\sqrt[3]{d_{mr}}}\right)\right]$$

Reemplazando obtenemos:

$$\eta_c = \min((0.0432)(0.31)^{0.68}(45)^{0.55}, 1) \left[1 - \left(\frac{1.141}{\sqrt[3]{45}} \right) \right]$$

$$\eta_c = (0.16) \left[1 - \left(\frac{1.141}{\sqrt[3]{45}} \right) \right] = 0.11$$

Mediante el factor:

$$\eta_c \frac{P_u}{P_{rb}} = (0.11)(0.34) = 0.037$$

Y la tasa de viscosidad $K_{SKF} = 0.31$, tenemos que $a_{SKF} = 0.23$ (Figura 94).

Ahora calculamos la vida útil del rodamiento:

$$L_{10m} = (1)(0.23) \left(\frac{10.8 \times 10^3}{949.05} \right)^3 = 3.39 \times 10^8 \text{ ciclos}$$

Para conocer la vida útil específica del rodamiento de acuerdo a la máquina a implementar consultamos en la tabla de valores orientativos (Figura 102). Se escoge una vida útil de:

$$L_{Dh} = 30000 \text{ horas}$$

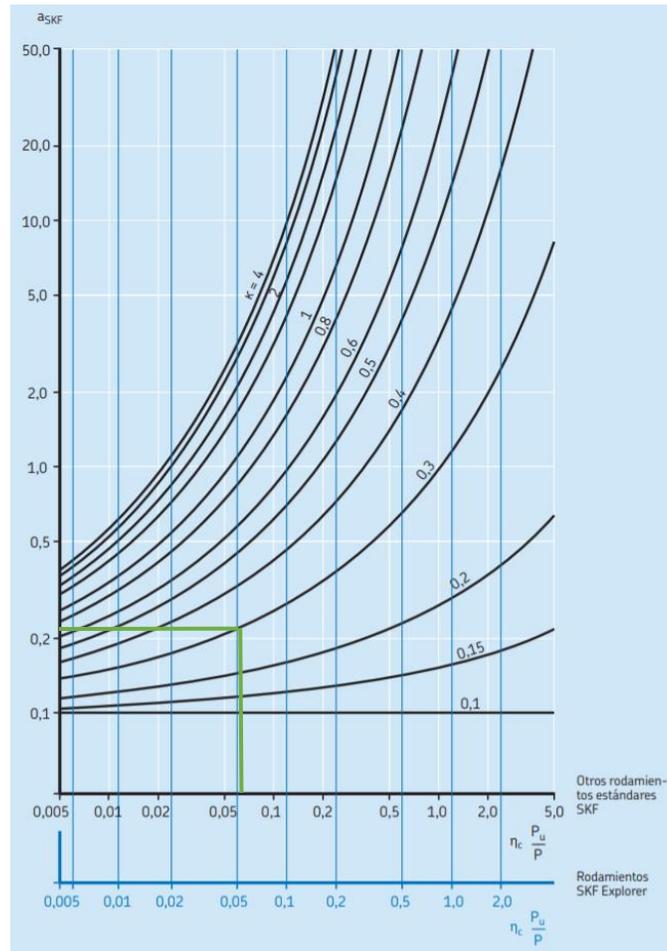


Figura 101. Factor a_{SKF} para rodamientos radiales de bolas.
Fuente: (SKF, 2015).

Tipo de máquina	Vida útil especificada Horas de funcionamiento
Electrodomésticos, máquinas agrícolas, instrumentos, equipos técnicos de uso médico	300 ... 3 000
Máquinas utilizadas intermitentemente o durante breves períodos: herramientas eléctricas portátiles, dispositivos de elevación en talleres, máquinas y equipos para la construcción	3 000 ... 8 000
Máquinas utilizadas intermitentemente o durante breves períodos donde se requiere una alta confiabilidad: ascensores (elevadores), grúas para productos embalados o eslingas para tambores, etc.	8 000 ... 12 000
Máquinas para 8 horas de trabajo diario, no siempre utilizadas al máximo: transmisiones por engranajes de uso general, motores eléctricos para uso industrial, trituradoras giratorias	10 000 ... 25 000
Máquinas para 8 horas de trabajo diario utilizando plenamente sus capacidades: herramientas mecánicas, máquinas para carpintería, máquinas para la industria de la ingeniería, grúas para materiales a granel, ventiladores, cintas transportadoras, equipos de impresión, separadores y centrifugadoras	20 000 ... 30 000
Máquinas para 24 horas de trabajo continuo: unidades de engranajes para laminadores, maquinaria eléctrica de tamaño medio, compresores, tornos de extracción para minas, bombas, maquinaria textil	40 000 ... 50 000
Maquinaria para energía eólica, incluidos los rodamientos del eje principal, de orientación, de la caja de engranajes de cambio de paso, del generador	30 000 ... 100 000
Maquinaria para abastecimiento de agua, hornos giratorios, máquinas de trenzado de cables, maquinaria de propulsión para buques de alta mar	60 000 ... 100 000
Máquinas eléctricas de gran tamaño, plantas de generación de energía, bombas para minas, ventiladores para minas, rodamientos para ejes en túnel para buques de alta mar	> 100 000

Figura 102. Valores orientativos para la vida útil de diferentes tipos de máquinas.
Fuente: (SKF, 2015).

Transformando a ciclos:

$$L_{Dm} = 60nL_{Dh}$$

$$L_{Dm} = (60)(40)(30000) = 72 \times 10^6 \text{ ciclos}$$

Validamos la elección del rodamiento utilizando la relación carga-vida-confiabilidad:

$$C_{10} = a_f F_D \left[\frac{x_D}{x_0 + (\theta - x_0)(1 - R_D)^{\frac{1}{b}}} \right]^{\frac{1}{a}}$$

Los parámetros de Weibull son: $x_0 = 0.02$, $(\theta - x_0) = 4.439$ y $b = 1.483$.

El factor de carga a_f se determina en base a la siguiente tabla:

Tipo de aplicación	Factor de carga
Engranajes de precisión	1.0-1.1
Engranajes comerciales	1.1-1.3
Aplicaciones con sellos deficientes en los cojinetes	1.2
Maquinaria sin impactos	1.0-1.2
Maquinaria con impactos ligeros	1.2-1.5
Maquinaria con impactos moderados	1.5-3.0

Figura 103. Factores de aplicación de la carga.
Fuente: (Budynas & Nisbeth J, 2012).

Escogemos $a_f = 1$.

La relación entre la vida útil del rodamiento en la máquina y la vida útil del rodamiento es:

$$x_D = \frac{L_{Dm}}{L_{10m}} = \frac{72 \times 10^6}{3.39 \times 10^8} = 0.21$$

Tenemos que $a = p = 3$ (rodamiento de bolas) y $F_D = P_{rb} = 554.40 \text{ N}$.

Reemplazando todos estos datos:

$$C_{10} = (1)(949.05) \left[\frac{0.21}{0.02 + (4.439)(1 - 0.9999)^{\frac{1}{1.483}}} \right]^{\frac{1}{3}} = 1.85 \text{ kN}$$

Como la capacidad de carga básica dinámica esperada es menor que la capacidad de carga básica dinámica del catálogo se concluye que el rodamiento elegido para el apoyo I resistirá las cargas implicadas en el proceso de extrusión. Con esto validamos la elección de dicho rodamiento.

Para el apoyo II.

Debido a que apoyo II soporta únicamente una carga radial $R_2 = 203.24 \text{ N}$, se selecciona el mismo rodamiento que para el apoyo I, ya que es evidente que resistirá la carga mencionada y además favorecerá el montaje simétrico.

Por lo tanto, el rodamiento seleccionado para el apoyo II es 61907. En el Anexo 8 se muestran las tolerancias de estos rodamientos.

A continuación, se determina el ajuste de los rodamientos con el muñón del husillo:

Condiciones		Rodamientos de bolas		Rodamientos cilíndricos Rodamientos cónicos		Rodamientos de rodillos esféricos		Tipo de ajuste del eje	Observaciones
		Diámetro del eje (mm)							
		Más de	Debajo de	Más de	Debajo de	Más de	Debajo de		
Rodamientos con diámetro interior cilíndrico (Clases 0, 6X y 6)									
Carga relativa del anillo interior o carga de dirección indeterminada	Carga liviana o fluctuante ¹	—	18	—	—	—	—	h5 js6 k6 m6	Cuando se requiera mayor precisión, los ajustes js 5, k5 y m5 pueden ser sustituidos por js6, k6 y m6.
		18	100	—	40	—	—		
	100	200	40	140	—	—			
	—	—	140	200	—	—			
Carga normal ¹	—	18	—	—	—	—	—	js5	Alteraciones de los juegos interiores para acomodar los ajustes, no son consideradas con rodamientos de una hilera de bolas a contacto angular ni de rodillos cónicos, por lo tanto, k5 y m5 pueden ser sustituidos por k6 y m6.
	18	100	—	40	—	40	k5		
	100	140	40	100	40	65	m5		
	140	200	100	140	65	100	m6		
	200	280	140	200	100	140	n6		
—	—	200	400	140	280	p6			
—	—	—	—	280	500	r6			
Carga pesada o de impacto ¹	—	—	50	140	50	100	n6	Deben usarse rodamientos con juego interno mayor del normal (CN).	
	—	—	140	200	100	140	p6		
	—	—	200	—	140	200	r6		
Carga estacionaria del anillo interior	Se requiere desplazamiento axial del anillo interior	Todos los diámetros de eje						g6	Cuando se requiere mayor precisión, debe usarse g5. Para rodamientos grandes, f6 bastará para facilitar el movimiento.
	No se requiere desplazamiento axial del anillo interior	Todos los diámetros de eje						h6	Cuando se requiera mayor precisión, debe usarse h5.
Carga axial centrada	Todos los diámetros de eje						js6	Generalmente, los anillos interiores y los ejes, no se ajustan con interferencia.	
Rodamientos con diámetro interior cónico (clase 0)(con manguitos de fijación / desmontaje)									
Todas las cargas		Todos los diámetros de eje						h9/IT5 ²	h10/IT7 ² bastará para ejes transmisores de potencia.

Figura 104. Ajustes recomendados para los rodamientos SKF de acuerdo al diámetro del eje.
Fuente: (SKF, 2015).

El ajuste recomendado para el muñón con respecto a los rodamientos es **k5**. En el Anexo 9 se muestran las tolerancias del eje para el ajuste resultante.

4.1.3. Selección de la caja reductora.

Durante la etapa de selección del concepto (sección 3.6) se determinó que la mejor manera de reducir la velocidad rotatoria del motor es mediante una caja de engranes (Tabla 34). Esta caja reductora también permitirá un aumento del torque, lo que se traduce en una buena transmisión de la potencia. Esto beneficiará notoriamente el proceso de extrusión, ya que el motorreductor (acople entre el motor y la caja

reductora) brindará el trabajo rotacional suficiente para comprimir y empujar el jabón a través de la cabeza perfiladora o boquilla de extrusión.

Anteriormente se calculó la potencia requerida y se determinó que se necesita una potencia de motor igual a 2 HP. La velocidad de rotación del husillo se definió en 40 rpm. En base a estos parámetros es necesario una caja reductora para motor de 2HP y, suponiendo que la velocidad nominal del motor es 1750 rpm (4 polos, más común en el mercado), relación de reducción 40:1.

Del catálogo de la marca Motive® (Anexo 10) se elige el reductor sinfín corona BOX 090, con una relación i de 40:1.

Los reductores sinfín corona de esta marca poseen carcasa de fundición de aluminio diseñados para tener una buena capacidad de disipación térmica y excelente resistencia estructural. Están provistos de rodamientos de rodillos cónicos, tanto en la entrada como en la salida para mejorar la resistencia a las cargas axiales. Además, poseen dos nilos que mantienen los rodamientos lubricados incluso cuando no están en contacto con el aceite.

El reductor BOX 090 se suministra ya lubricado con aceite sintético de por vida y no requiere ningún mantenimiento (detalles en el Anexo 10). A fin de mejorar el nivel de ruido, rendimiento y duración, el eje tornillo sinfín está fabricado en acero tratado, mientras que la corona está fabricada en aleación de bronce ZCuSn12. El eje agujero

estándar de la rueda helicoidal es de hierro fundido esferoidal, una aleación que ofrece un rendimiento superior al hierro fundido gris y es adecuado también para aplicaciones más duras.

Un factor inherente en la selección de los reductores sinfín corona es el rendimiento η , definido como la relación entre la potencia mecánica transmisible por el eje de salida y la potencia transmitida al eje de entrada. Se distinguen dos tipos de rendimiento: el **rendimiento dinámico (η_d)**, que es el valor del rendimiento después de unas pocas horas de rodaje, a partir de las cuales el rendimiento se mantiene casi constante. Y el **rendimiento estático (η_s)**, que es el rendimiento que se obtiene durante el arranque.

En la siguiente figura se muestra, aproximadamente, el tiempo requerido para alcanzar el valor máximo del rendimiento dinámico.

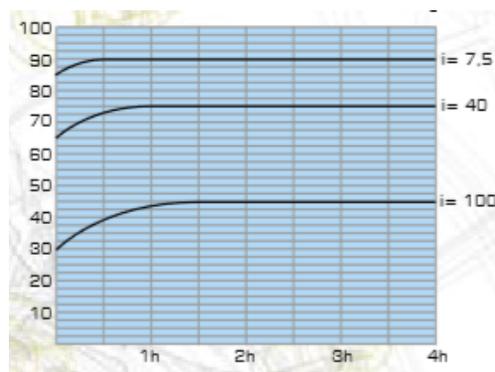


Figura 105. Tiempo aproximado para alcanzar el rendimiento dinámico.
Fuente: (Motive, 2018).

Vemos que para nuestro caso las condiciones para el rendimiento dinámico se alcanzaran aproximadamente en la primera hora de operación. De acuerdo al Anexo 10 el valor del rendimiento dinámico para el BOX 090 es $\eta_d = 0.74$. Con esto comprobamos el valor de momento de giro transmisible de acuerdo a Motive (2018):

$$M_g = 9550 \frac{N}{n} \eta_d$$

$$M_g = 9550 \frac{1.5}{40} (0.74) = 265.01 \text{ Nm}$$

Concluimos que el reductor sinfín corona BOX 090 es el adecuado porque cumple con las especificaciones de torque (Tabla 21).

