

Departamento de Ingeniería Eléctrica

Reacondicionamiento electromecánico de una extrusora y pelletizadora de PET

Proyecto Final de Grado

Autores

Nombre y apellido: **Ignacio Nicolás Roca Carrara**

DNI: 43.592.342

N° Matrícula: 15.999

Contacto: nicolasrocacarrara@gmail.com

Carrera: Ingeniería Electromecánica

Nombre y apellido: **Matías Corvino**

DNI: 43.855.431

N° Matrícula: 16.460

Contacto: corvinomati@gmail.com

Carrera: Ingeniería Electromecánica

Director de proyecto: **Dr. Ing. Téc. Jorge Luis Strack**

Contacto: [jlstrack@fi.mdp.edu.ar](mailto:jlsttrack@fi.mdp.edu.ar)

Codirector de proyecto: **Dr. Ing. Amadeo Daniel Sosa**

Contacto: adsosa@fi.mdp.edu.ar

Mar del Plata, 19 de diciembre de 2025.

Índice

1.	Objetivo	1
2.	Introducción	2
2.1.	Extrusión.....	2
2.2.	Plásticos - PET	3
2.3.	Reciclaje	4
2.4.	Marco de trabajo – ONG “Todo para ellos”	11
3.	Marco Teórico.....	15
3.1.	Propiedades físicas de los polímeros.....	15
3.2.	Dinámica de sólidos – Propiedades	19
3.3.	Dinámica de fluidos - Propiedades.....	20
4.	Estado del arte	26
4.1.	Tornillo simple.....	26
4.2.	Doble tornillo.....	35
4.3.	Control	39
4.4.	Extrusión de PET Reciclado - Resumen	44
4.5.	Producción de Filamentos para Impresión 3D.....	46
5.	Componentes de la extrusora	48
5.1.	Tolva.....	49
5.2.	Camisa y garganta de alimentación	52
5.3.	Tornillo.....	56
5.4.	Filtros y placa rompedora.....	62
5.5.	Cabezal	66
5.6.	Motor	68
5.7.	Transmisión – Reductor – Correa	71
5.8.	Rodamiento	75
5.9.	Resistencias eléctricas – Pirómetros.....	77
5.10.	Panel Eléctrico	79

6.	Relevamiento de otras plantas.....	82
6.1.	Relevamiento instalación eléctrica	84
7.	Periferia – Equipamiento.....	86
7.1.	Secadora	86
7.2.	Pileta de enfriado	89
7.3.	Cortina de aire	89
7.4.	Pelletizadora.....	89
8.	Análisis de desafíos en el reciclado	90
9.	Análisis teórico – Funcionamiento	96
9.1.	Sólidos - Caudal	96
9.2.	Fusión del material.....	98
9.3.	Mezclado	100
9.4.	Transporte del fundido	102
9.5.	Potencia del sistema.....	112
9.6.	Requerimiento de refrigeración del extruido.....	118
10.	Aplicación para PET	120
10.1.	Utilidad para el PET del Tornillo	120
10.2.	Conclusiones de la primera etapa. Viabilidad	120
10.3.	Cambio de condiciones: contexto de cierre	121
11.	Reacondicionamiento	123
11.1.	Reacondicionamiento mecánico.....	123
11.2.	Reacondicionamiento eléctrico.....	127
12.	Evaluación Económica.....	136
12.1.	Contexto económico	136
12.2.	Productos similares.....	136
12.3.	Ingeniería de la Producción.....	136
12.4.	Cálculo de los factores variables.....	145
12.5.	Evaluación Económica del Proyecto	147

13.	Posibles usos para las escamas de PET reciclado	158
13.1.	Ladrillos ecológicos.....	158
14.	Conclusiones	160
15.	Trabajos a futuro.....	161
15.1.	Alternativa 1 – Modificación de la extrusora original.....	161
15.2.	Alternativa 2 – Renovación total de la extrusora	162
16.	Bibliografía.....	165
Anexos.....		169
	Anexo I – Propiedades termofísicas de los polímeros [11]	169
	Anexo II – Seguridad.....	170
	Anexo III – Relevamiento componentes mecánicos originales	172
	Anexo V – Esquemas Eléctricos.....	182
	Anexo VI – Reacondicionamiento mecánico – Esquemas de armado	193
	Anexo VII – Montaje de la extrusora.....	202
	Anexo VIII – Manual de operación.....	205
	Anexo IX – Manual de mantenimiento	216

Tablas

Tabla 2-1: Consumo energético en el manejo de una botella PET. [4]	4
Tabla 2-2: Evolución del reciclado Plástico en Argentina [9]	10
Tabla 3-1: Temperaturas de fundido de diferentes polímeros. [2]	17
Tabla 3-2: Valores de viscosidad intrínseca del PET en función de la aplicación [14].	18
Tabla 3-3: Índices para la ley de Potencia para PET. [11]	24
Tabla 3-4: Efecto de la temperatura en el esfuerzo de corte en plásticos. [16]	24
Tabla 4-1: Especificaciones de una extrusora para el reciclado de PET [18]	38
Tabla 4-2: Resumen características de extrusoras de doble tornillo. [16]	39
Tabla 4-3: Temperaturas en las zonas del tornillo para el PET. [16]	43
Tabla 4-4: Comparación de propiedades de filamentos para impresión 3D [22]	47
Tabla 5-1: Relaciones de compresión para tornillos. [2]	58
Tabla 5-2: Tipos de tratamientos superficiales para tornillos. [16]	59
Tabla 5-3: Materiales de tornillo en función del polímero procesado. [16]	59
Tabla 5-4: Tamaños de filtros [26]	63
Tabla 5-5: Estimación de potencias en función del diámetro de tornillo. [10]	69
Tabla 8-1: Tiempos de secado recomendados para diferentes polímeros. [16]	93
Tabla 9-1: Potencias eléctricas aproximadas. [25]	113
Tabla 11-1: Características eléctricas motor.	128
Tabla 12-1: Características deshumidificador.	138
Tabla 12-2: Consumo energético a capacidad de diseño.	146
Tabla 12-3: Presupuestos de los equipos principales	147
Tabla 12-4: Precios de los componentes en base a la capacidad de diseño.	148
Tabla 12-5: Cálculo de la inversión fija total.	149
Tabla 12-6: Precio insumos puestos en fábrica	150
Tabla 12-7: Estimación de costos fijos.	153
Tabla 12-8: Valores costos fijos.	153
Tabla 12-9: Método de cálculo de costos variables.	154
Tabla 12-10: Costos anuales	155

Figuras

Figura 2-1: Flujo de masa del plástico producido en 2022. [3]	3
Figura 2-2: Consumo de plástico y sus destinos. 2024. [4]	3
Figura 2-3: Etapas del reciclaje mecánico. [7]	5
Figura 2-4: Adopción del reciclaje mecánico para producción de botellas.....	7
Figura 2-5: Proceso de transformación química para PET PCR grado alimenticio. [5] .	8
Figura 2-6: Taller Protegido Necochea - Galpón del complejo Jesuita Cardiel	11
Figura 2-7: ONG "Todo para ellos". Clasificación de residuos.....	12
Figura 2-8: Botellas prensadas.	12
Figura 2-9: Sector de lavado de escamas.....	13
Figura 2-10: Bolsón de escamas.....	13
Figura 2-11: Escamas de PET cristal.....	14
Figura 3-1: Estructura química de un monómero de PET.....	16
Figura 3-2: Comportamiento térmico de polímeros. [2]	16
Figura 3-3: Clasificación de partículas sólidas. [15].....	19
Figura 3-4: Escamas de PET cristal producidas por la ONG.....	19
Figura 3-5: Curvas de flujo para polímeros. [10]	22
Figura 3-6: Comparación entre agua y un fluido no newtoniano. [2].....	22
Figura 3-7: Ley de potencia aproximada. [15]	23
Figura 3-8: Curvas de flujo para PET. [11]	24
Figura 3-9: Expansión de la sección del extruido por viscoelasticidad. [1]	25
Figura 4-1: Diagrama esquemático de una extrusora de tornillo simple.	26
Figura 4-2: Mezclador LeRoy/Maddock. [10].....	27
Figura 4-3: Mezclador tipo CRD. [15].....	28
Figura 4-4: Mezclador con Pines [15].....	28
Figura 4-5: Mezclador tipo Saxton [15].....	29
Figura 4-6: Tornillo de barrera. [11].....	29
Figura 4-7: Distribución del material en un tornillo con barrera. [15].....	30
Figura 4-8: Desarrollo del canal del tornillo con barrera. Modelo tipo Maifeller. [15]...	31
Figura 4-9: Tornillo tipo Barr. [15].....	31
Figura 4-10: Tornillo venteado.	32
Figura 4-11: Bomba de engranajes.....	33
Figura 4-12: Camisa estriada [15].....	34
Figura 4-13: Extrusora de doble tornillo. [10].....	35
Figura 4-14: Comparación entre tornillos corrotantes y contrarrotantes.	36