La posición de montaje más adecuada de acuerdo al prototipo de máquina extrusora desarrollado en la prueba del concepto (sección 3.7) es la posición B3 (Anexo 10).

4.1.4. Diseño del cilindro o barril de extrusión.

El cilindro es el elemento que rodea al husillo, por ello tiene un diámetro interno apenas mayor definido por la holgura ($\delta = 0.1 \text{ mm}$). Debe ser bastante sólido como para

soportar altas presiones, resistente a los fenómenos térmicos y con buena características de resistencia al desgaste y a la corrosión (Savgorodny, 1973).

Ya que el cilindro estará permanentemente en contacto con el jabón, es importante que el material del cual se lo fabrique sea químicamente inerte. Por esta razón se elige el mismo material que para el husillo (acero inoxidable AISI 304).

Los esfuerzos que soporta se deben a la presión que ejerce el material en sus paredes internas. Es decir, se comporta como un cilindro presurizado de pared delgada, como se muestra en la siguiente figura:

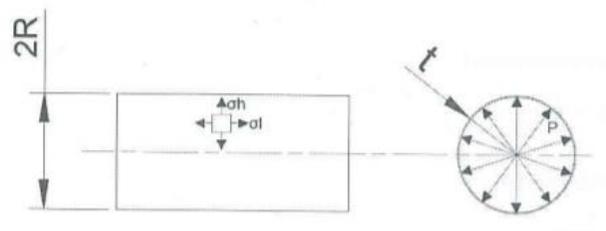


Figura 106. Esfuerzos en un cilindro presurizado de pared delgada.

La longitud del cilindro es igual a la longitud del husillo sumado el espacio para el plato rompedor ($L = 530$ mm) y su diámetro interno ya se definió anteriormente ($D_c = 76.4$ mm). De acuerdo a la disponibilidad en el mercado nos planteamos un espesor de $t_c = 5.49$ mm.

Como:

$$t_c < \frac{D_c}{10}$$

Se comprueba que el cilindro es de pared delgada. La máxima presión se desarrolla en la zona de extrusión y en la cabeza perfiladora. A continuación, analizamos dicha zona:

El esfuerzo circunferencial máximo en el cilindro es:

$$\sigma_t = \frac{\Delta P(D_c + t_c)}{2t_c}$$

$$\sigma_t = \frac{(0.31)(76.4 + 5.49)}{2(5.49)} = 2.31 \text{ MPa}$$

El esfuerzo longitudinal es:

$$\sigma_l = \frac{\Delta P D_c}{4t_c}$$

$$\sigma_l = \frac{(0.31)(76.4)}{4(5.49)} = 1.08 \text{ MPa}$$

De acuerdo a la teoría de los esfuerzos principales tenemos:

$$\sigma_1 = 2.31 \text{ MPa}$$

$$\sigma_2 = 1.08 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\text{cmax}} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = 0.62 \text{ MPa}$$

Gráficamente esto es:

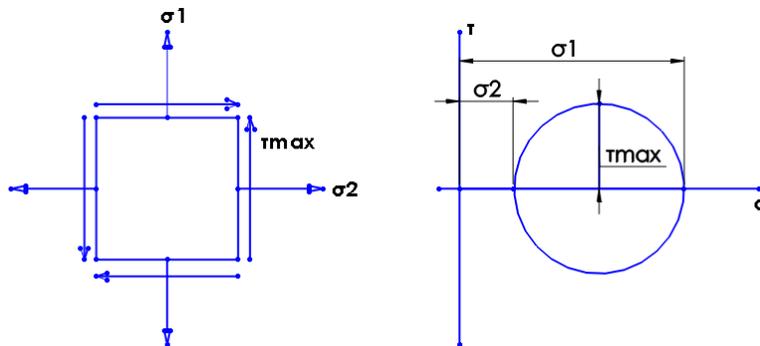


Figura 107. Estado de esfuerzos y círculo de Mohr del cilindro de extrusión.

Para conocer si el cilindro resistirá estos esfuerzos nos planteamos una postura conservadora y lo comprobamos mediante la teoría del esfuerzo cortante máximo (teoría de Tresca). Calculamos el factor de seguridad del cilindro como sigue:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{S_y}{n_{sc}}$$

En donde $S_y = 207$ MPa (Anexo 3).

$$2.31 - 1.08 = \frac{207}{n_{sc}}$$

$$n_{sc} = 167.78$$

Se comprueba con éxito el diseño del cilindro y se conoce que resistirá con creces los esfuerzos involucrados.

Diseño de la garganta de alimentación.

Se denomina garganta de alimentación al segmento de cilindro que se sitúa justo debajo de la tolva de alimentación. Utilizaremos una garganta circular debido a que la tolva tendrá esta misma forma (sección 3.7). Nos impondremos un diámetro de la garganta de $0.8D$.

El material que se encuentra en la tolva puede ingresar al husillo gracias a la garganta de alimentación. Un esquema general de esta se puede ver claramente en la

Figura 12. Por otro lado, un esquema de la garganta de alimentación para nuestra máquina extrusora se muestra a continuación:

$$d_g = 2.50 \text{ in} = 63.50 \text{ mm}$$

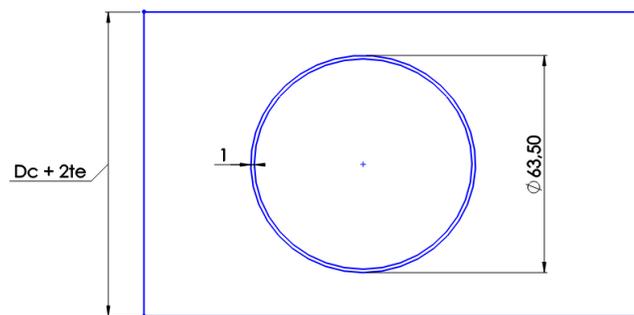


Figura 108. Esquema de la vista superior de la garganta de alimentación.

Debido a que la garganta de alimentación es un segmento de cilindro y a que estará en permanente contacto con el jabón, se fabricará a partir del mismo material (acero inoxidable AISI 304).

4.1.5. Diseño de la Tolva de alimentación.

La tolva de alimentación es el recipiente que almacena temporalmente el material y lo guía hacia el husillo de extrusión. En la sección 2.3.4 ya se definió que las tolvas con sección circular brindan un mayor flujo de material, esto se comprobó conceptualmente en la sección 3.6.2 (Tabla 35) y por este motivo se eligió una tolva de

esas características en la sección 3.7.6, pues resulta más práctica que una de sección cuadrada.

En las especificaciones del producto (Tabla 21) se definió que el volumen de la tolva debe ser mínimo de 8 litros (nos impondremos el triple de volumen, es decir, $24 \times 10^6 \text{ mm}^3$). En base a ello diseñamos la tolva con una etapa cilíndrica y otra cónica, siendo que la altura de la primera es la mitad de la segunda.

De acuerdo a esto tenemos:

Volumen de la etapa cilíndrica:

$$V_{cl} = \frac{\pi d_{cl}^2 h_{cl}}{4}$$

En donde:

d_{cl} : diámetro del cilindro.

h_{cl} : altura de cilindro.

Volumen de la etapa cónica:

$$V_{co} = \frac{1}{12} \pi h_{co} (d_{co1}^2 + d_{co2}^2 + d_{co1}d_{co2})$$

En donde:

h_{co} : altura del cono truncado. Para nuestro caso $h_{co} = 2h_{cl}$

d_{co1} : diámetro mayor del cono truncado.

d_{co2} : diámetro menor del cono truncado.

Como el diámetro menor del cono truncado debe coincidir con las dimensiones de la garganta de alimentación (Figura 108) se sabe que:

$$d_{co2} = 63.50 - 2(1) = 61.50 \text{ mm}$$

Para facilitar el diseño nos imponemos un diámetro mayor de cono truncado igual a:

$$d_{co1} = 8d_{co2}$$

$$d_{co1} = 8(50) = 400 \text{ mm}$$

Es evidente que $d_{cl} = d_{co1}$, por lo tanto tenemos:

$$V_{\text{Tolva}} = V_{\text{cl}} + V_{\text{co}}$$

$$V_{\text{Tolva}} = \frac{\pi d_{\text{co1}}^2 h_{\text{cl}}}{4} + \frac{1}{12} \pi (2h_{\text{cl}}) (d_{\text{co1}}^2 + d_{\text{co2}}^2 + d_{\text{co1}} d_{\text{co2}})$$

Necesitamos conocer la altura de cada etapa para cumplir con el volumen de 8 L, despejando la altura de la ecuación:

$$h_{\text{cl}} = \frac{V_{\text{Tolva}}}{\frac{\pi d_{\text{co1}}^2}{4} + \frac{1}{6} \pi (d_{\text{co1}}^2 + d_{\text{co2}}^2 + d_{\text{co1}} d_{\text{co2}})}$$

$$h_{\text{cl}} = \frac{24 \times 10^6}{\frac{\pi(400)^2}{4} + \frac{1}{6} \pi((400)^2 + (61.50)^2 + (400)(61.50))}$$

$$h_{\text{cl}} = 107 \text{ mm}$$

Para fines de manufactura tomaremos el valor de $h_{\text{cl}} = 110 \text{ mm}$. La altura de la etapa cónica es:

$$h_{\text{co}} = 2(110) = 220 \text{ mm}$$

Un esquema de la tolva de alimentación se muestra a continuación:

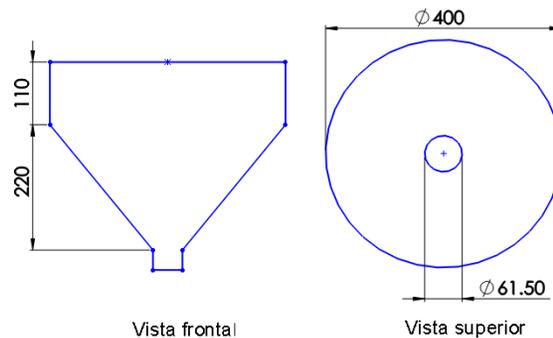


Figura 109. Diseño de la tolva de alimentación.

Como la tolva estará en permanente contacto con el jabón se fabricará de acero inoxidable AISI 304.

4.1.6. Diseño del plato rompedor.

El plato rompedor es un disco delgado de metal que se encuentra en el extremo del cilindro. Debe tener un buen espesor, de modo que pueda evitar el contacto entre el cilindro y la cabeza perfiladora, pero aun así asegurar un ajuste hermético (Gutiérrez Morales & Bornacelli Castillo, 2008). Para que esto se cumpla el diámetro del plato debe ser el mismo que el diámetro interior del cilindro (76.4 mm).

Durante el cálculo de la constante de la cabeza perfiladora, para conocer la capacidad de producción de la máquina extrusora, se definió la geometría del plato rompedor. Tiene un espesor de 10 mm y cuenta con 30 agujeros de 5 mm de diámetro.

Un esquema del plato rompedor se muestra a continuación:

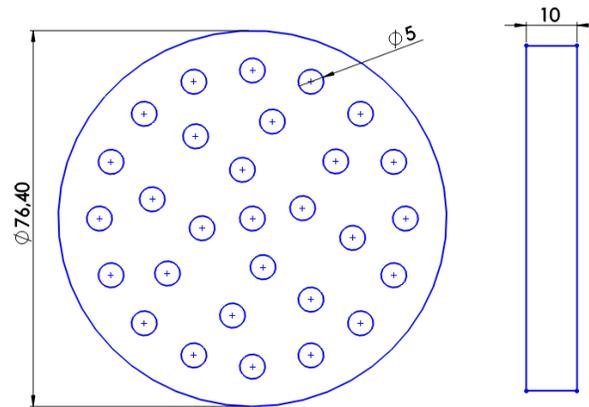


Figura 110. Diseño del plato rompedor.

Como el plato rompedor estará en contacto con el jabón el material que se elige para su fabricación es acero inoxidable AISI 304 (Anexo 2 y Anexo 3).

El plato rompedor estará expuesto a esfuerzo de compresión. A continuación, comprobamos su resistencia:

La fuerza que actúa sobre el plato es la fuerza axial P . Entonces tenemos:

$$\sigma_{\text{cpr}} = \frac{4P}{\pi D_c^2}$$

$$\sigma_{cpr} = \frac{4(617.38)}{\pi(76.4)^2} = 0.14 \text{ MPa}$$

Un esfuerzo muy bajo, mucho menor que el límite de rotura, por lo tanto, se verifica la validez del diseño y se concluye que el plato rompedor resistirá los esfuerzos de la extrusión.

4.1.7. Diseño del soporte estructural o bastidor.

El soporte estructural o bastidor es un elemento fundamental de la máquina extrusora. Como su nombre lo indica, servirá de soporte para todos los elementos de la máquina, por lo que debe ser resistente y lo suficientemente rígido como para no deformarse con este peso (aproximadamente 50 kg). También debe ser lo suficientemente pesado como para asegurar un buen centro de gravedad y evitar que la máquina se vuelque. Además, debido a que las condiciones ambientales en las que trabajará la extrusora aseguran temperaturas y humedad elevadas, se deberá elegir un material que soporte estas condiciones.

De acuerdo a esto se ha decidido fabricar el bastidor con tubo estructural cuadrado galvanizado de 40 mm con espesor de 2 mm (Anexo 15). El material empleado para la fabricación de estos tubos es acero SAE1008 (Anexo 16) con acabado galvanizado, lo que lo hace resistente a la corrosión, ideal para el ambiente de trabajo de la extrusora.

Para la fabricación del bastidor se debe tomar en cuenta su altura, la cual debe asegurar que una persona parada pueda manipular la máquina cómodamente. Otro factor importante es la longitud, ya que el bastidor debe albergar al husillo, cabezal y boquilla. Se propone una altura de 850 mm y una longitud de 1000 mm. Se deben instalar dos tubos que sirvan como soporte del motor y uno más para anclar el soporte del cilindro extrusor.

Además, habrá que instalar dos platinas (Anexo 17) de acero estructural ASTM A36 (Anexo 14) que servirán como soporte para la caja eléctrica. En la Figura 103 se muestra un diagrama de la apariencia del bastidor.

Para agregar mayor elegancia y funcionalidad al bastidor conviene agregar dos tableros. El primero en el extremo superior y el segundo aproximadamente a la mitad de la estructura, a modo de repisa para guardar elementos secundarios durante el proceso de extrusión. Para soportar este tablero se instalarán dos ángulos (Anexo 19) de acero estructural ASTM A36 (Anexo 18).

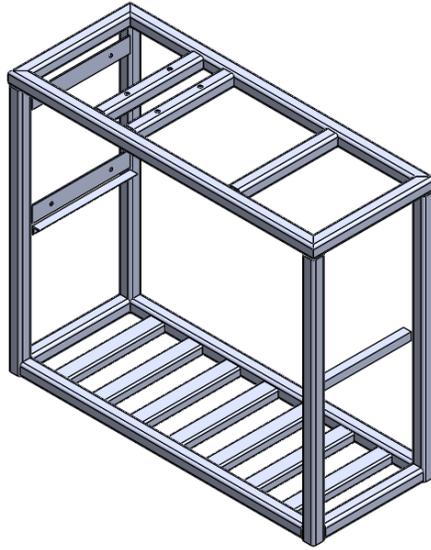


Figura 111. Soporte estructural o bastidor.

Los tableros serán fabricados del mismo material que la tolva de alimentación (acero inoxidable AISI 304), lo que asegurará su resistencia ante la corrosión. Un diagrama del bastidor con los dos tableros instalados se muestra a continuación:

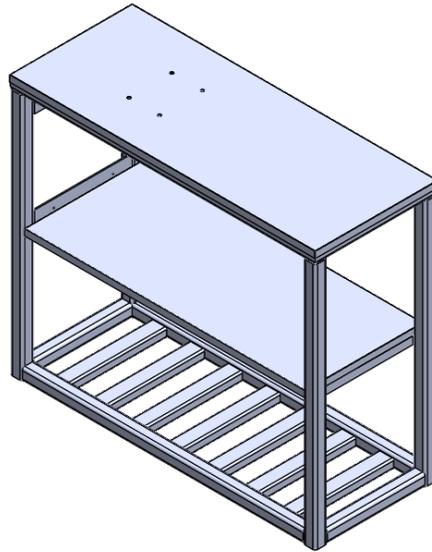


Figura 112. Soporte estructural o bastidor con tableros.

Diseño de la junta emperrada para sujetar el motorreductor al bastidor.

Para sujetar el motorreductor al bastidor es necesario una unión emperrada compuesta por 4 pernos de acero grado UNC SAE 8 (Anexo 10 y Anexo 11) de $\frac{3}{8}$ in por 2.75 in de longitud, como se muestra a continuación:

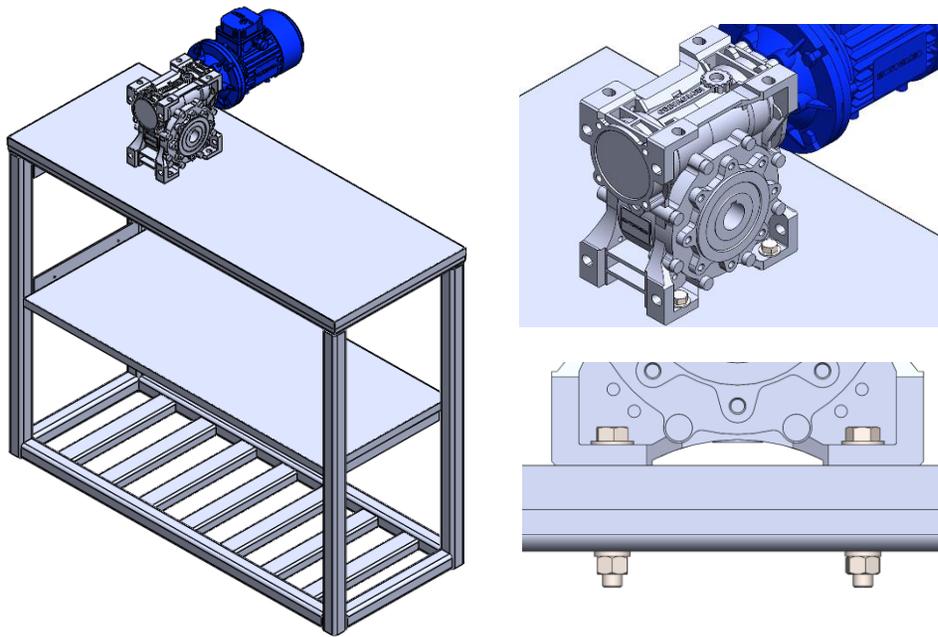


Figura 113. Junta empernada entre el motorreductor y el bastidor.

De acuerdo a Budynas y Nisbett (2008) la rigidez del perno se determina mediante la siguiente expresión:

$$k_b = \frac{A_d A_t E}{A_d l_t + A_t l_d}$$

En donde

A_t : área de esfuerzo sometida a tensión.

l_t : longitud de la parte roscada de agarre.

A_d : área del diámetro mayor del sujetador.

l_d : longitud de la parte sin rosca en agarre.

Se utilizará una arandela plana de acero (Anexo 13) debajo de la cabeza del perno y una arandela de presión debajo de la tuerca (Anexo 14). De esta manera tenemos que

$$l_d = 1.65 + 2.00 = 3.65 \text{ mm}$$

$$l_t = 2.80 + 11.00 + 2.00 = 15.80 \text{ mm}$$

Consultando el Anexo 12 sabemos que:

$$A_t = 0.0775 \text{ in}^2 = 50 \text{ mm}^2$$

$$A_d = \frac{\pi(0.3750)^2}{4} = 0.11 \text{ in}^2 = 71.26 \text{ mm}^2$$

Por lo tanto, la rigidez del perno es:

$$k_b = \frac{(71.26)(50)(207 \times 10^3)}{(71.26)(14.80) + (50)(3.65)} = 5.64 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

Budynas y Nisbett (2008) determinan la rigidez de los elementos mediante la siguiente expresión:

$$\frac{1}{k_m} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} + \dots + \frac{1}{k_i}$$

En donde

$$k_i = \frac{0.5774\pi E d}{\ln \left[\frac{(1.155t + D - d)(D + d)}{(1.155t + D + d)(D - d)} \right]}$$

En donde

d: diámetro nominal del perno.

t: espesor del elemento.

D: diámetro de la arandela.

En la arandela plana de acero (Anexo 13):

$$k_1 = \frac{0.5774\pi(207 \times 10^3)(9.525)}{\ln \left[\frac{(1.155(1.65) + 20.625 - 9.525)(20.625 + 9.525)}{(1.155(1.65) + 20.625 + 9.525)(20.625 - 9.525)} \right]} = 3.68 \times 10^7 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

En el tubo estructural cuadrado del bastidor (Anexo 15):

$$k_2 = \frac{0.5774\pi(207 \times 10^3)(9.525)}{\ln \left[\frac{(1.155(2) + 20.625 - 9.525)(20.625 + 9.525)}{(1.155(2) + 20.625 + 9.525)(20.625 - 9.525)} \right]} = 3.10 \times 10^7 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

En la arandela de presión, la cual tiene un diámetro equivalente al ancho de la tuerca (Anexo 14):

$$k_3 = \frac{0.5774\pi(207 \times 10^3)(9.525)}{\ln \left[\frac{(1.155(2.80) + 14.287 - 9.525)(14.287 + 9.525)}{(1.155(2.80) + 14.287 + 9.525)(14.287 - 9.525)} \right]} = 9.15 \times 10^6 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

En la sección 4.1.3. se indica que la carcasa del motorreductor (Anexo 10) está fabricada en fundición de aluminio. Por lo tanto, para el motorreductor tenemos:

$$k_4 = \frac{0.5774\pi(71 \times 10^3)(9.525)}{\ln \left[\frac{(1.155(11) + 14.287 - 9.525)(14.287 + 9.525)}{(1.155(11) + 14.287 + 9.525)(14.287 - 9.525)} \right]} = 1.41 \times 10^6 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

En el tubo estructural cuadrado del bastidor (Anexo 15):

$$k_5 = \frac{0.5774\pi(207 \times 10^3)(9.525)}{\ln \left[\frac{(1.155(2.80) + 14.287 - 9.525)(14.287 + 9.525)}{(1.155(2.80) + 14.287 + 9.525)(14.287 - 9.525)} \right]} = 1.18 \times 10^7 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

La rigidez total de los elementos es:

$$k_m = \left(\frac{1}{3.68 \times 10^7} + \frac{1}{3.10 \times 10^7} + \frac{1}{9.15 \times 10^6} + \frac{1}{1.41 \times 10^6} + \frac{1}{1.18 \times 10^7} \right)^{-1} = 1.04 \times 10^6 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

A continuación, comprobamos la resistencia de la junta empernada de acuerdo a Budynas y Nisbett (2008):

La constante de rigidez es:

$$C = \frac{k_b}{k_b + k_m} = \frac{5.64 \times 10^5}{5.64 \times 10^5 + 1.04 \times 10^6} = 0.35$$

La precarga recomendada es:

$$F_i = 0.75A_t S_p$$

En donde la resistencia del perno se consulta en el Anexo 11 y es igual a $S_p = 120 \text{ kpsi}$ ($S_p = 827.37 \text{ MPa}$). Consultando adicionalmente el Anexo 12 tenemos:

$$F_i = 0.75(50)(827.37) = 31.03 \text{ kN}$$

Ahora bien, la junta empernada tenderá a ser separada por acción del peso del motor (Anexo 20), el cual es igual a:

$$P = 18.5 * 9.8 = 181.42 \text{ N}$$

El diagrama de cuerpo libre de la junta se muestra a continuación:

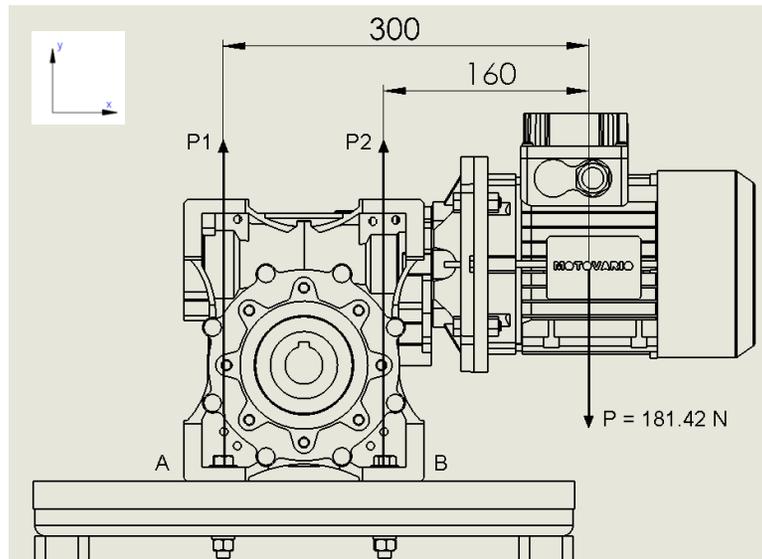


Figura 114. Diagrama de cuerpo libre de la junta emperrada.

Calculamos las reacciones P1 y P2:

$$P_2 = -\frac{(181.42)(300)}{140} = -388.76 \text{ N}$$

$$P_1 = 181.42 + 388.76 = 570.18 \text{ N}$$

Evidentemente A es la zona más crítica, en donde se presenta una reacción de 570.18 N. Este valor se debe dividir para el número de pernos que soportan la carga, en este caso son 2 los pernos involucrados.

$$P_p = \frac{P_1}{2} = \frac{576.2.18}{2} = 285.10 \text{ N}$$

Calculamos la parte de P_p tomada por el perno y por los elementos.

$$P_b = CP_p = (0.35)(285.10) = 100.40 \text{ N}$$

$$P_m = (1 - C)P_p = (0.648)(285.10) = 184.76.2 \text{ N}$$

Calculamos la carga resultante en el perno y en los elementos.

$$F_b = P_b + F_i = 100.40 + 31.03 \times 10^3 = 31.13 \text{ kN}$$

$$F_m = P_m + F_i = 184.76.2 + 31.03 \times 10^3 = 31.21 \text{ kN}$$

Calculamos el esfuerzo de precarga:

$$\sigma_i = \frac{F_i}{A_t} = \frac{31.03 \times 10^3}{50} = 620.53 \text{ MPa}$$

El esfuerzo de carga de servicio en el perno:

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_t} = \frac{31.13 \times 10^3}{50} = 622.54 \text{ MPa}$$

El esfuerzo de carga de servicio en los elementos:

$$\sigma_m = \frac{F_m}{A_t} = \frac{31.21 \times 10^3}{50} = 624.22 \text{ MPa}$$

Debido a que la resistencia de prueba mínima SAE del perno es $S_p = 120 \text{ kpsi}$ ($S_p = 827.37 \text{ MPa}$) se comprueba que los pernos resistirán los esfuerzos implicados, ya que el de precarga y carga de servicio son, respectivamente, 25% y 24.76% menores que este en la zona A.

El factor de carga del perno es:

$$n = \frac{S_p A_t - F_i}{P_b} = \frac{(827.37)(50) - 31.03 \times 10^3}{100.40} = 103.02$$

El factor de carga de los elementos de la junta es:

$$n_0 = \frac{F_i}{P_m} = \frac{31.03 \times 10^3}{184.76.2} = 167.98$$

4.2. DISEÑO E INGENIERÍA ASISTIDOS POR COMPUTADOR (CAD/CAE).

Una vez diseñados todos los componentes de la extrusora (sección 4.1) basándonos en criterios de diseñador, las especificaciones del producto (Tabla 21) y la generación, selección y prueba del concepto (sección 3.5, sección 3.6 y sección 3.7), damos paso al diseño del prototipo final de la máquina. Para ello utilizamos un software CAD que nos ayudará a emular un modelo de aspecto físico.

Seguidamente comprobaremos el diseño mecánico de los componentes con ayuda de un software CAE. Los planos de los componentes de la máquina se encuentran en la sección PLANOS, señalando debidamente sus dimensiones y demás características.