Figura 4-15: Tornillos contrarrotantes con entrelazamiento, con mezcladoras. [11]	37
Figura 4-16: Tornillo contrarrotante sin engrane	37
Figura 4-17: Doble tornillo corrotante de alto grado de engrane. [15].....	38
Figura 4-18: Esquema eléctrico de un variador de frecuencia. Fuente: DANFOSS....	41
Figura 4-19: Control de velocidad por potenciómetros. Fuente: DANFOSS.	41
Figura 4-20: Capacidad de medición de termocuplas. [15].....	42
Figura 4-21: Extrusora MRS [21].....	45
Figura 4-22: Sistema de reciclaje de PET USEON [14].....	45
Figura 4-23: Producción de filamentos de rPET [23]	46
Figura 4-24: Filamento de botella PET [22]	47
Figura 5-1: Extrusora a estudiar. [24]	48
Figura 5-2: Componentes de la máquina, en el estado inicial del proyecto.	49
Figura 5-3: Comparación entre modelos de tolvas. [15]	50
Figura 5-4: Tolva Tipo Crammer. [13]	50
Figura 5-5: Detalle Tolva original.	51
Figura 5-6: Dimensiones tolva y fijación a la camisa.	51
Figura 5-7: Camisa de una extrusora.	52
Figura 5-8: Diferentes geometrías de gargantas de alimentación.	54
Figura 5-9: Detalle alojamiento camisa.	55
Figura 5-10: Esquemático de la camisa.	55
Figura 5-11: Diagrama esquemático del tornillo. [2]	56
Figura 5-12: Parámetros geométricos del tornillo. [11]	57
Figura 5-13: Tornillo en su estado original. Imagen Propia	60
Figura 5-14: Zona de fijación del tornillo.	61
Figura 5-15: Croquis esquemático de medidas del tornillo.	61
Figura 5-16: Comprobación del diámetro del tornillo.	62
Figura 5-17: Plato rompedor con sello en el final de la extrusora [11]	63
Figura 5-18: Detalle de conjunto de filtros + placas rompedoras. [10]	64
Figura 5-19: Cambiador de filtros manual. [10]	64
Figura 5-20: Sistema cambiador de filtros original manual.	65
Figura 5-21: Croquis del sistema original de cambio de filtros.....	65
Figura 5-22: Vista en corte de la sección transversal de un troquel circular [1]	66
Figura 5-23: Vista frontal de troquel con perfil extruido [2] p. 268.....	67
Figura 5-24: Cabezal original, con material remanente.	67
Figura 5-25: Croquis del cabezal	68

Figura 5-26: Detalle de la placa de datos. Imagen propia.	70
Figura 5-27: Esquema de la transmisión de una extrusora. [16].....	71
Figura 5-28: Poleas del reductor (izquierda) y motor (derecha).....	72
Figura 5-29: Correa BX 92	72
Figura 5-30: Corrección ubicación poleas	73
Figura 5-31: Reductor y soporte.....	74
Figura 5-32: Detalle asiento del tornillo	74
Figura 5-33: Croquis esquemático reductor	75
Figura 5-34: Croquis detalle transmisión del sistema	75
Figura 5-35: Representación esquemática de la fijación del tornillo. [15]	76
Figura 5-36: Resistencias tipo abrazadera.....	77
Figura 5-37: Pirómetro original. Imagen propia.	79
Figura 5-38: Tablero de protección y comando de la pelletizadora. Imagen Propia....	80
Figura 5-39: Tablero General de Control y Potencia. Imagen Propia	81
Figura 5-40: Caja de pase de la extrusora. Imagen propia.....	81
Figura 6-1: Repuestos Extrusora SIAT.....	82
Figura 6-2: Extrusora recuperadora. Tenaris SIDERCA.....	83
Figura 6-3: Extrusora de film. Plásticos del Mar.	83
Figura 6-4: Cabezal y cambiador manual de filtros. Plásticos del mar.....	84
Figura 6-5: Tablero de Extrusora de Film de PE. Fuente: Plásticos del Mar.....	84
Figura 6-6: Control para extrusora recuperadora. Fuente: INTEMA.	85
Figura 7-1: Esquema de un horno de secado. [16].....	86
Figura 7-2: Diagrama de un Calentamiento en Tolva. [16]	87
Figura 7-3: Horno de secado de escamas de PET. INTEMA	88
Figura 7-4: Esquema con equipamiento para pelletizado.....	89
Figura 7-5 Pelletizadora original de la extrusora.	90
Figura 8-1: Influencia de la humedad en las propiedades mecánicas del PET [2]	92
Figura 8-2: Absorción de humedad del PET. [12].....	92
Figura 8-3: Generación de Acetaldehído en función de diferentes variables [12]	94
Figura 8-4: Formación de acetaldehído en función de la velocidad del husillo	94
Figura 9-1: Diseño de la tolva existente en la extrusora	96
Figura 9-2: Tipos de flujo que pueden ocurrir en una tolva.....	97
Figura 9-3: Vista en corte del detalle del canal de una extrusora. [19]	99
Figura 9-4: Fusión del material en una extrusora. [19]	99
Figura 9-5: Caudales en el canal del tornillo. [10].....	100

Figura 9-6: Comportamiento del fundido y el sólido en el canal del tornillo. [10]	100
Figura 9-7: Perfil de velocidades en una sección del canal. [15]	101
Figura 9-8: Mezclado dispersivo.	101
Figura 9-9: Mezclado distributivo.	102
Figura 9-10: Análisis del canal del tornillo. [11]	103
Figura 9-11: Movimiento de un fluido entre placas paralelas. [1].....	104
Figura 9-12: Gradiente de presión a lo largo de una extrusora. [1].....	105
Figura 9-13: Factores de forma para los caudales. [11]	106
Figura 9-14: Curva característica de la extrusora.....	110
Figura 9-15: Característica del Tornillo	111
Figura 9-16: Ejemplos de pérdida de energía en una extrusora refrigerada [2]	113
Figura 9-17: Balance energético [28]	114
Figura 9-18: Tasa de corte en el polímero. [19].....	116
Figura 10-1: Extracto de comunicación con CAIRPLAST	122
Figura 11-1: Croquis tornillo nuevo.	123
Figura 11-2: Croquis camisa nueva.....	124
Figura 11-3: Croquis estructura.....	125
Figura 11-4: Corrosión en el acople del tornillo	126
Figura 11-5: Motor WEG.	127
Figura 11-6: Interruptor automático con mando en puerta.....	129
Figura 11-7: Contactor trifásico con bobina en 220 VCA.....	130
Figura 11-8: Distribuidor de corriente.	130
Figura 11-9: Variador de frecuencia Siemens para motores de 11 kW.....	131
Figura 11-10: Disyuntor trifásico en redes sin neutro.	131
Figura 11-11: PIA Siemens. Curva C	132
Figura 11-12: Relé de estado sólido.....	132
Figura 11-13: Bornera portafusible.....	133
Figura 11-14: Pirómetros digitales de control de temperatura. Novus 1030	133
Figura 11-15: Control del variador.....	134
Figura 11-16: Panel de operación del variador.....	135
Figura 12-1: Deshumidificador CABB. Imagen ilustrativa.	138
Figura 12-2: Panel de operación.	143
Figura 12-3: Estructura de costos de producción a la capacidad de diseño.	156
Figura 13-1: Ladrillo fabricado con adición de escamas de PET.....	159
Figura 15-1: Curva de costos de producción según capacidad.	164

Resumen

La Asociación Civil “Todo para Ellos” emplea personas con discapacidad en diversas tareas relacionadas al reciclaje de residuos en la ciudad de Necochea. A mediados de 2024, se dirigió a la Universidad Nacional de Mar del Plata, solicitando ayuda técnica para reacondicionar una máquina extrusora de plástico con el fin de producir pellets de polietileno-tereftalato (PET) a partir de envases de botellas. El objetivo inicial del proyecto era realizar el estudio técnico y el análisis económico para reacondicionar la máquina en conjunto con Escuelas Técnicas de la ciudad de Necochea.

Se llevó a cabo un relevamiento integral de la extrusora existente en el Taller. Se estudió el proceso de reciclaje de PET, haciendo foco en la extrusión de material reciclado. Se definieron los principales componentes a reemplazar o actualizar para llevar adelante el proceso con las condiciones requeridas.

Se realizó un análisis económico basado en presupuestos de repuestos, equipos, y costos. La información técnica se complementó con el aporte de diversos actores involucrados en el mercado del reciclaje de plásticos y la industria recicladora.

A partir de todo lo estudiado se concluyó que, si bien el reacondicionamiento es técnicamente factible, el proyecto es económicamente inviable bajo las condiciones de producción y precios de mercado tomando como referencia el mes de agosto de 2025. El costo estimado de producción supera ampliamente el de los pellets reciclados y vírgenes.

Como cierre del proyecto, se dejan documentados el reacondicionamiento eléctrico y mecánico proyectados a modo referencial o esquemático, junto con el estudio realizado y sus conclusiones, con entrega a la Asociación. Se incluyen también recomendaciones de seguridad operativa, instructivos de montaje de la máquina, manuales de operación y mantenimiento.

Palabras clave: conformado de plásticos, extrusora monohusillo, pelletizadora, relevamiento mecánico, relevamiento eléctrico, reacondicionamiento, análisis económico, estudio de factibilidad, reciclaje, Polietileno-Tereftalato, PET, Higroscopía, Necochea, personas con discapacidad, economía circular.

Abstract

The nonprofit organization “Todo para Ellos” employs people with disabilities in various waste-recycling tasks in the city of Necochea. In mid-2024, it approached the National University of Mar del Plata, requesting technical assistance to refurbish a plastic extrusion machine, which would be used to produce polyethylene terephthalate (PET) pellets from discarded bottle containers. The initial objective of the project was to carry out a technical study and economic analysis to refurbish the machine in up-to-date status. Installation and mounting would be coordinated with a Technical Secondary School located in Necochea.

A comprehensive inspection of the existing extruder in the workshop was conducted. The PET recycling process was studied, focusing on the extrusion and drying stages. The main components to be replaced or upgraded were defined to adapt the extruder for the desired process conditions.

An economic analysis was performed based on quotations for spare parts, equipment, and associated costs. The technical information was complemented by contributions from various participants involved in the plastics recycling market and the recycling industry.

Based on the results of the study, it was concluded that although the revamping is technically feasible, the whole project is economically unviable under the production conditions and market prices as of August 2025. The estimated production cost significantly exceeds that of both recycled and virgin pellets.

To conclude the project, the projected electrical and mechanical refurbishment was documented in a referential or schematic manner, together with the study performed and its conclusions, and delivered to the association. Operational safety recommendations, mounting instructions for the machine, and operation and maintenance manuals are also included.

Keywords: plastics forming, single-screw extruder, pelletizer, mechanical evaluation, electrical evaluation, reconditioning, economic analysis, feasibility study, recycling, polyethylene terephthalate, PET, Hygroscopic, Necochea, people with disabilities, circular economy.

1. Objetivo

En este Trabajo Final de Grado se propone estudiar y analizar el reacondicionamiento completo de una máquina extrusora de plástico. La extrusora a estudiar es propiedad de la Asociación de Padres y Amigos del Discapacitado “Todo Para Ellos”, que tiene sede en la ciudad de Necochea. Se busca adaptarla y optimizarla para el uso que se le dará en el Taller Protegido Productivo que posee la Asociación, que emplea a personas con discapacidad.

El objetivo global es estudiar el proceso de extrusión y la maquinaria requerida para procesar de manera eficiente y rentable el PET que hoy en día ingresa a la planta en forma de botellas y envases post-consumo. Se propone desarrollar el proyecto a partir de los siguientes puntos:

- Relevamiento íntegro del estado de sus componentes.
- Estudio del sistema sobre su aptitud para el reciclaje de PET.
- Confección de instructivos y planos de ensamble eléctrico y mecánico.
- Listado de insumos y componentes faltantes a comprar.
- Análisis de viabilidad económica.
- Confección de manual de operación adaptado a las necesidades del Taller.
- Recomendaciones de seguridad y operación.

2. Introducción

Antes de comenzar con la explicación técnica de los arreglos e instalaciones necesarias para poner nuevamente en funcionamiento la máquina es importante tener un conocimiento general sobre el proceso de extrusión. En la siguiente sección se explican varios aspectos relevantes sobre la extrusión y el reciclaje.

2.1. Extrusión

Se denomina extrusión a todo proceso de compresión donde se fuerza a un material a fluir a través de un orificio practicado en un troquel o matriz, para obtener un continuo de masa con una sección de forma deseada. Puede ser un proceso primario de fabricación, donde se produce materia prima (como filamento) para ser procesada y conformada en un proceso posterior, o un proceso secundario donde lo obtenido es un producto con su forma final.

La extrusión de polímeros se basa en aprovechar sus propiedades termoplásticas. Estos materiales se vuelven maleables y fluyen a altas temperaturas por lo que pueden ser forzados a pasar a través de una matriz con un orificio con una forma geométrica deseada luego de ser calentados.

Esto permite producir en masa artículos como tubos, ductos, mangueras, molduras, hojas, películas/films, recubrimientos para cables o filamentos a partir de la materia prima. [1] Al ser un proceso continuo, se tienen buenos costos de producción por hora a comparación de procesos como moldeo por inyección o soplado. Se trata de máquinas muy versátiles con diferentes aplicaciones. Debido a estos puntos, las extrusoras son las maquinarias de producción más importantes dentro de la industria del plástico desde el punto de vista económico. [2]

2.2. Plásticos - PET

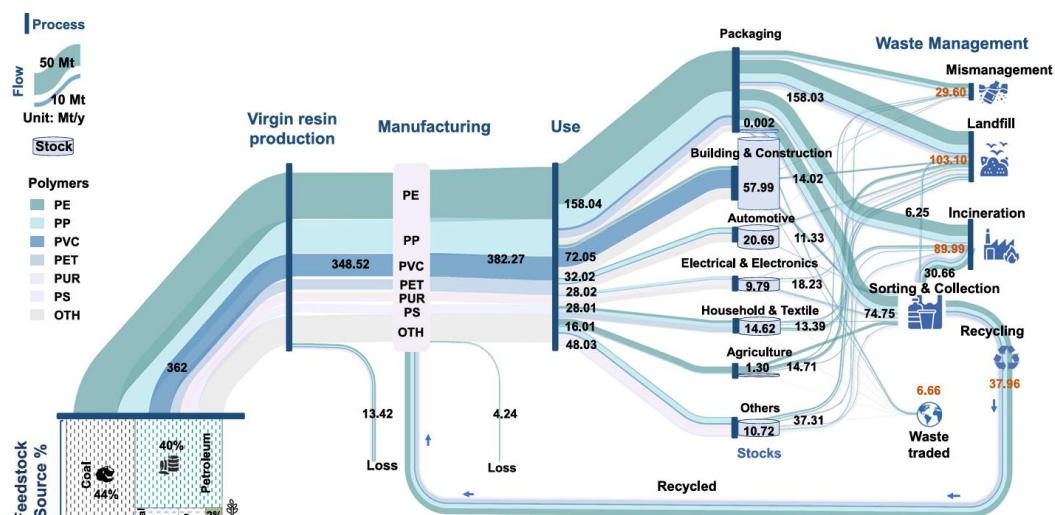


Figura 2-1: Flujo de masa del plástico producido en 2022. [3]

El plástico es uno de los materiales más utilizados en el mundo, debido a su versatilidad, durabilidad y relativo bajo costo. Se pasó de producir 2 millones de toneladas anuales en 1950 a 400 millones en 2022. De ese total, 38 millones de toneladas (9,5%) se produjeron a partir de plástico reciclado. De lo producido como plástico virgen, el 98% partió de fuentes fósiles y con un 2% fue producido mediante biomasa. [3]

El polímero más producido es el polietileno (PE), con un 26% de la producción mundial. Por su parte, el polipropileno (PP) ocupa el 19% de la producción y el policloruro de vinilo (PVC) ocupa el 3%. El polietileno tereftalato (PET) que ocupa un 2% de la producción mundial.

Puesto que la materia prima principal para la fabricación de estos materiales son los derivados del petróleo, toda la producción de material virgen tiene un alto impacto ambiental. El 70% del plástico producido termina siendo desechado [4] con lo que el reciclaje es un aspecto fundamental en el manejo y la optimización del uso de todos los plásticos.

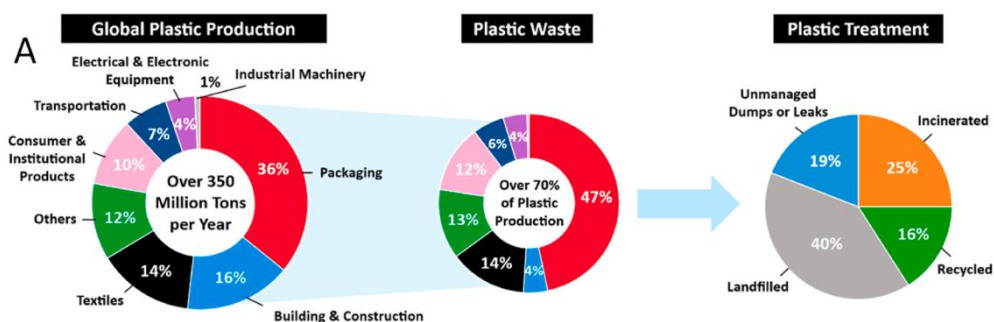


Figura 2-2: Consumo de plástico y sus destinos. 2024. [4]

El Polietileno Tereftalato o “PET” es un polímero de la familia de los poliésteres. Posee buena estabilidad dimensional, buena resistencia, y es resistente químicamente a sustancias corrosivas. Se utiliza para el embotellado de bebidas, empaquetado de alimentos, industria textil, componentes automotrices, electrónica, construcción, entre otros.