4.2.1. Husillo de extrusión.

El diseño del husillo de extrusión en la sección 4.1.1. propone un husillo con el siguiente aspecto:

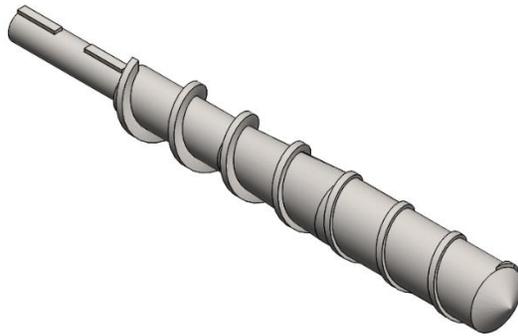


Figura 115. Husillo de extrusión.

No se incluye el mezclador Saxton en los dos últimos canales de la zona de extrusión.

Esfuerzo total.

Utilizando el software CAE y aplicando las características del diseño del husillo se obtuvo lo siguiente:

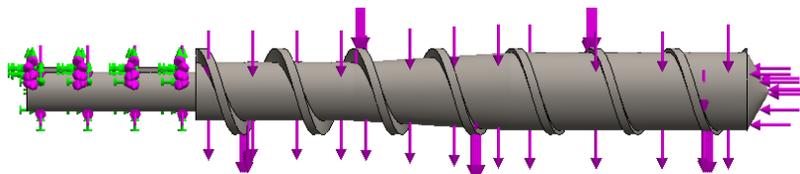


Figura 116. Cargas en el husillo de extrusión.

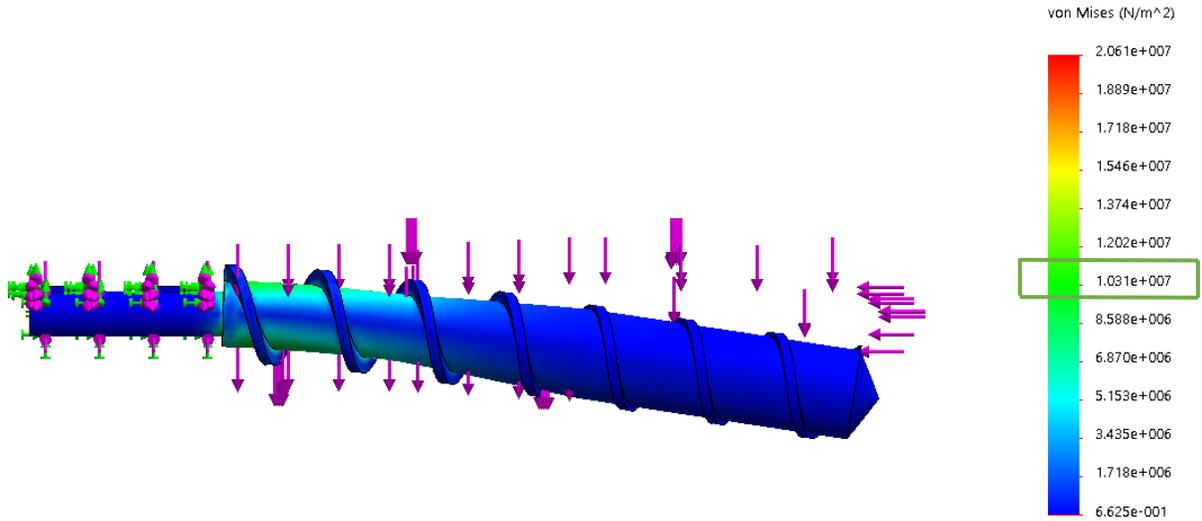


Figura 117. Esfuerzo total en husillo de extrusión.

El esfuerzo total máximo se producirá en el cambio de sección entre el muñón y el husillo. Observamos que el máximo valor que se alcanza en esta zona (zona en verde) es 10.31 MPa. El cual es muy próximo al valor teórico calculado en la sección 4.1.1. (10.55 MPa). Comprobando así, una vez más, la validez del diseño.

Flecha máxima.

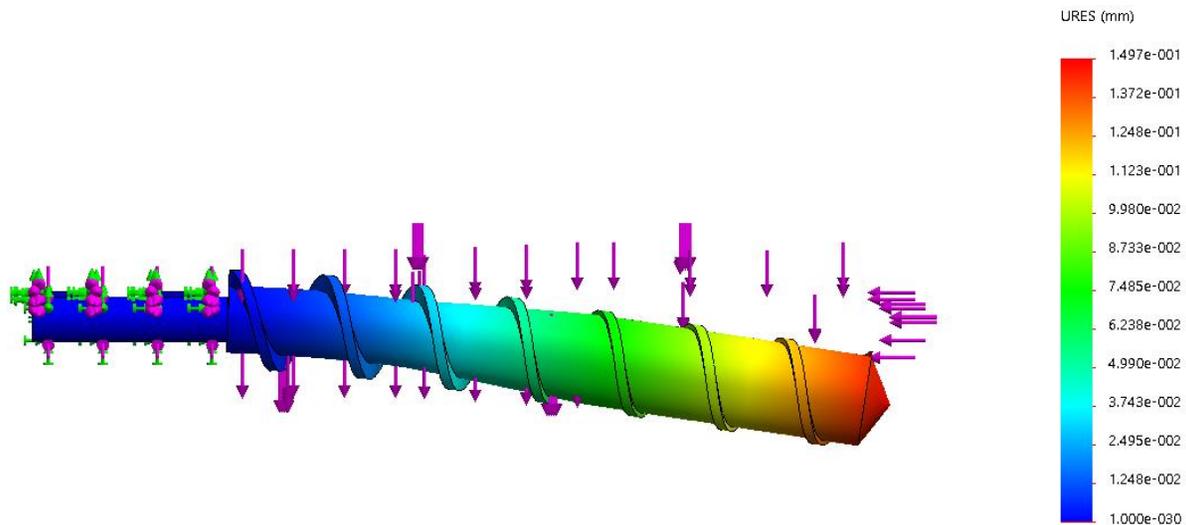


Figura 118. Flecha máxima de husillo de extrusión.

Observamos que el valor máximo de la flecha es mayor al calculado teóricamente. Sin embargo, aun así, el valor es aceptable ya que no interviene en el proceso de extrusión.

De acuerdo al software la masa total del husillo (incluido el muñón) es de 13.93 kg.

4.2.2. Cilindro o barril de extrusión.

La sección 4.1.4. diseña un barril como se muestra a continuación:

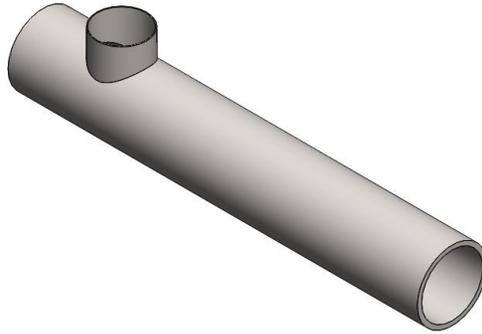


Figura 119. Barril de extrusión.

Esfuerzo total.

Colocamos las cargas de acuerdo a la sección 4.1.4.

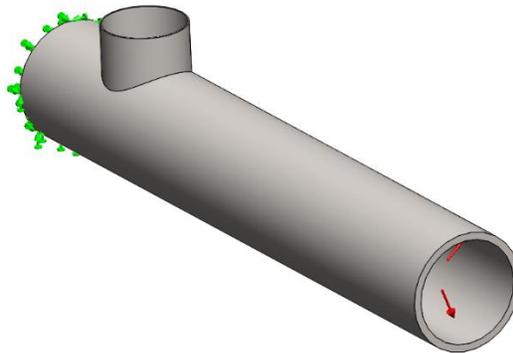


Figura 120. Cargas en el barril de extrusión.

Las flechas rojas indican la presión ejercida por el jabón sobre la superficie interna del barril. Recordemos que los esfuerzos longitudinal y circunferencial son

1.08 MPa y 2.31 MPa, respectivamente. Lo que da un esfuerzo total, de acuerdo al criterio de Von Misses, de:

$$\sigma_{TVM} = \sqrt{(1.08)^2 + 3(2.31)^2} = 4.14 \text{ MPa}$$

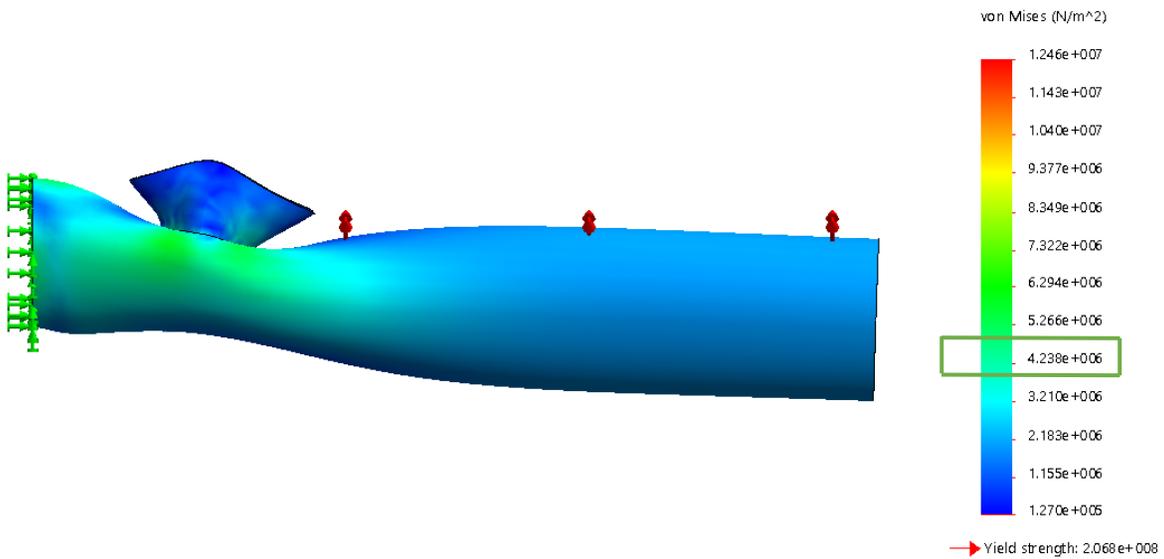


Figura 121. Esfuerzo total en el barril de extrusión.

Observamos que el valor del esfuerzo total calculado mediante el software (4.24 MPa) se aproxima mucho al valor teórico (4.14 MPa). De esta manera queda comprobada la validez del diseño.

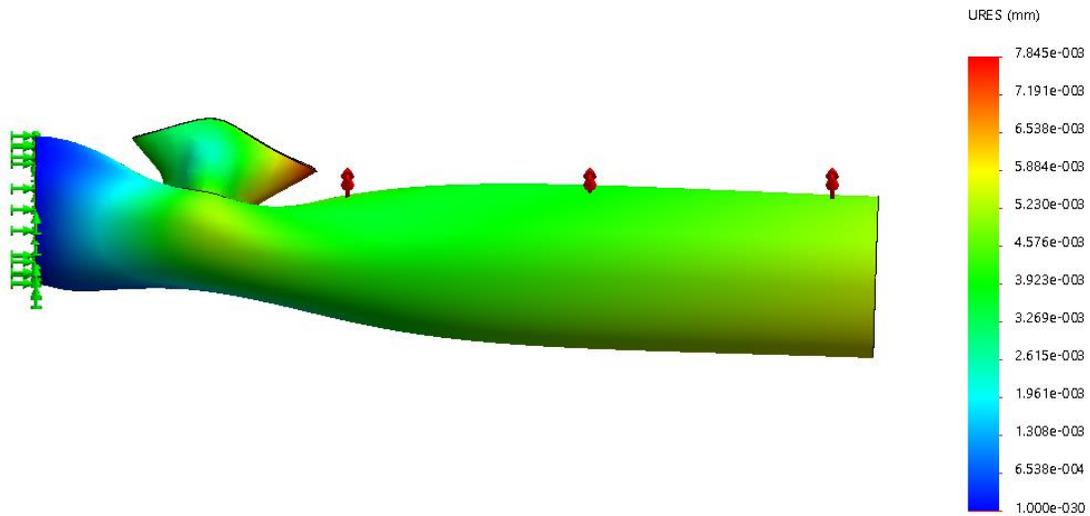
Desplazamiento máximo.

Figura 122. Desplazamiento total en el barril de extrusión.

Vemos que el desplazamiento máximo ocurrirá en el extremo derecho del barril, pero con valores muy bajos (orden de las micras) que no influirán en el proceso de extrusión.

Factor de seguridad.

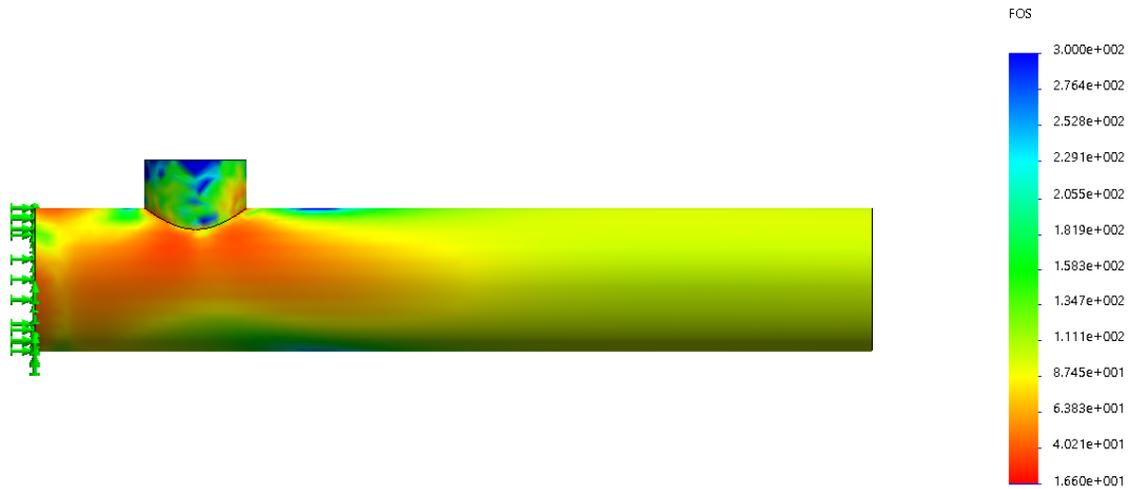


Figura 123. Factor de seguridad en el barril de extrusión.

El mínimo factor de seguridad es de 40 y el máximo de 300.

De acuerdo al software la masa total del barril es 5.90 kg.