Su amplia utilización como envases conlleva un problema en cuanto a los residuos generados. Las botellas de PET pueden tardar hasta 500 años en biodegradarse [5]. Una gran parte de lo producido termina siendo desechada, al ser parte de empaquetados alimenticios. La implementación del reciclaje de manera efectiva siempre enfrenta desafíos en cuanto a la viabilidad económica y la calidad del producto reciclado [4]. También es un inconveniente lograr una separación efectiva de materiales y una buena limpieza de cada ítem. Sin embargo, el pellet de plástico reciclado requiere menos energía para ser producido que un pellet de tamaño similar virgen. Por lo tanto, se vuelve una alternativa interesante para aplicar.

Table 3A. Environmental profile for 1 kg of PET bottle

	Energy requirement (MJ)	Emission (g)	Greenhouse gases (kg CO ₂ -eq)
PET production	83.80	2433.20	2.35
Waste recycled	27.10	170.25	0.98
Waste landfilled	60.00	2177.78	44.65
Waste incinerated	32.50	2019.65	1.95

Tabla 2-1: Consumo energético en el manejo de una botella PET. [4]

Se observa en Tabla 2-1 el consumo energético involucrado en la producción de una botella de PET. Reciclar una botella requiere un menor gasto energético y una menor emisión de gases de efecto invernadero si se compara con la producción a partir de plástico virgen, depositarla en un relleno sanitario o incinerarla.

2.3. Reciclaje

El reciclaje de PET fundamentalmente involucra el fundido de material post consumo para formar pellets. Los pellets se utilizan como materia prima en otros procesos de conformado para piezas nuevas.

Es muy importante tener en cuenta el uso que se le dará al producto. En función de la exigencia requerida el proceso de recuperación es de complejidad variada. Si se lo quiere utilizar para producir envases alimenticios, debe cumplir con los requerimientos de la norma MERCOSUR/GMC/RES N°30/07 internalizada en el Capítulo IV del Código Alimentario Argentino (CAA) [5]. A este tipo de pellet se lo denomina PET Post Consumo Reciclado Grado Alimentario. Debido a las características del proceso, es el pellet más caro comercializado en el país. El tipo más común de PET post consumo producido en el país no es de grado alimenticio. Se utiliza para la producción de fibras, films, o envases no alimentarios.

2.3.1. Reciclaje mecánico

Una manera eficiente y relativamente económica de reciclar el PET es mediante **reciclaje mecánico**. Se parte de material post consumo o post industrial y mediante procesos sencillos se obtienen “pellets” de material, que funcionan como materia prima a utilizar como suplemento del plástico virgen. Se produce así un modelo de economía circular que reduce: el material en vertederos, costos, consumo energético, y genera puestos de trabajo. [4] Es un tipo de reciclaje que consume poca energía y permite manejar un gran volumen de material (dependiendo de la maquinaria utilizada) de manera continua.

El PET es un material conveniente para realizar este proceso, por tratarse de un polímero termoplástico que puede soportar varios ciclos de procesado. Sin embargo, no posee vida infinita, dado que con cada iteración sucesiva el material sufre una degradación progresiva en calidad y resistencia dado que las cadenas poliméricas tienden a romperse durante la extrusión, debido a las altas temperaturas y grandes esfuerzos alcanzados. [6] Otro punto importante a tener en cuenta es que con cada iteración de reciclaje se mezclan botellas y envases que provienen de diferentes plantas y líneas de fabricación, con lo que presentan diferencias a nivel molecular y en cantidad de contaminantes [6], lo que implica menor homogeneidad en el material y una mayor necesidad de mezclado. Además, por las características de alta resistencia mecánica del PET se requieren componentes de alta dureza y costo para su procesado, como cuchillas y prensas.

Se detallan a continuación las etapas del reciclaje mecánico, ya que es el de mayor interés para el proyecto en cuestión.

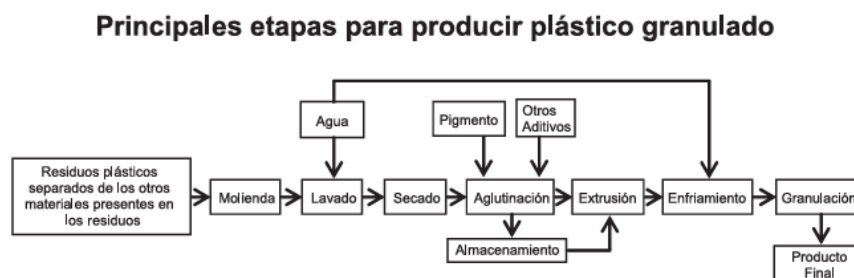


Figura 2-3: Etapas del reciclaje mecánico. [7]

Está compuesto por:

Clasificación: En la etapa de clasificación, se seleccionan y separan los plásticos. La etapa es vital para impedir la presencia de polímeros u otros materiales que condicionen la calidad del producto. Mientras más homogéneo el tipo de plástico separado mejor calidad de material reciclado se obtendrá. Existen diversas técnicas de separación basadas en métodos físicos, como la flotación-hundimiento basada en la diferencia de densidad, la utilización de

disolventes, técnicas espectroscópicas, técnicas electrostáticas, entre otras [6]. La forma más directa es la separación manual utilizando mano de obra entrenada para separar diferentes materiales. Es la que consume más fuerza de trabajo al ser totalmente manual.

Remoción de etiquetas y tapas: Para el caso particular de las botellas de bebidas se debe remover todo el material que no sea PET del envase. Las tapas de polipropileno se remueven en una primera instancia. Luego, se separan las etiquetas de los envases. Es importante limpiar el pegamento del envase, dado que tiende a permanecer en la mezcla y contaminar el producto reciclado.

Trituración: En esta etapa se lleva a cabo la trituración o molienda del plástico, con el objetivo de obtener partículas de material de tamaño, forma y peso homogéneas. Asegura mayor consistencia en las propiedades y aumenta el área efectiva de cada tanda de material, mejorando el secado. [6] Para realizarla se utilizan máquinas trituradoras de rodillos con cuchillas de acero inoxidable de alta dureza, accionados por un motor eléctrico.

Lavado: Es una etapa fundamental para eliminar cualquier tipo de suciedad o impureza del plástico triturado. Se realiza mediante procesos de lavado, aclarado y centrifugación (secado). Puede realizarse con agua fría o caliente.

Secado y embolsado: La granza reciclada húmeda se pasa por una centrifugadora que remueve la humedad inicial. Una vez que la granza está seca, se transporta mediante una corriente de aire a una tolva, a través de la cual se van llenando bolsones para almacenar las escamas.

Los procesos descriptos hasta el momento están implementados actualmente en el Taller Protegido. Las etapas descriptas a continuación requieren la instalación de componentes extra y la adopción de una extrusora.

Secado final: Es una etapa fundamental para el procesamiento del PET, debido a las características del material. Más allá de la humedad superficial es importante que el contenido de humedad en el interior de la escama sea muy bajo, dado que el material se degrada ante la presencia de agua en la extrusión. Se pueden utilizar hornos de secado con desecantes donde se depositan las escamas en bandejas, para reducir al máximo la humedad tanto a nivel superficial como en el interior del material.

Extrusión: Es la etapa de reprocesamiento real del material. Las escamas ingresan en una extrusora donde son comprimidas, empujadas hacia delante, y luego fundidas por acción de un tornillo sin fin. Al salir por el cabezal se moldea el todo el material fundido en forma de filamentos.

Enfriado: Posteriormente, los filamentos se enfrían con agua en una pileta dedicada. Son traccionados hacia delante por una bobinadora o por la propia pelletizadora.

Pelletizado: Finalmente, se corta en pequeños trozos con una hélice o pelletizadora, obteniendo el pellet reciclado. De ser necesario, se somete al plástico a una nueva etapa de secado para mantener bajos niveles de humedad.

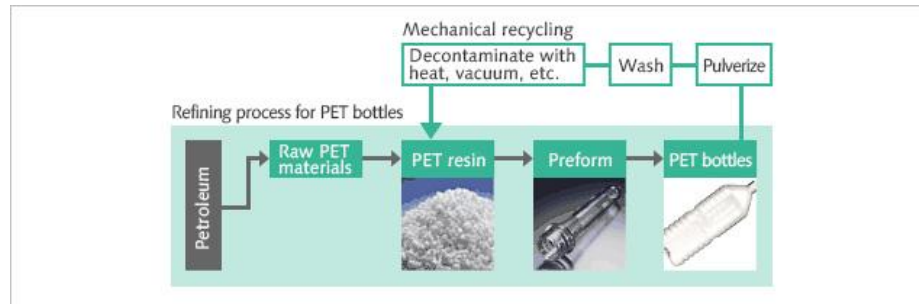


Figura 2-4: Adopción del reciclaje mecánico para producción de botellas.

El reciclaje mecánico es uno de los pasos del reciclado “botella a botella” donde se utilizan los pellets extruidos provenientes de botellas de bebidas para fabricar nuevas botellas. Esto reduce el consumo energético y permite darles un uso a los pellets. Es importante lograr Pellets de grado alimenticio, para lo cual son necesarias etapas extras explicadas en la sección 2.3.2.

2.3.2. Reciclaje químico

El reciclaje mecánico es el método más económico. El principal inconveniente que presenta es la degradación de las propiedades químicas, mecánicas y físicas del material a través de las sucesivas iteraciones de reciclaje. Cuando el material llega a un estado en el cual ya no es eficiente el reciclaje mecánico, suele utilizarse el **reciclaje químico**. Involucra la separación del polímero mediante diferentes reacciones químicas en sus monómeros constituyentes para luego re-polimerizarse, y así recuperar características cercanas al polímero virgen. En este contexto surgen diferentes alternativas para el reciclaje del PET, dado que la polimerización permite el añadido de aditivos que modifiquen las propiedades del material. En una primera instancia se despolimeriza el material, calentándolo en una atmósfera con exceso de metanol y un catalizador. Esto rompe al PET en sus monómeros constituyentes. Luego se lleva a cabo un proceso de purificación limpiando contaminantes, y por último se realiza la re-polimerización mediante calor y catalizadores en un reactor dedicado. [4].

Otro método que mejora las características del material reciclado mecánicamente es la cristalización. El PET extruido presenta una estructura amorfa debido a la rápida velocidad de enfriamiento. Se lo coloca en una cámara donde es expuesto a una atmósfera específica

durante un cierto tiempo, lo que posibilita que las cadenas poliméricas se ordenen hasta obtener un cierto grado de cristalinidad.

La última etapa del proceso es la policondensación en estado sólido. Se hace pasar al pellet a través de un reactor que recorre por gravedad, donde queda expuesto a vacío y una temperatura superior a su temperatura de transición vítrea. En esas condiciones las cadenas poliméricas pueden extenderse, mejorando las propiedades químicas y mecánicas del material. [6] Se obtienen así pellets de PET de grado alimenticio.

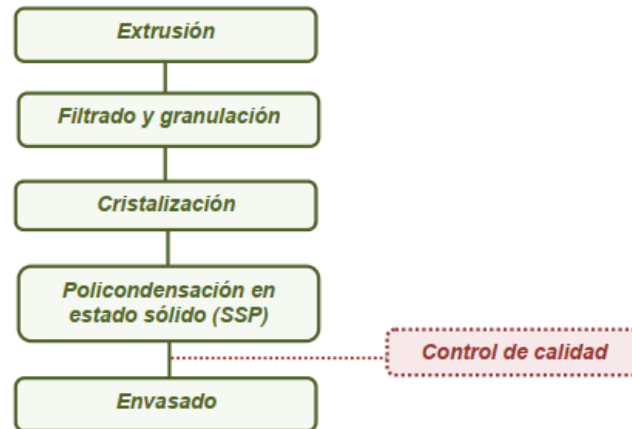


Figura 2-5: Proceso de transformación química para PET PCR grado alimenticio. [5]

Debido a los altos costos que supone cualquier tipo de reciclado químico se decide producir PET PCR de grado no alimenticio. El volumen de material a procesar y la inversión necesaria vuelven poco conveniente la implementación de esta tecnología.

2.3.3. Reciclaje en el mundo

En la actualidad el desarrollo de tecnologías para el reciclado de plástico está en constante cambio e innovación. Sin embargo, los precios de mercado del plástico virgen y el encarecimiento de los procesos de producción de reciclado mecánico y químico han generado una crisis en la Unión Europea con el cierre de diversas plantas de reciclaje [7]. El material virgen en la actualidad es más barato que el reciclado, con lo que muchos fabricantes de productos tienden a utilizar menor material reciclado. En EE. UU. algunas plantas recuperadoras se encuentran trabajando por debajo del 50% de su capacidad. En Asia, se observa una saturación en los mercados de pellets reciclados [7]. El objetivo impuesto en la Unión Europea es implementar un 30% de material reciclado en la producción de cualquier componente plástico para 2030, pero los últimos indicadores de las empresas y los fabricantes muestran que es una métrica difícil de alcanzar. [7]

2.3.4. Reciclaje en Argentina

En Argentina la adopción de tecnologías de reciclaje mecánico ha tenido un aumento marcado durante el período 2003-2022, como se puede ver en la Tabla 2-2: Según el Índice de Reciclados Plásticos en Argentina se reciclaron 318.000 toneladas de plástico en 2022, un valor 11% superior al año anterior. La tendencia durante la primera mitad de la década ha sido creciente: desde el 2003 la cantidad de plástico reciclado se incrementó en un 456%. [7] Sin embargo, durante 2023 se ha observado una disminución en la cantidad de toneladas recicladas del orden del 8%. Durante 2024 la tendencia ha empeorado, según la Cámara Argentina de la Industria del Plástico (CAIRPLAS): Se ha observado una disminución de las toneladas recicladas del orden del 20%. La industria del reciclado en Argentina presenta una capacidad ociosa del 50%.

La principal amenaza a la industria del reciclado es la baja de precios del material virgen [7], que genera que los fabricantes de envases y demás productos dejen de utilizar material reciclado. La principal ventaja del material reciclado era su menor costo. En calidad de material no es capaz de competir contra el material virgen debido a la naturaleza variada de la materia post-consumo.

En Argentina no existen regulaciones que obliguen a los productores a incorporar material reciclado. El Decreto 1/2025 sobre Residuos no peligrosos [8] señala la necesidad de establecer incentivos para el aprovechamiento de los residuos producidos en el país.

AÑO	RECICLADO MECANICO (ton)	RECUPERACION ENERGETICA (ton)	TOTAL (ton)
2003	57.100	S/D	57.100
2006	97.000	S/D	97.000
2009	150.000	S/D	150.000
2011	200.000	S/D	200.000
2013	223.000	S/D	223.000
2018	241.447	10.000	251.447
2019	251.917	23.300	275.217
2020	257.511	23.300	280.811
2021	285.861	20.800	306.661
2022	317.691	25.300	342.991
2023	294.078	33.058	327.136

**RECICLADO Y RECUPERACIÓN DE PLÁSTICOS EN ARGENTINA -
SERIE HISTÓRICA**

* Estimación elaborada por CAIRPLAS y ECOPLAS, con relevamiento de las industrias, y chequeada con información estadística aportada por la Cámara de la Industria Plástica (CAIP) y el Instituto Petroquímico Argentino (IPA).

* Recuperación energética: coprocesamiento de la industria cementera.

**RECICLADO Y RECUPERACIÓN DE PLÁSTICOS EN ARGENTINA -
SERIE HISTÓRICA**

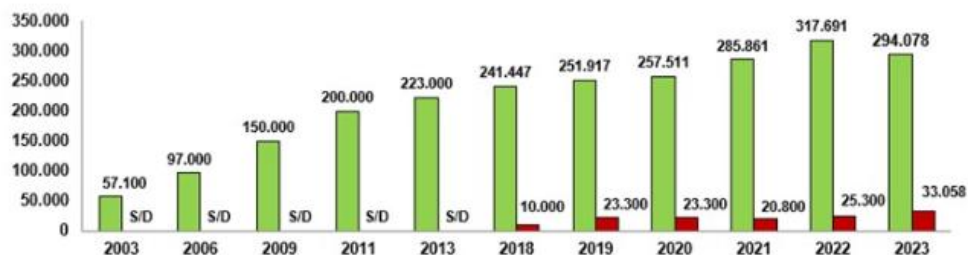


Tabla 2-2: Evolución del reciclado Plástico en Argentina [9]

Una de las principales causas de la disminución en el reciclaje es la falta de demanda de material reciclado en la fabricación de productos nuevos. El ingreso de materia prima virgen importada volvió poco competitivo al precio del pellet reciclado. El propio proceso de reciclaje se ha vuelto menos rentable debido a los aumentos en el costo de la energía. [7] Sin embargo, se señala que el reciclaje de PET es uno de los pocos sectores que aún se mantiene con un relativo funcionamiento.