4.2.3. Tolva de alimentación.

De acuerdo a la sección 4.1.5. tenemos:

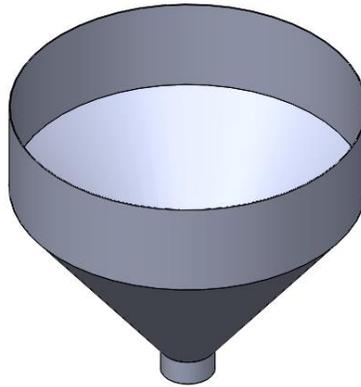


Figura 124. Tolva de alimentación.

De acuerdo al software la masa total de la tolva de alimentación es 2.43 kg.

4.2.4. Plato rompedor.

De acuerdo a la sección 4.1.6. tenemos:

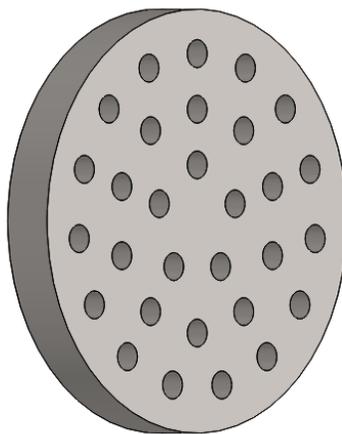


Figura 125. Plato rompedor.

Esfuerzo total.

Como se vio en la sección 4.1.6. el plato rompedor está sometido a esfuerzo de compresión.

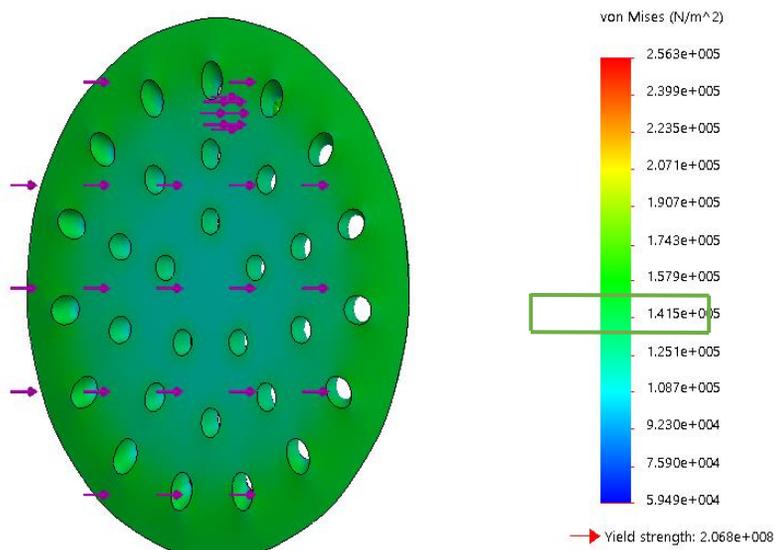


Figura 126. Esfuerzo total en el plato rompedor.

Observamos que el esfuerzo total asciende a un máximo de 0.22 MPa y en promedio 0.14 MPa, que es igual al esfuerzo total teórico calculado 0.14 MPa.

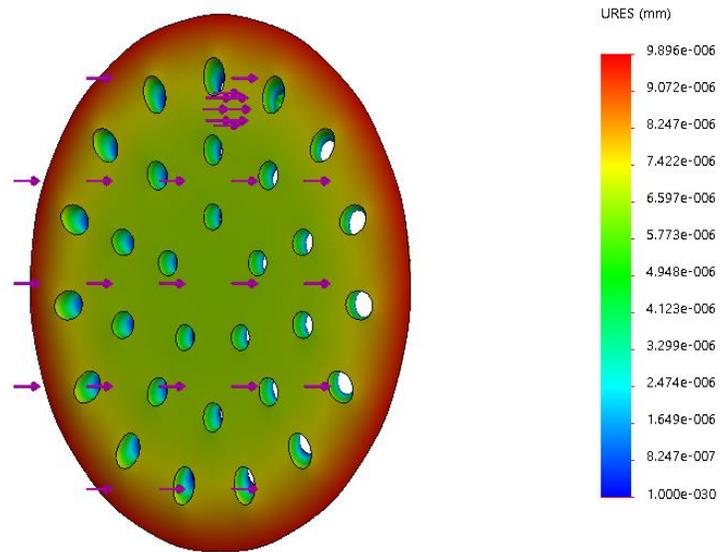
Desplazamiento máximo.

Figura 127. Desplazamiento máximo en el plato rompedor.

El desplazamiento es casi nulo, el máximo desplazamiento asciende a 9.90 *nm*.

Factor de seguridad.

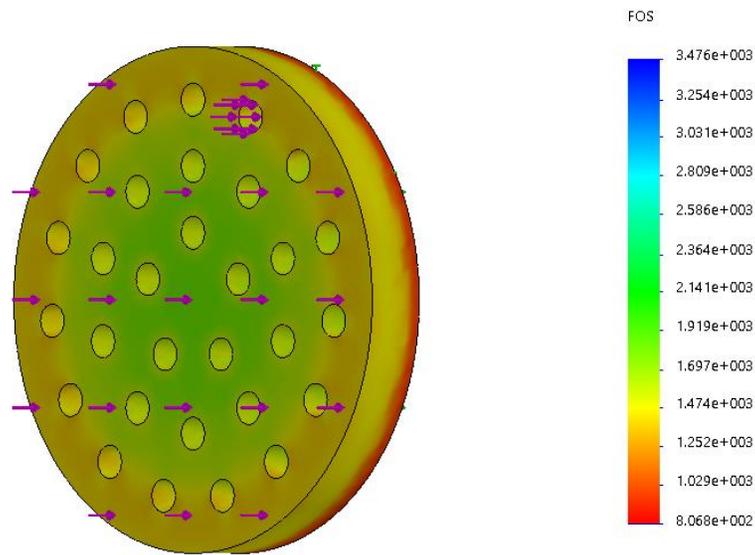


Figura 128. Factor de seguridad en el plato rompedor.

Obtenemos un factor de seguridad mínimo de 807, lo que demuestra que el plato rompedor resistirá sobremanera los esfuerzos a los que está sometido.

De acuerdo al software sabemos que la masa total del plato rompedor es de 0.32 kg.

4.2.5. Cabezal y boquilla de extrusión.

Durante el cálculo de la constante de la cabeza perfiladora en la sección 4.1.1. ya se definió la geometría y longitud del cabezal (etapa cónica) y boquilla (etapa rectángular) (Figura 80). De acuerdo a ello tenemos:

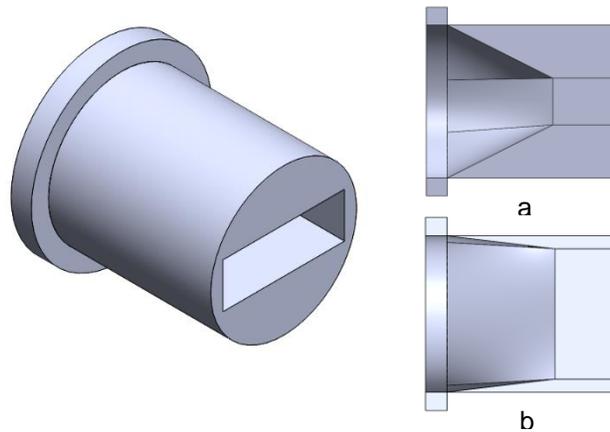


Figura 129. Diseño del cabezal y boquilla de extrusión.
Corte lateral. b. Corte superior.

Esfuerzo total.

El cabezal y la boquilla serán fabricados de acero inoxidable AISI 304 y estarán sometidos a esfuerzo de compresión, producto de la presión que se desarrolla en la zona de extrusión ($\Delta P = 0.31 \text{ MPa}$).

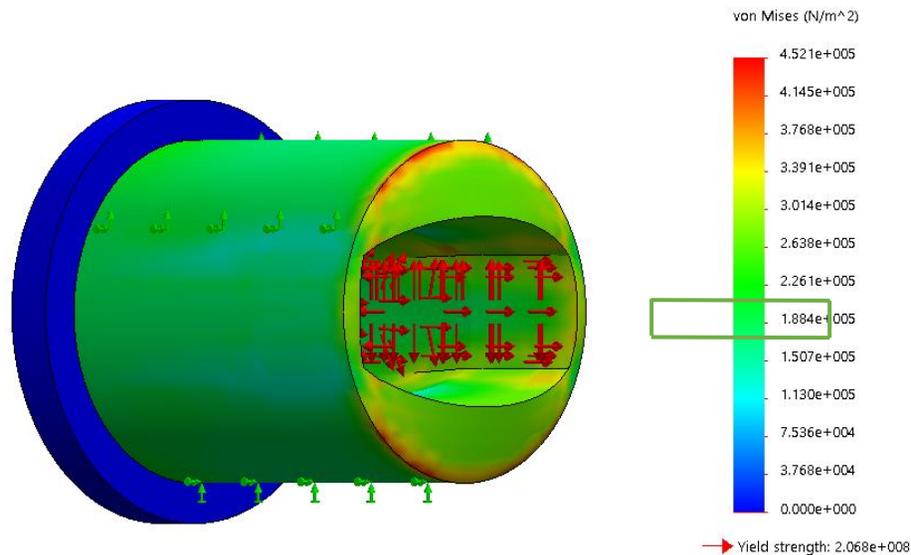


Figura 130. Esfuerzo total en el cabezal y boquilla de extrusión.

Observamos que el esfuerzo total máximo es 0.45 MPa y se desarrolla en el extremo frontal superior de la boquilla. El esfuerzo total promedio presente en todo el elemento es 0.19 MPa, que es muy bajo en comparación con el límite de fluencia $S_y = 207$ MPa (Anexo 3), por lo que se concluye que el cabezal y la boquilla resistirán con creces los esfuerzo involucrados.

Desplazamiento máximo.

Debido a los bajos esfuerzos desarrollados es evidente que la deformación o desplazamiento máximo será nulo.

Esto se comprueba a continuación.

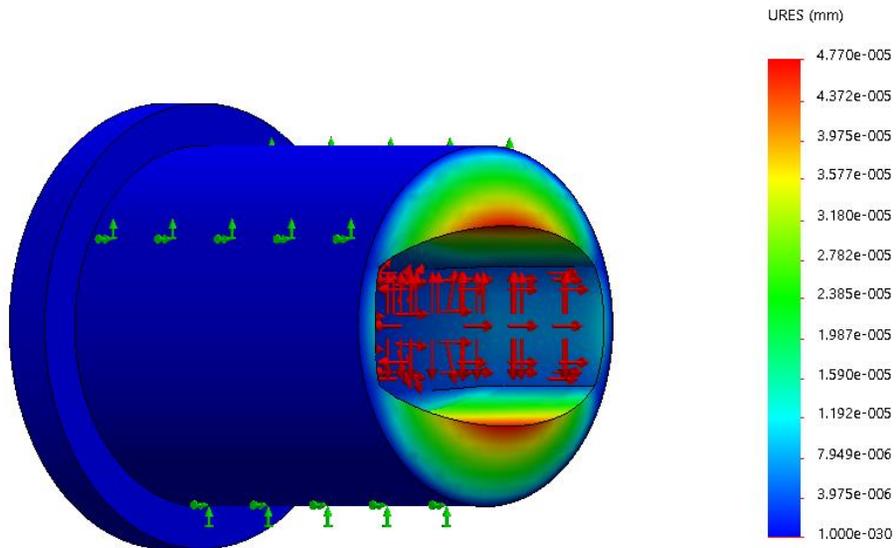


Figura 131. Desplazamiento máximo en el cabezal y boquilla de extrusión.

Observamos que la deformación máxima asciende a 47.70 nm.

Factor de seguridad.

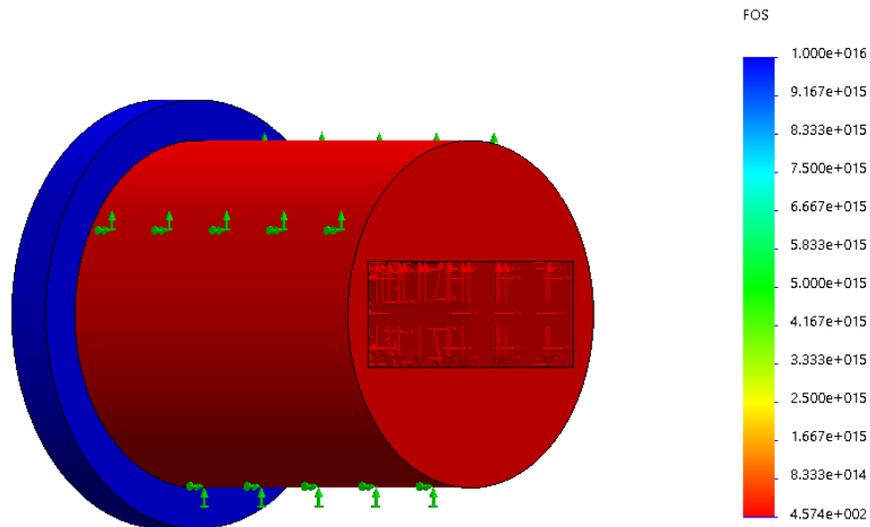


Figura 132. Factor de seguridad en el cabezal y boquilla de extrusión.

El factor de seguridad es de 457.4, lo que demuestra satisfactoriamente la validez del diseño. De acuerdo al software sabemos que la masa total del cabezal y boquilla de extrusión es de 1.42 kg.

4.2.6. Soporte estructural o bastidor.

El aspecto del bastidor se muestra en la Figura 111.

Esfuerzo total.

Como se describió anteriormente el bastidor soportará el peso del motor (13.8 kg, Anexo 16), caja reductora (13 kg, Anexo 10), el husillo (13.93 kg), el cilindro o barril

(5.90 kg), la tolva de alimentación (2.43 kg), el plato rompedor (0.32), el cabezal y boquilla de extrusión (1.42 kg) y otros elementos y materiales (incluido el jabón) a los cuales estableceremos una masa total de 10 kg. Esto da una masa total de 60.80 kg, que es el peso máximo que soportará el bastidor si no se coloca ningún elemento adicional sobre su estructural.

La carga producida por la masa total es 595.84 N.