2.4. Marco de trabajo – ONG “Todo para ellos”

La extrusora es propiedad de la ONG Asociación de Padres y Amigos del Discapacitado “Todo para ellos”. Se trata de una asociación con sede en Necochea que tiene como fin social mejorar la calidad de vida de personas con discapacidad. Para ello genera espacios para trabajar en la inserción social y laboral de las personas con capacidades diferentes.

La organización cuenta con un Taller Protegido Productivo donde trabajan en la recuperación de residuos sólidos urbanos (R.S.U) entre los que se encuentran el PET (Polietileno Tereftalato), el PEAD (Polietileno de Alta Densidad), el papel y cartón.



Figura 2-6: Taller Protegido Necochea - Galpón del complejo Jesuita Cardiel

El proceso de reciclaje de botellas de plástico comienza con la recolección de los envases usados. Los beneficiarios del Taller Protegido Necochea reciben grandes cantidades de este material diariamente, el cual proviene de los diferentes puntos limpios de acopio de los que dispone el Taller Protegido y que están distribuidos por la ciudad de Necochea. En la actualidad se procesan aproximadamente 1000 kilogramos de botellas diariamente.



Figura 2-7: ONG "Todo para ellos". Clasificación de residuos.

Dentro del taller, estos envases son sometidos a un proceso de clasificación y prensado, donde se agrupan por color.



Figura 2-8: Botellas prensadas.

Una vez terminan de ser clasificadas, las botellas de plástico pasan a la línea de procesado. Allí se le quitan las etiquetas y tapas, se lavan e inspeccionan. Antes de triturarlas pasan mediante una cinta transportadora por un imán que retira elementos metálicos ferrosos peligrosos para el proceso. Finalmente ingresan a la trituradora. Se trata de una máquina que produce escamas. Los plásticos ingresan a través de una tolva a una cámara. Allí se aloja un cilindro con cuchillas de acero inoxidable que gira accionado por un motor eléctrico, el cual tritura el material de entrada. Esto posibilita reducir el volumen que ocupa la materia prima,

obtener particulados mucho más fáciles de manejar, aumentar la relación superficie-volumen del material, y homogeneizar en tamaño, forma y peso cada partícula.

Las escamas trituradas ingresan nuevamente a un sector de limpieza. Inicialmente pasan por una sección de lavado con centrifugado, para luego pasar por piletas de separación por densidad. Allí se separa el plástico, que va hacia el fondo de las piletas, de la suciedad que acarrea el material.



Figura 2-9: Sector de lavado de escamas

Un operario remueve de la superficie todos los elementos que flotan, y las escamas se mueven por un sistema de tornillos sin fin que remueven el fondo. El agua es impulsada mediante una bomba que a través de un filtro para su limpieza y posteriormente vuelve al proceso.



Figura 2-10: Bolsón de escamas.

Finalmente, el material procesado es succionado por un compresor hacia la tolva, que donde se realiza el secado del material por centrifugado. De la tolva caen a bolsones. Estos bolsones de escamas de PET son actualmente el producto final vendido a diferentes consumidores.



Figura 2-11: Escamas de PET cristal.

Estas escamas constituyen la materia prima de la extrusora. En la extrusora se fundirán y extrudirán con forma de filamentos, los cuales luego ingresarán a una pelletizadora. En la actualidad las escamas son vendidas a diferentes productores en Buenos Aires, los cuales las utilizan como materia prima para producir diferentes productos, como escobas.

El principal objetivo que persigue la ONG con la incorporación de los pellets de PET como producto elaborado es lograr un mayor redito económico y poder de esta manera redistribuir esa ganancia entre las personas con capacidades diferentes que trabajan en el taller.

Hoy en día el Taller Protegido recibe unos 1000 [Kg/día] de envases de PET. Resulta de interés realizar una evaluación de la extrusora actual para determinar el caudal de material que sería capaz de procesar. A su vez, se decide analizar la inversión inicial requerida para poner en funcionamiento la extrusora, y la capacidad de recuperar dicha inversión.

3.Marco Teórico

El Polietileno Tereftalato (PET) es un polímero de la familia de los Poliésteres. Es el plástico habitualmente utilizado en los envases de bebidas como agua y gaseosas, por lo que es uno de los más consumidos y desechados en la actualidad. Por lo tanto, es importante conocer sus características más importantes para su reciclado. [4]

3.1. Propiedades físicas de los polímeros

Se denomina polímero a un compuesto químico formado por múltiples unidades de igual composición química, llamados monómeros, que se enlazan formando cadenas o redes. Los monómeros son compuestos orgánicos. Forma redes mediante una reacción llamada polimerización. [10]

Se denomina plástico a una mezcla de polímero con sustancias llamadas aditivos, que permite ser moldeada y utilizada en las aplicaciones deseadas. Los polímeros involucrados se suelen llamar macromoléculas debido al gran peso molecular de todo el conjunto. Pueden ser termoestables o termoplásticos. Los polímeros termoplásticos pueden calentarse hasta volverse fluidos para luego enfriarse múltiples veces, mientras que los termoestables no. [10] Esta propiedad permite el reciclaje de los materiales.

3.1.1. Estructura molecular

Los termoplásticos pueden ser clasificados a su vez en materiales amorfos o semi-cristalinos, en función de la organización de las cadenas. La gran longitud de las cadenas y el hecho de que muchas cadenas se hallan unidas formando redes impide que se forme una estructura totalmente cristalina al enfriarse. [10]

Un polímero es **amorfo** si su estructura de cadenas no está ordenada, sino que se halla enredada o formando hélices. Suele ser transparente o de color claro. No tiene una temperatura de fusión marcada, por lo que se puede trabajar a lo largo de un intervalo largo de temperaturas.

Los polímeros **semi-cristalinos** presentan una estructura de redes más ordenada. No forman cristales al 100% debido a la longitud de las cadenas, que impide que se ordenen eficazmente. Puesto que la estructura de cristal difunde la luz, no son transparentes. Presentan un punto de fusión más marcado que los amorfos. El PET es un polímero termoplástico de carácter semi-cristalino. Su composición química se muestra a continuación.

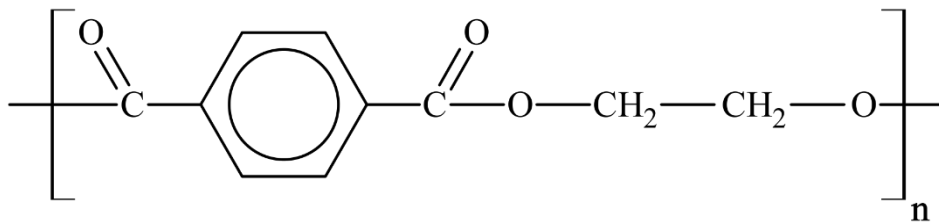


Figura 3-1: Estructura química de un monómero de PET.

En la Figura 3-2 se observa el cambio de volumen específico en función de la temperatura para un polímero termoplástico semi-cristalino y uno amorfo. Es notorio el cambio de volumen abrupto entre el estado sólido y el líquido para los semi-cristalinos.

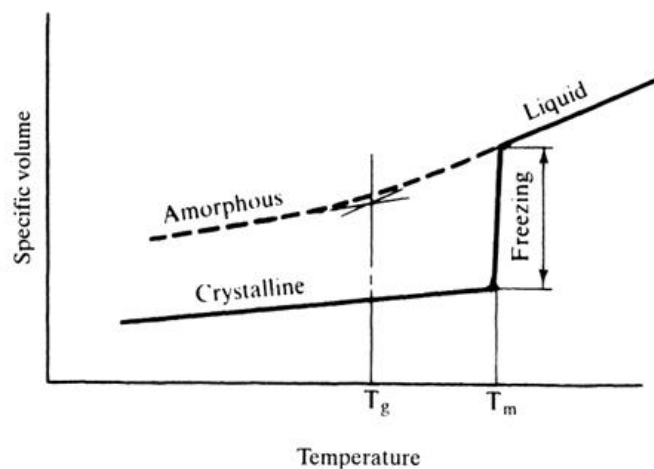


Figure 3.10 Solidification during processing of glassy/amorphous and crystalline TPs.

Figura 3-2: Comportamiento térmico de polímeros. [2]

Debido al cambio de volumen abrupto al atravesar la temperatura de fundido es muy importante que la etapa de enfriamiento del polímero se desarrolle de manera uniforme. De lo contrario, pueden aparecer defectos dimensionales, que reducen su calidad [10].

3.1.2. Temperaturas características

Los polímeros presentan dos temperaturas características. La más importante para los polímeros amorfos es la temperatura de transición vítrea (T_g), en la cual el polímero solidificado comienza a comportarse como un fluido de manera progresiva, al comenzar a desarmarse las estructuras de red de las moléculas. Para los semi-cristalinos, la temperatura

de proceso importante es la temperatura de fusión cristalina (T_m) donde las estructuras cristalinas terminan de desarmarse y el material pasa a ser amorfo.

Los polímeros semi-cristalinos como el PET deben ser extruidos y trabajados a una temperatura superior a T_m para fluir y mezclarse de manera uniforme. Por lo tanto, se requiere un mayor consumo energético para fundirlos, a comparación de los amorfos. Al pasar de estado semi-cristalino a amorfo se debe gastar energía en calor latente para la transición de fase. [11]

En el “Anexo I – Propiedades termofísicas de los polímeros ” pueden observarse las propiedades térmicas más importantes de algunos polímeros. Para el PET, la temperatura de fusión T_m es 250 [°C]. Por lo tanto, el perfil de temperaturas debe ubicarse por encima de la misma. Se observa que la temperatura de transición vítrea T_g es 70 [°C]. Por encima de esa temperatura la estructura cristalina comienza a desarmarse.

Table 1.3 Examples of melt temperatures in an extruder

Plastic	Temperature (°C)
Cellulose acetate	160–205
Cellulose acetate butyrate	160–205
Cellulose propionate	160–205
Ethylcellulose	190–230
FEP fluorocarbon	380–400
Ionomer	230–290
Nylon-6	250–270
Polycarbonate	290–300
Polyethylene, low-density	230–260
Poly(ethylene terephthalate)	285
Poly(methyl methacrylate)	180–210
Polypropylene	270–300
Polystyrene	240
Polyurethane elastomer	165–220
Poly(vinyl chloride)	
Rigid	160–165
Nonrigid	190–205
Copolyester	200–250
Chlorotrifluoroethylene copolymers	260–320
Vinylidene chloride – vinyl chloride copolymers	175–190

Tabla 3-1: Temperaturas de fundido de diferentes polímeros. [2]

En la Tabla 3-1 se observa la temperatura de trabajo sugerida para los diferentes plásticos. Se observa que se trabaja unos 45 [°C] por encima de la T_m , a 285 [°C]. [2]. Debe observarse que el perfil de temperaturas a lo largo del tornillo se analiza en detalle en la sección 4.3.2.

3.1.1. Viscosidad intrínseca

La viscosidad intrínseca es un parámetro que caracteriza el peso molecular del polímero. Indica indirectamente el tamaño de las moléculas. Se mide en unidades de $\left[\frac{dl}{g}\right]$

A lo largo de la extrusión la viscosidad intrínseca se reduce. Se debe a la degradación hidrolítica que sufre el polímero por la presencia de agua (ver sección 8.1.3) y por la degradación térmica del material al calentarse por encima de la temperatura de fusión. [12] Una menor viscosidad intrínseca “IV” implica un polímero más degradado. Por lo tanto, es un parámetro muy útil para caracterizar el estado del material a través de los sucesivos reciclados que puede experimentar.

Es muy útil para determinar el uso que se le puede dar al PET reciclado. Debido a las altas presiones durante el proceso de moldeo por soplado en la fabricación de botellas, se recomienda que la viscosidad intrínseca para PET grado botella debe oscilar entre 0,72 y 0,86, que le garantizan buenas propiedades mecánicas, alta cristalinidad y capacidad de funcionar como barrera contra gases [13]. Un plástico de VI menor es apropiado para procesos de hilado o fibra.

Se resumen en la Tabla 3-2 los valores de viscosidad intrínseca que recomienda USEON [14], un fabricante chino de extrusoras para diversas aplicaciones.

No.	Application	Intrinsic viscosity (IV)	Molar mass
1	Textile	0.64dl/g	15000-20000g/mol
2	Bottle	0.75-1.0dl/g	24000-36000g/mol
3	BOPET film	0.64dl/g	15000-20000g/mol
4	Sheet	0.7dl/g	20000-25000g/mol
5	Tire cord	1.0-1.2dl/g	36000-50000g/mol

Tabla 3-2: Valores de viscosidad intrínseca del PET en función de la aplicación [14].

3.2. Dinámica de sólidos – Propiedades

En una extrusora recuperadora el material ingresa en forma de partículas sólidas. Algunos parámetros son importantes para caracterizar el comportamiento de la máquina.

3.2.1. Tamaño y forma

El material que ingresa a la extrusora puede tener diferentes formas. Se pueden clasificar como polvos, partículas granuladas o escamas en función de su tamaño.

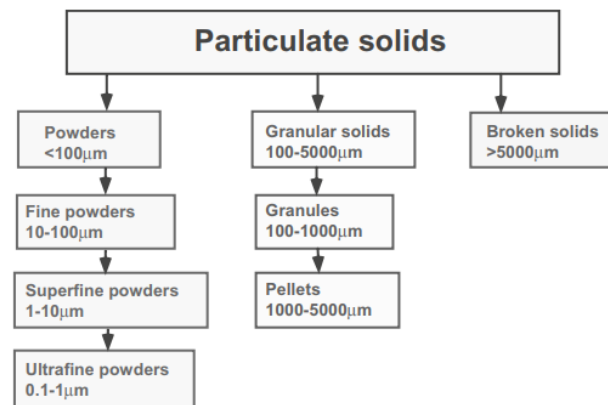


Figura 3-3: Clasificación de partículas sólidas. [15]

Se denominan polvos a aquellas partículas con un tamaño menor a 100 μm . Gránulos son aquellas partículas con un tamaño de entre 100 μm a 1000 μm . Los pellets son aquellos particulados con un tamaño de entre 1000 μm a 5000 μm . Por último, se denominan escamas a aquellos sólidos de un tamaño mayor a 5000 μm .



Figura 3-4: Escamas de PET cristal producidas por la ONG

Los sólidos por analizar para el funcionamiento de la extrusora son las escamas. Son obtenidas a partir de una trituradora que procesa las botellas o envases de PET, que entrega partículas de entre 0,4 a 0,8 mm de grosor y aproximadamente 25 mm de diámetro [6]. Se

obtiene un buen tamaño y relación superficie volumen para ser procesado, pero cada partícula puede ser diferente en conformación y forma a sus vecinas. Además, la forma de las escamas propicia el atrapamiento de aire entre ellas. Por lo tanto, para el conformado de material es necesaria una etapa de fundido y extrusión que produzca pellets más homogéneos y manejables.

3.2.2. Densidad aparente

Se denomina densidad aparente a la densidad del polímero en el estado granulado, particulado o escamado. Tiene en cuenta los resquicios ocupados por aire que aparecen por la forma de las partículas. Mientras menor sea la densidad aparente, se tiene una mayor cantidad de aire atrapado entre las partículas.

Si la cantidad de aire es tal que no puede escapar una vez que entra en la extrusora, se pueden generar huecos en el material fundido que rompen el material de salida. Para solucionarlo deben utilizarse tolvas tipo Crammer [2], las cuales contienen un tornillo sinfín simple para mejorar el flujo y asegurar que sea uniforme. Otra alternativa es utilizar extrusoras venteadas para permitir a los gases escapar. En la sección 8.1.5 se releva en detalle como el aire afecta las propiedades del extruido.

3.3. Dinámica de fluidos - Propiedades

En el estado fundido dentro de la extrusora el material fluye, impulsado por la fricción que aparece por la diferencia de velocidad entre las partículas que giran con el tornillo y las paredes de la camisa. Se da un caso de flujo de corte o de cizallamiento, en el que una capa de fluido se desplaza sobre otra debido a esfuerzos de corte transmitidos desde una cara del canal donde circula. [10]

Para que suceda esto es fundamental que la fricción entre el material y el tornillo sea baja, pero sea muy alta en la interfaz material-camisa. Si no se cumple, el plástico rotaría con el tornillo y no tendría avance en la dirección axial del tornillo. [2]

3.3.1. Esfuerzo de corte

Se denomina esfuerzo de corte a la fuerza aplicada de manera paralela a una de las caras de un elemento de masa. Se representa por la letra τ .

3.3.2. Tasa de cizallamiento o corte

En un sólido, al aplicar esfuerzos de tensión o de corte se produce una deformación proporcional según la ley de Hooke. En un fluido, el esfuerzo aplicado no es proporcional a la deformación, sino que está relacionado a la tasa de cambio del esfuerzo de corte que sufre el fluido. [11] Entonces, para el caso en el que el esfuerzo principal es un **esfuerzo de corte** o cizalla el parámetro a observar es **la tasa de cizallamiento** $\dot{\gamma}$ la cual tiene unidades de $\left[\frac{1}{s}\right]$.

$$\dot{\gamma} = \frac{dv_x}{dy}$$

Se expresa en este caso como la variación de la velocidad en una dirección con respecto a una dirección normal a ella. Mientras mayor es, la velocidad de corte entre las capas de fluido es mayor.