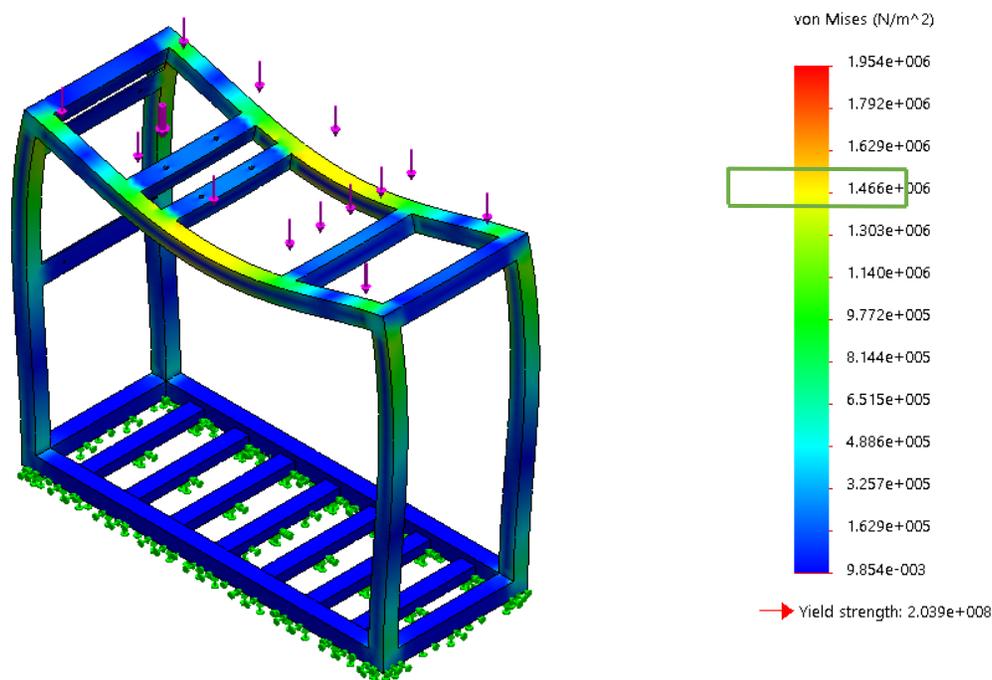


Figura 133. Esfuerzo total en el bastidor.

El esfuerzo total máximo que se desarrolla en el bastidor es 1.47 MPa. Un valor muy alejado del límite de fluencia (203.90 MPa).

Desplazamiento máximo.

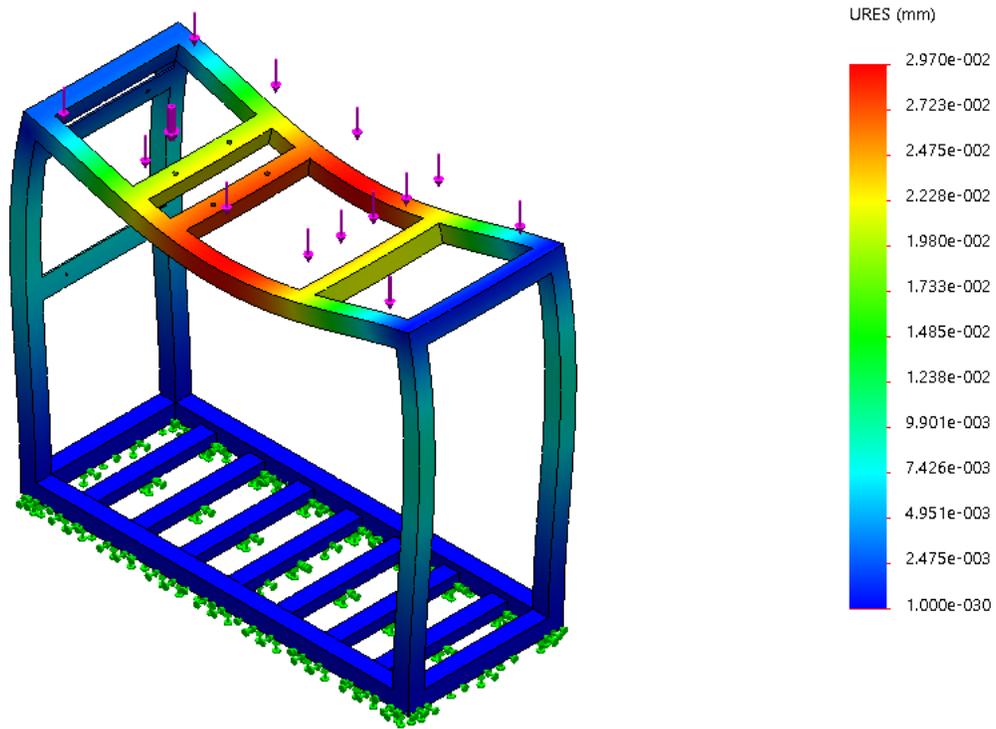


Figura 134. Desplazamiento máximo en el bastidor.

En la zona de la mitad se da el máximo desplazamiento, el cual es muy bajo (0.0297 mm).

Factor de seguridad.

El factor de seguridad es bastante alto, el mínimo llega a 104.30 y el máximo a 8.62×10^9 . Esto indica que el bastidor soportará incluso más peso que el mínimo requerido para el proceso de extrusión.

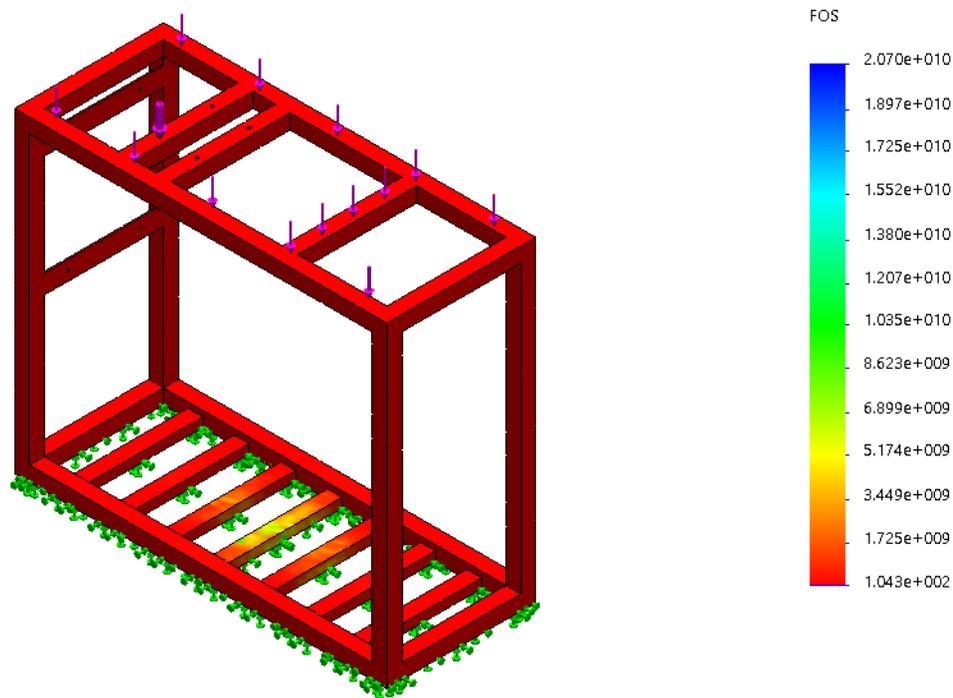


Figura 135. Factor de seguridad en el bastidor.

4.3. SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES ELÉCTRICOS, ELECTRÓNICOS Y ELECTROMECAÓNICOS.

Los componentes eléctricos y electromecánicos permitirán gobernar el funcionamiento general de la máquina extrusora. Los componentes electrónicos controlarán las variables que influyen directamente en el proceso de extrusión del jabón, como la velocidad de giro del husillo y la temperatura de la resistencia eléctrica.

Para automatizar la máquina extrusora es necesario implementar circuito de control y potencia de la Figura 136.

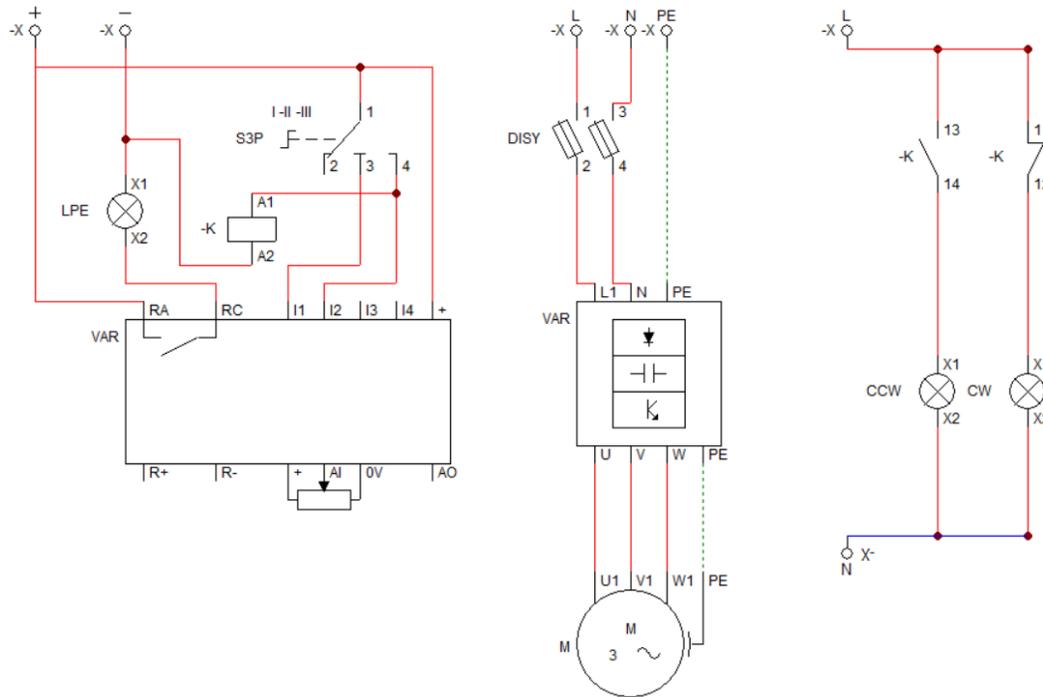


Figura 136. Circuito de control y potencia.

Para reconocer cada elemento se debe tomar en cuenta la siguiente tabla de variables.

Tabla 41
Variables de control y potencia.

Variable	Significado
VAR	Variador de velocidad.
LPE	Luz piloto de encendido.
K	Relé.
S3P	Conmutador de 3 posiciones.
DISY	Disyuntor.
M	Motor trifásico.
CCW	Luz piloto de giro CCW.
CW	Luz piloto de giro CW.
+AI0V	Potenciómetro.

4.3.1. Selección del Motor.

El motor es el órgano fundamental de la máquina extrusora. En conjunto con el reductor sinfín corona brinda el movimiento rotativo necesario al husillo para ejecutar el proceso de extrusión. El motor debe ser trifásico con alimentación de 220 V/60 Hz (Tabla 21) y potencia de 2 HP (sección 4.1.1.). Además, debe ser compatible con el reductor sinfín corona (sección 4.1.3., Anexo 10).

Del catálogo de motores trifásicos de la línea W22 de la marca Weg (Anexo 20, Figura 129) se elige el motor IE2 de 2 HP con tamaño de carcasa 90S y velocidad rotacional nominal de 1750 rpm.



Figura 137. Motor trifásico línea W22 marca Weg carcasa 90S.
Fuente: (Weg, s.f.).

La carcasa de los motores W22 es fabricada en hierro gris FC-200 para proveer altos niveles de robustez mecánica y resistir las aplicaciones más críticas. Las aletas de refrigeración han sido diseñadas para evitar la acumulación de líquidos y polvo sobre el motor. Todas las carcasas son suministradas con terminales de puesta a tierra posicionados adentro de la caja de conexiones.

4.3.2. Selección del variador de velocidad.

De acuerdo a las especificaciones del producto (sección 3.4, Tabla 21) la velocidad rotacional del husillo de extrusión debe ser variable. Por sí solo el motor trifásico no tiene la capacidad de variar la velocidad de rotación del husillo, la cual, por el contrario, se mantiene constante a 40 rpm a la salida del reductor sin fin corona.

La velocidad rotacional de los motores trifásicos puede ser gobernada mediante dispositivos denominados variadores de velocidad, variadores de frecuencia o frequency inverters. Estos se emplean en una amplia gama de aplicaciones industriales

y el requisito más importante para su utilización es constatar que sean compatibles con el motor.

En nuestro caso elegimos el variador de frecuencia PI130-1R5G1 de la serie PI130 de la marca Powtran® (Anexo 21), que es compatible con el motor de 2 HP (1.5 KW) a 220 V/60 Hz previamente seleccionado.

En el Anexo 21 también se detalla el procedimiento para la puesta en marcha (commisioning) y el diagrama de conexión con el motor.

4.3.3. Selección de las luces piloto.

Los indicadores luminosos o luces piloto son elementos de control industrial que proporcionan una señal luminosa relativa a determinada acción de un sistema. Para la máquina extrusora necesitamos 2 luces piloto tipo LED a 220V/60Hz de 22 mm de diámetro de color verde. Estas luces piloto indicarán cuándo el husillo extrusor gira en sentido horario y cuándo gira en sentido antihorario.

Las luces piloto deben ser de fácil montaje y con un buen grado de protección contra el polvo y elementos extraños. Bajo estas consideraciones se seleccionó luces piloto convencionales, fáciles de adquirir en cualquier tienda de material eléctrico-electrónico.



Figura 138. Luz piloto marca RS Pro.
Fuente: www.es.rs-online.com

En este caso se seleccionó las luces piloto de la marca RS Pro (Anexo 22) que cuentan con una protección IP65 y funcionan a 220V y 20 mA.

4.3.4. Selección de los elementos de maniobra y control.

Los elementos de maniobra y control son operadores que sin necesidad de cambiar las conexiones del circuito eléctrico permiten gobernar a voluntad la instalación. Es decir, permiten el control o gobierno de determinada acción en un sistema eléctrico – electrónico.

Para la máquina extrusora se requiere de un conmutador de 3 posiciones, mediante el cual se pueda controlar el sentido de giro del husillo (horario o antihorario); un potenciómetro de tambor, para regular la velocidad de giro del husillo; un pulsador paro de emergencia, para cortar la energía a la máquina en caso de un fallo y un relé de estado sólido.

Conmutador de 3 posiciones.

El conmutador irá conectado a las entradas digitales del variador de velocidad, por lo que trabajará a bajos voltajes y corrientes. Debe ser de fácil montaje en gabinete y con buena protección contra el polvo y agentes extraños.

Al igual que las luces piloto se seleccionó un conmutador convencional, fácil de encontrar en el mercado local.



Figura 139. Conmutador de 3 posiciones.
Fuente: www.adajusa.es

Este conmutador de la marca Huwulimeltc comercializado por Adajusa (Anexo 23), cuenta con dos contactos sostenidos normalmente abiertos (NA) y con un grado de protección IP40.

Potenciómetro de tambor.

Los potenciómetros son dispositivos de resistencia variable que conectados a una fuente de voltaje son capaces de suministrar voltaje variable (divisor de voltaje).

El potenciómetro de tambor irá conectado a un terminal electrónico del variador de velocidad que suministra 10V, y a la entrada analógica del mismo. De esta manera se podrá gobernar la frecuencia del variador de velocidad y, por consiguiente, la velocidad de giro del husillo. Permitiendo, de esta manera, controlar esta variable clave en el proceso de extrusión.



Figura 140. Potenciómetro rotatorio de tambor.
Fuente: www.google.com

De acuerdo a las características técnicas del variador de velocidad (Anexo 21) se seleccionó un potenciómetro de $5\text{ k}\Omega$ con tambor grande de la marca Productwell (Anexo 24). El cual se puede montar fácilmente en gabinete gracias a su tuerca de ajuste. Adicionalmente, para conseguir un aspecto más estético y una buena manipulación se implementó una perilla sobre su eje.



Figura 141. Perilla para potenciómetro.
Fuente: www.google.com.

Pulsador paro de emergencia.

El pulsador paro de emergencia sirve para prevenir situaciones que puedan poner en peligro a las personas, para evitar daños en la máquina o en trabajos en curso o para minimizar los riesgos ya existentes, y ha de activarse con la sola maniobra de una persona.

El pulsador paro de emergencia es de color rojo y tiene forma de champiñón y debe ir conectado directamente al suministro de energía del gabinete de control. Se trata de un contacto normalmente cerrado (NC) que al ser presionado corta el flujo de energía hacia el circuito eléctrico, haciendo que la máquina se detenga al instante. Este pulsador luego es desenclavado mediante un “girón”.

Del mercado local se seleccionó el pulsador paro de emergencia de la marca Schneider en forma de champiñón con 40 mm de diámetro, grado de protección IP69 y base metálica (Anexo 25).



Figura 142. Pulsador paro de emergencia.
Fuente: www.se.com

4.3.5. Selección del disyuntor.

El disyuntor es un elemento de protección industrial que es capaz de interrumpir o abrir un circuito eléctrico cuando la intensidad de la corriente eléctrica que por él circula excede de un determinado valor, o en el que se ha producido un cortocircuito, con el objetivo de no causar daños a los equipos eléctricos.

El disyuntor es el primer elemento por el que pasa la energía dentro de un gabinete eléctrico. En nuestro caso, la salida del disyuntor va hacia la alimentación del variador de velocidad y hacia la alimentación del controlador de temperatura, con el fin de protegerlos.

Como el variador de frecuencia y el controlador de temperatura funcionan a 220V/60Hz se ha seleccionado un disyuntor compatible de la marca Scheider Electric (Anexo 26), por ser estos los más comunes y recomendados del mercado local.



Figura 143. Disyuntor 2 polos marca Scheider Electric.
Fuente: www.se.com

Este disyuntor cuenta con 2 polos, debido a que la alimentación del variador de velocidad es bifásica, y un grado de protección IP20. Es de tipo riel DIN, lo que facilitará su montaje dentro del gabinete eléctrico.

4.3.6. Selección y diseño del gabinete de control.

Las cajas eléctricas o gabinetes son contenedores de conexiones eléctricas, destinados a protegerlas del polvo, ocultarlas de la vista y evitar su manipulación. El gabinete guardará todos los componentes y circuitos eléctricos y electrónicos de la máquina extrusora, dejando tan solo a la vista elementos de maniobra y las luces piloto.

Los elementos que permanecerán dentro del gabinete son el variador de velocidad, el disyuntor y el relé de estado sólido. Se debe seleccionar un gabinete con las dimensiones adecuadas para que quepan todos los elementos. De acuerdo a las dimensiones de cada elemento (Anexo 21, Anexo 26) se selecciona un gabinete metálico de 40x30x20 cm (Anexo 27), que es el que se muestra en la Figura 144.



Figura 144. Gabinete eléctrico metálico.
Fuente: (Proelectricos, s.f.).

Cuenta con el espacio suficiente para todos los elementos, circuito de control y cableado. Es metálico, por lo que les brinda gran protección, y es hermético.

Algunas de las ventajas que se obtienen de utilizar este tipo de gabinetes son:

- Son fabricados en lámina Cold Rolled.

- Recubrimiento en pintura electrostática texturizada con gris RAL 76.235.
- Placa doble fondo removible.
- Puntos para tierra.
- Grado de protección IP55.

El diseño de la distribución en el interior del gabinete de control se realizará en base a la norma ecuatoriana de construcción, la cual ya al inicio recomienda utilizar componentes estandarizados y de fácil reemplazo o modificación. De acuerdo a esta norma nuestro gabinete entra en la categoría de Tablero de control o comando. Al utilizar el gabinete seleccionado estamos cumpliendo con la cláusula 15.1.6.2.1.2.

Según la cláusula 15.1.6.2.1.6. la placa doble fondo removible del gabinete eléctrico debe ser utilizada para montar los elementos eléctricos del tablero de control. Sujetándolos, de ser posible, con pernos, de modo que puedan ser fácilmente removidos de ser necesario. Elementos como el disyuntor y el relé de estado sólido son de tipo riel DIN (Anexo 28), por lo que se utilizará este método de fijación.

De acuerdo a las indicaciones de la cláusula 15.1.6.2.1.7. se utilizarán canaletas (Anexo 29) para el cableado de interconexión entre los diferentes dispositivos. Tomando en cuenta las recomendaciones de la cláusula 15.1.6.2.1.15. se propone la distribución de la placa doble fondo de la siguiente manera:

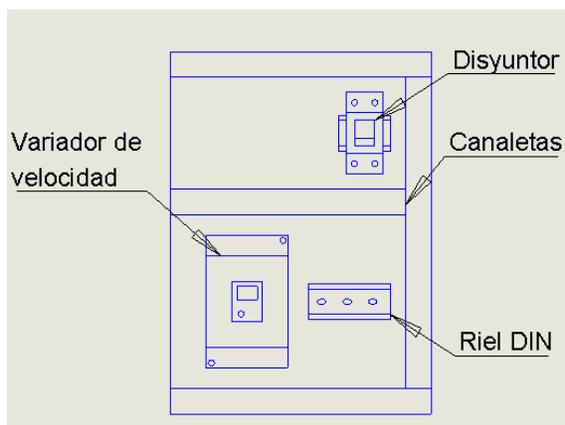


Figura 145. Distribución de la placa doble fondo.

Además, según la cláusula 15.1.6.2.1.3. se propone la distribución de los elementos de maniobra y luces piloto como se muestra a continuación:

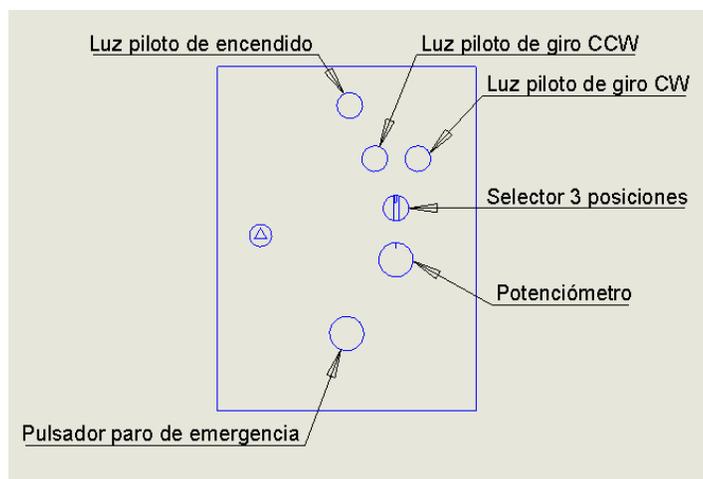


Figura 146. Distribución de los elementos de maniobra y luces piloto en el gabinete de control.

CAPÍTULO 5.

FABRICACIÓN, ENSAMBLE Y PRUEBAS.

5.1. FABRICACIÓN DE LOS ELEMENTOS.

5.1.1. Fabricación del soporte estructural o bastidor.

Los materiales que se utilizarán para la fabricación del soporte estructural o bastidor se definieron en la sección 4.1.7. La fabricación se realiza de acuerdo al diagrama de proceso del Apéndice 1. Para el detalle de dimensiones revisar el Plano.

Los resultados obtenidos se muestran a continuación:



Figura 147. Soporte estructural o bastidor.

5.1.2. Fabricación del Cilindro o barril de extrusión.

Se ejecuta de acuerdo a lo definido en la sección 4.1.4 y al diagrama de proceso del Apéndice 2. Para el detalle de dimensiones revisar el Plano.

Los resultados obtenidos se muestran a continuación:



Figura 148. Cilindro o barril de extrusión.

5.1.3. Fabricación de la Tolva de alimentación.

La Tolva de alimentación se fabrica de acuerdo al diagrama de proceso del Apéndice 3 y bajo las condiciones definidas en la sección 4.1.5. Para el detalle de dimensiones revisar el Plano. Los resultados obtenidos se muestran a continuación:



Figura 149. Tolva de alimentación.

5.1.4. Fabricación del plato rompedor.

La fabricación del plato rompedor se ejecuta de acuerdo a la hoja de mecanizado del Apéndice 4. Para el detalle de dimensiones revisar el Plano.

Los resultados se muestran a continuación:



Figura 150. Plato rompedor.

5.1.5. Fabricación de la Brida motorreductor – cilindro.

Se lleva a cabo conforme con la hoja de mecanizado del Apéndice 5. Para el detalle de dimensiones revisar el Plano.

Los resultados fueron los siguientes:



Figura 151. Brida motorreductor – cilindro.

5.1.6. Fabricación de la tuerca de ajuste.

Se lleva a cabo conforme con la hoja de mecanizado del Apéndice 6. Para el detalle de dimensiones revisar el Plano.

Los resultados fueron los siguientes:



Figura 152. Tuerca de ajuste.

5.1.7. Fabricación de la boquilla de extrusión.

Por falta de disponibilidad de maquinaria, la boquilla se envió a fabricar en una empresa privada de acuerdo a lo estipulado en la sección 4.1.1 (Figura 80) y sección 4.2.5 (Figura 129). Para el detalle de dimensiones revisar el Plano.

Los resultados se muestran a continuación:



Figura 153. Boquilla de extrusión.

5.1.8. Fabricación de husillo extrusor.

Debido al diámetro del alma variable del husillo este solo es posible fabricarlo con el uso de una fresadora CNC con cuarto eje. Por este motivo se envió a maquinarlo en una empresa privada de acuerdo al diseño realizado en la sección 4.1.1. Para el detalle de dimensiones revisar el Plano.

Los resultados se muestran a continuación:



Figura 154. Husillo extrusor.

5.2. ENSAMBLE.

El ensamble se ejecuta de acuerdo a lo esquematizado en el plano de ensamble.

El resultado debe ser el siguiente:



Figura 155. Ensamble Máquina extrusora de jabón.

5.3. PRUEBAS Y RESULTADOS.

La primera prueba consistió en hacer pasar la masa de jabón a través del plato rompedor, con el fin de mezclar y homogenizar. El resultado fue un espagueti de jabón, como se muestra a continuación.



Figura 156. Jabón extruido a través del plato rompedor.

La segunda y última prueba consistió en demostrar el funcionamiento propio de la máquina extrusora, la cual consistió en hacer pasar la masa de jabón a través del plato rompedor, e inmediatamente luego, a través de la boquilla o cabeza perfiladora, con el fin de conseguir la forma final del jabón de Apaika (Figura 44 y Figura 45). Los resultados se muestran a continuación.



Figura 157. Jabón extruido.

CAPÍTULO 6.

ANÁLISIS DE COSTOS.

Los costos directos e indirectos surgidos durante el desarrollo del presente proyecto se presentan a continuación:

6.1. COSTOS INDIRECTOS.

Tabla 42
Costos misceláneos.

Misceláneos				
No.	Descripción	USD/Semana	Semanas	Valor Total (USD)
1	Servicios básicos	10	20	200
2	Internet	6,25	20	125
3	Transporte	10	10	100
Total				425

6.2. COSTOS DIRECTOS.

Tabla 43
Costos de taller.

Taller				
No.	Descripción	USD/Semana	Semanas	Valor Total (USD)
1	Luz (energía)	7,5	10	75
2	Materiales de soldadura	2	10	20
3	Máquina herramientas	50	10	500
			Total	595

Tabla 44
Costos de materiales y dispositivos.

Materiales y dispositivos					
No.	Descripción	Cantidad	Dimensión	Valor unitario (USD)	Valor Total (USD)
1	Motorreductor ortogonal FCNDK90, motor WEG trifásico Variador de frecuencia	1	i 50 2 HP 220/380/440 V	680,00	680,00
2	POWTRAN Serie #ZGH7A2624792	1	2 HP 220 V	142,98	142,98
3	Cable concéntrico	4	3x14 26H x 4 m	1,10	4,40
4	Selector 2 posiciones NO	1	22 mm	2,30	2,30
5	Tubo cuadrado galvanizado (6 m)	2	1½ x 2mm	26,00	52,00
6	Tool acero inoxidable mate 1 - 24.3(304)	1	1220x2440x1 mm	95,66	95,66

continúa

7	Interruptor SW Balancín	1	MED 6	2,10	2,10
8	Lámparas de señalizado (verde)	3	22 mm	3,60	10,80
9	Garrucha metálica fijas	2	5" 100 Kg	2,50	5,00
10	Garrucha metálica móviles	2	5" 100 Kg	3,50	7,00
11	Gabinete metálico 30x40x15 doble fondo	1	30x40x15 cm	33,52	33,52
12	Toma conector polar plast negro Eagle	1	15A	1,68	1,68
13	Tomacorriente doble polar Beige	1	15A 125V	1,34	1,34
14	Breaker tipo riel DIN 2P S.D	1	16A 220V	12,21	12,21
15	Terminales eléctricos industriales	9	-	0,15	1,35
16	Pernos de acero negro con tuercas	6	3/8x2½ in	0,34	2,04
17	Rodelas de presión a juego con los pernos.	6	3/8 in	0,16	0,96
18	Rodelas planas a juego con los pernos	6	3/8 in	0,17	1,02
19	Selector 3 posiciones	1	22 mm	3,50	3,50
20	Canaleta ranurada gris	1	250x40 mm	4,20	4,20
21	Rieldín metálico	1	250x40 mm	3,10	3,10
22	Pernos para variador de frecuencia	2	5/32x2½ in	0,23	0,46
23	Pernos para las ruedas	2	1/2x2½ in	0,75	1,50
24	Pernos para la caja eléctrica.	4	5/32x1 in	0,10	0,40
25	Cable de timbre	2	2 m	0,50	1,00
26	Cable flexible TW #18 AWG	2	2 m	0,30	0,60
27	Manguera anillada	2	3/4inx5 m	0,50	1,00

continúa

28	Terminal macho rojo	12	22-16	0,02	0,24
29	Cable flexible TW #18 AWG	4	4 m	0,30	1,20
30	Terminal macho rojo	9	22-16	0,05	0,45
31	Perilla para potenciómetro	1	40 mm	3,00	3,00
32	Potenciómetro	1	5 kΩ	0,75	0,75
33	Pulsador paro de emergencia	1	40 mm	5,00	5,00
34	Eje de acero inox 304	1	3 in x 690 mm	128,50	128,50
35	Tubo de acero inox 304	1	3 in ced40 x 1 m	100,80	100,80
36	Acero inox para brida cabezal	1	4 in x 40 mm	16,28	16,28
37	Aceroinox para brida motorreductor - camisa.	1	7 in x 25 mm	37,73	37,73
38	Chaveta cuadrada	1	10x300 mm	1,41	1,41
39	Electrodos acerno inoxidable	10	3/32 in	0,35	3,50
40	Platina de acero A36	1,5	1x3/16 inx1,50 m	1,00	1,50
41	Masilla Mustang	1	1 L	8,00	8,00
42	Lija de agua	3	#120	0,40	1,20
43	Taipe grande negro	1	-	0,90	0,90
44	Pintura sintética color aluminio.	1	1 L	5,00	5,00
45	Pernos para brida motorreductor - camisa.	4	3/8x1 in	0,30	1,20
46	Tiñer	2	2 L	0,60	1,20
47	Guaípe	1	-	0,30	0,30
48	Tiñer Laca	1	1/2 G	2,80	2,80
49	Angulo, bisagra, varilla, suelda	1	-	14,39	14,39
50	Pernos y rodela galvanizadas para brida	8	3/8x1 in	1,00	8,00

continúa

51	Hoja de sierra	1	fina	1,40	1,40
52	Lijas de agua	3	#80	0,40	1,20
				Total	1418,07

Tabla 45
Costos de contratación de siervivios.

Contratación de servicios					
No.	Descripción	Empresa	Cantidad	Valor unitario (USD)	Valor Total (USD)
1	Hojalatero para la tolva de alimentación.	-	1	40,00	40,00
2	CNC para tornillo de extrusión	IMPROMAT	1	963,20	963,20
3	Boquilla de extrusión	METALARCO	1	117,31	117,31
4	Montaje de canaleta y riel DIN	V&L CONTROL	1	15,61	15,61
				Total	1136,12

Tabla 46
Costos de mano de obra.

Aporte del estudiante				
No.	Nombre	USD/Semana	Semanas	Valor Total (USD)
1	Ramiro Galindo	100	10	1000
			Total	1000

6.3. COSTO TOTAL.

Tabla 47
Costo total.

Costo Total		
No.	Descripción	Costo (USD)
1	Misceláneos	425
2	Taller	595
3	Materiales y dispositivos	1418,07
4	Contratación de servicios	1136,12
5	Aporte del estudiante	1000
Subtotal		4574,19
Imprevistos (10%)		457,419
Total		5031,609

CAPÍTULO 7

CONCLUSIÓN

La gran variedad de conceptos y aplicaciones de las extrusoras encontradas en diversas fuentes escritas fue un buen comienzo para estudiar su funcionamiento y características. Gracias a ello se pudo estudiar el principio físico de la extrusión, sus comienzos y evolución hasta la actualidad, distinguiéndose así cada uno de sus componentes. Por otro lado, el estudio del arte demostró que no existen estudios formales acerca de las máquinas extrusoras de jabón artesanal, dando paso, de este modo, a analizar, en su lugar, las tradicionales máquinas extrusoras de diversos tipos de plástico.

El estudio del jabón artesanal permitió conocer sus orígenes y propiedades naturales, así como su método milenario de fabricación. Por otro lado, el estudio reológico llevado a cabo con el jabón artesanal de Apaika determinó sus características y propiedades físicas, demostrando así su calidad. Entre las propiedades físicas más sobresalientes se encontró su viscosidad, la cual nos ayudó a calcular el torque necesario para su extrusión, en otras palabras, nos ayudó a dimensionar la potencia del motor de la máquina extrusora. A su vez, debido a la falta de documentación formal, el estudio reológico puede servir como base para nuevos trabajos de investigación que involucren el uso de jabón artesanal.

El estudio del marco teórico y el estudio del arte fueron de vital importancia porque plantearon las bases para el proceso de diseño y desarrollo del producto. Formalmente, este proceso inició con la planificación, en donde la visión y la misión de la máquina, sujeto de esta investigación, fueron planteadas de acuerdo a los estudios mencionados. De igual manera, el proceso de identificación de las necesidades del cliente, las especificaciones del producto y la generación de conceptos fueron ampliamente facilitados gracias, sobre todo, al estudio del arte. Durante estas etapas del proceso se zanjó las características de la extrusora que cumplieron con las necesidades de la empresa Apaika, así mismo se realizó un Benchmarking para referenciar la competitividad del producto y finalmente se determinó la disponibilidad de materiales en el mercado para su fabricación. El proceso de diseño y desarrollo del producto dio como resultado el primer prototipo de la máquina extrusora de jabón artesanal.

Durante el proceso de diseño a detalle, en donde se diseñó la geometría de los elementos de la máquina acompañado de su respectivo diseño de resistencia, sobresalió el componente más importante: el tornillo o husillo extrusor, el cual, debido a la mencionada falta de documentación formal, fue diseñado a partir de un modelo matemático planteado para extrusoras de plásticos, por lo que se realizaron los cambios necesarios para adaptarlo a la aplicación de extrusión de jabón. Los resultados de este proceso fueron positivos, se consiguió una buena geometría y conceptos más reales. El material elegido para la máquina extrusora fue acero inoxidable, ya que, de acuerdo al estudio de resistencia, demostró ser lo bastante resistente para el proceso de extrusión

y también porque se determinó que ralentiza el efecto de corrosión que el jabón y sus componentes pueden provocar. El proceso de diseño a detalle dio como resultado el prototipo final de la máquina extrusora de jabón artesanal. De acuerdo a esto se pudo comprobar que el proceso de diseño y desarrollo del producto es un proceso cíclico y que pueden existir varios prototipos, dependientes de la disponibilidad de material, facilidad de manufactura y características de eficiencia, hasta conseguir el modelo final.

Para la fabricación de la máquina se utilizaron métodos clásicos de manufactura, excepto para el tornillo extrusor, para el cual hizo falta una fresadora CNC con cuarto eje. Tras la fabricación y ensamble (basados en las etapas previas) se llevó a cabo el protocolo de pruebas, las cuales, tras una calibración rápida, fueron exitosas. En esta etapa se comprobó el correcto funcionamiento de la máquina y se verificó que cumpliera con su fin último: extruir jabón artesanal. El jabón extruido contó con buena compresión, es decir, con buenas características de dureza y cumplió con las necesidades de la empresa Apaika, quien utilizará la máquina para fabricar el jabón a una tasa de producción más alta que la actual.

Como recomendación se puede decir que para futuras investigaciones sería interesante implementar un sistema de corte temporizado, para cortar el extruido de jabón en la longitud adecuada.

BIBLIOGRAFÍA.

[Capítulo 2. Marco Teórico. Proceso de extrusión de plásticos]. (s. f.).

[Extrusión de láminas de plástico para la industria alimenticia]. (s. f.).

Adajusa. (s.f.). *Selectores ϕ 22 mm serie metálica ADJ – 1411061 – Datasheet [pdf].*

Adajusa.

Barbosa Lanchimba, C. E. (2012). *Estudio de factibilidad para la creación de una microempresa productora y comercializadora de jabón artesanal exfoliante de harina de maíz y efervescente en la ciudad de Quito*. Quito: Universidad Central del Ecuador.

Beltrán Rico, M., & Marcilla Gomis, A. (2012). *Tecnología de polímeros*. Alicante: Universidad de Alicante.

Budynas, R. G., & Nisbeth J, K. (2012). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley. (9na edición)*. México D.F.: McGraw Hill.

Caisaguano Chiquito, M. D. (2010). *Estudio de factibilidad para la creación de una empresa productora y comercializadora de jabón de tocador artesanal, ubicada en la provincia de Cotopaxi, en la ciudad de Latacunga*. Quito: Universidad Politécnica Salesiana.

Capítulo 6. Extrusión [pdf]. (s. f.).

Coahuila, U. A. (2009). *Tema 8: soldabilidad de los aceros inoxidables*. Saltillo: Universidad Autónoma de Coahuila.

- Creus, A. (2011). *Instrumentación Industrial (8va edición)*. Barcelona: Ediciones Marcombo.
- Del Río R, A. (2011). *Extrusora Destinada a la Aplicación de Recubrimiento Doble sobre Núcleo Metálico para la Fabricación Experimental de Electrodo de Soldadura*. Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas.
- Deutchman, A. D., Michels, W. J., & Wilson, C. E. (1987). *Diseño de máquinas*. México D.F.: Continental, S.A.
- Electric, S. (s.f.). *EZ9F56216 Miniature circuit breaker, Easy9, 2P, 16A C curve, 10000 A – Datasheet [pdf]*. Schneider Electric.
- Electric, S. (s.f.). *XB4BS8485 Paro de emergencia 40 mm con base metálica y desenclavamiento por giro – NANC – Datasheet [pdf]*. Schneider Electric.
- Enriquez Harper, G. (2004). *El libro práctico de los generadores, transformadores y motores eléctricos*. México D.F.: Limusa, S.A.
- Espert Bernia, A. (2011). *Extrusión: informe de vigilancia tecnológica 2011. Programa de actividades para la mejora de la competitividad*. Valencia: AIMPLAS Instituto Tecnológico del plástico.
- Extrusión [pdf]*. (s. f.).
- Flores G, S. (2002). *Estudio de la Adhesión Interfacial entre Películas Coextruídas de Poliamida 6 y Mezclas de Polipropileno – Polipropileno Injertado con Ácido Acrílico*. Saltillo, Coahuila: Centro de Investigación en Química Aplicada.
- Flores Rodríguez, M. (2017). *Ingeniería básica de una Planta de Producción de Jabón Sólido*. Sevilla: Universidad de Sevilla.

- Gámez Campos, L. A. (2017). *Análisis de soldabilidad de aceros inoxidables austeníticos unidos mediante el proceso GMAW aplicados a la fabricación de tanques de lixiviación*. Saltillo: Corporación Mexicana de Investigación en Materiales.
- Gómez Gómez, J. J., & Gutiérrez Bedoya, J. E. (2007). *Diseño de una extrusora para plástico*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Gonzales M, J. (1975). *Las Reales Almonas de Sevilla*. Sevilla: Instituto de la Grasa.
- Gutiérrez Morales, P. A., & Bornacelli Castillo, J. F. (2008). *Metodología para el diseño de tornillos de máquinas extrusoras monohusillo*. Bogotá D. C.: Universidad Autónoma de Occidente.
- Jabones de elaboración artesanal [pdf]. (2016). *Eroski Consumer*, 48-49.
- Mandado, E., & Acevedo, J. (2009). *Autómatas Programables y Sistemas de Automatización (2da edición)*. Barcelona: Ediciones Marcombo.
- Motive. (2018). *Reductores sinfín corona serie box [pdf]*. Motive.
- Norton, R. L. (2011). *Diseño de Máquinas: Un enfoque integrado (4ta Edición)*. Naucalpan de Juárez: Pearson Education.
- Ortiz Abata, C. F. (2018). *Diseño y construcción de una máquina extrusora de filamentos de 1.75 mm y 3 mm para impresoras 3D, a partir de polímero reciclado*. Latacunga: Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.
- Powtran. (2013). *POWTRAN PI130 Series Frequency Inverter [pdf]*. Powtran.
- Pro, R. (s.f.). *RS Pro LED Indicators (Pilot Lights) - Datasheet [pdf]*. RS Pro.
- Productwell Precision Elect. CO., L. (s.f.). *Rotary potentiometer R24311CS2 – Datasheet [pdf]*.

Proelectricos. (s.f.). *Catálogo de productos [pdf]*.

Savgorodny, V. K. (1973). *Transformación de plásticos*. Barcelona: Gustavo Gili, S. A.

SKF, G. (2015). *Rodamientos [pdf]*.

Small Soap Machines. (22 de Junio de 2019). Obtenido de Small Soap Machines:

<http://www.smallsoapmachines.com/soap-extruder-se-98.html>

Ulrich, K. T., & Eppinger, S. D. (2013). *Diseño y desarrollo de productos (5ta edición)*.

México D.F.: McGraw Hill Education.

Velilla Díaz, W., & Maury Ramirez, H. (2013). Metodología para la selección de motor en los procesos de extrusión. *Prospect*, 59-65.

Wade, L. (2004). *Química orgánica*. Madrid: Pearson education, p. 1162-1168.

Weg. (s.f.). *W22 Motor Eléctrico Trifásico [pdf]*. Weg.

ANEXOS