Si la tasa de cizallamiento es proporcional al esfuerzo de corte, se dice que el fluido es Newtoniano y la relación entre los dos se denomina **viscosidad** η [11]. Se representa por la expresión:

$$\eta = - \frac{\tau_{yx}}{\left(\frac{dv_x}{dy}\right)}$$

Tiene unidades de $[Pa \cdot s]$. τ_{yx} es el esfuerzo de corte y $\frac{dv_x}{dy}$ es el gradiente de velocidad del fluido en la dirección normal a su velocidad, la cual es coincidente con la tasa de cizallamiento $\dot{\gamma}$.

3.3.3. Viscosidad y curvas de flujo

Puesto que la viscosidad de los fluidos no newtonianos varía con la tasa de cizallamiento se debe trabajar analizando a la viscosidad en función de la tasa de corte.

Los polímeros en su estado fundido se consideran **fluidos pseudo-plásticos**, donde la viscosidad disminuye con el aumento del esfuerzo de corte. Por lo tanto, se grafican curvas midiendo el esfuerzo de corte contra la tasa de cizallamiento. La pendiente de dicha curva es la viscosidad en función de la tasa de cizallamiento.

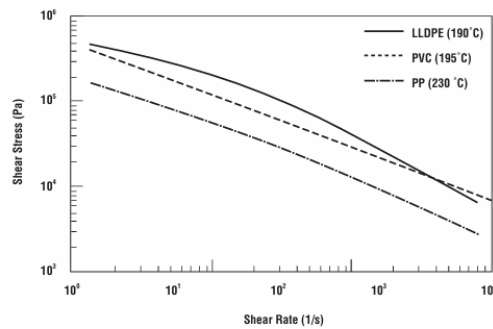


Figure 8a. Viscosity Curves for Some Commodity Thermoplastic

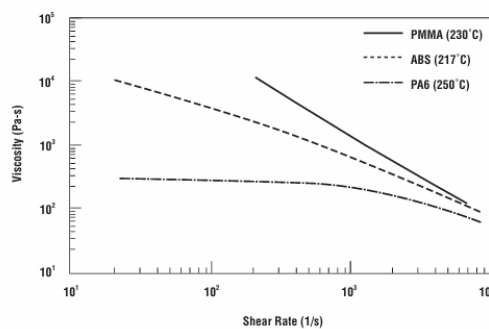


Figura 3-5: Curvas de flujo para polímeros. [10]

En la Figura 3-5 se observa como el esfuerzo de corte y la viscosidad se reducen con el aumento de la tasa de cizallamiento.

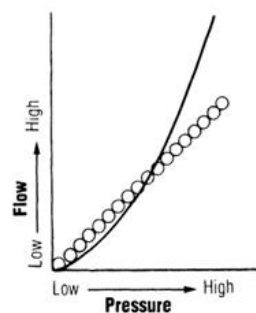


Figure 3.6 Rheology and flow properties of plastics (solid line) and water (circles).

Figura 3-6: Comparación entre agua y un fluido no newtoniano. [2]

En la Figura 3-6 se observa la relación presión caudal obtenida en un fluido no newtoniano. Se observa que un aumento de presión se refleja en un aumento más que lineal del caudal.

3.3.4. Ley de Potencia

Otra manera de trabajar la viscosidad de los polímeros es utilizando modelos empíricos. El comportamiento pseudo plástico de los polímeros puede modelarse con bastante exactitud con la ley del índice de potencia o relación de Ostwald-De Waele. Se basa en que, para intervalos limitados de tasa de corte, en un gráfico doble logarítmico se puede aproximar con una recta la variación de la viscosidad. [15] Esto aplica solamente para fluidos con un componente de velocidad unidireccional. Sin embargo, puede aproximarse su uso de manera aceptable para el cálculo de la viscosidad de muchas aplicaciones.

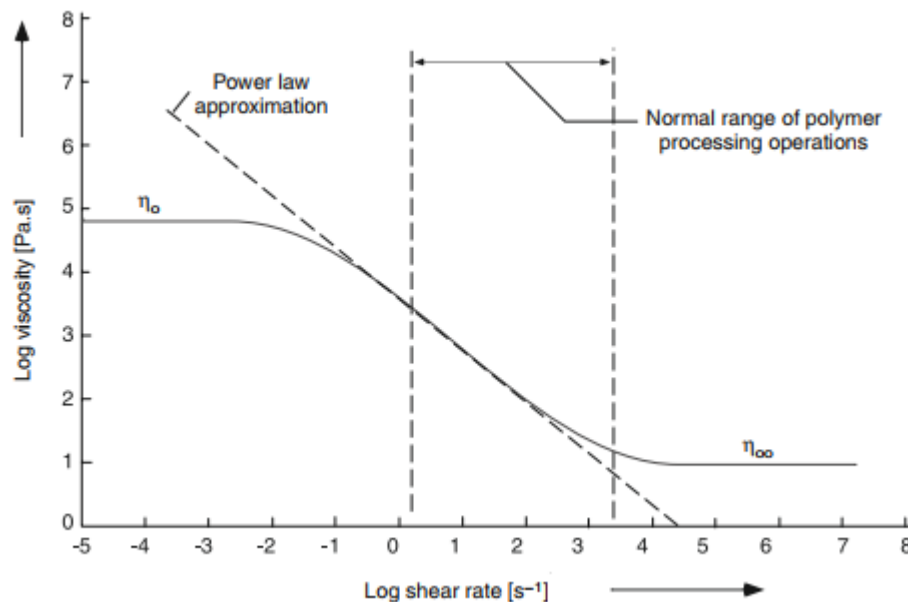


Figura 3-7: Ley de potencia aproximada. [15]

En la Figura 3-7 se observa que la aproximación es válida para un rango específico de tasa de corte. Este rango coincide con los valores nominales para operación de polímeros. Para esfuerzos de corte muy bajos la viscosidad es independiente de la tasa de corte, por lo que se comporta como un fluido newtoniano. Lo mismo sucede para esfuerzos de corte muy altos.

La viscosidad, entonces, puede describirse como:

$$\eta = m \dot{\gamma}^{n-1}$$

Alternativamente, puede reescribirse como

$$\tau = m \dot{\gamma}^n$$

Los parámetros que gobiernan esa curva son $m = \text{índice de consistencia del flujo}$ y $n = \text{índice de comportamiento del flujo}$, los cuales son extraídos experimentalmente al determinar la curva de flujo con reómetros.

Para el PET, los parámetros de viscosidad son los siguientes: [11]

TABLE A.1 (Continued)

Polymer, Commercial Designation, Manufacturer	Temperature (K)	Power Law Model			Carreau Model				Cross Model			
		Shear rate range (s ⁻¹)	m ($\frac{N \cdot s}{m^2}$)	n	Shear rate range (s ⁻¹)	n	λ (s)	η_0 ($\frac{N \cdot s}{m^2}$)	Shear rate range (s ⁻¹)	n	τ^* ($\frac{N}{m^2}$)	η_0 ($\frac{N \cdot s}{m^2}$)
Polyethylene terephthalate (PET), 7352, Amoco/BP,	553	1400–14000	7.4×10^3	0.48	70–14000	0.51	0.0028	3.2×10^2	70–14000	1.69	3.5×10^5	3.9×10^2
	563	1400–14000	4.9×10^3	0.51	70–14000	0.51	0.0018	2.3×10^2	70–14000	1.75	4.4×10^5	2.6×10^2
	573	3500–14000	4.1×10^3	0.51	70–14000	0.59	0.0021	1.6×10^2	70–14000	1.66	3.6×10^5	1.9×10^2

Power Law model:

$$\eta(\dot{\gamma}) = m\dot{\gamma}^{n-1}$$

Tabla 3-3: Índices para la ley de Potencia para PET. [11]

3.3.5. Efecto de la temperatura en la viscosidad

Como ya se ha visto, la temperatura modifica el comportamiento del polímero junto con la tasa de corte.

Shear Sensitive	Temperature Sensitive	Temperature and Shear Sensitive*
PP	PC	ABS
LDPE	PBT	PA 6
LLDPE	PET	PA 6,6
HDPE	Rigid PVC	Polystyrene
		Flexible PVC

*Shear has stronger effect than temperature

Tabla 3-4: Efecto de la temperatura en el esfuerzo de corte en plásticos. [16]

EL PET es un polímero al cual la temperatura afecta su viscosidad de manera más marcada que la tasa de corte. Puede entenderse como una curva de flujo relativamente plana, la cual sube o baja en el eje de la viscosidad en función de diferentes temperaturas, como se muestra en la Figura 3-8

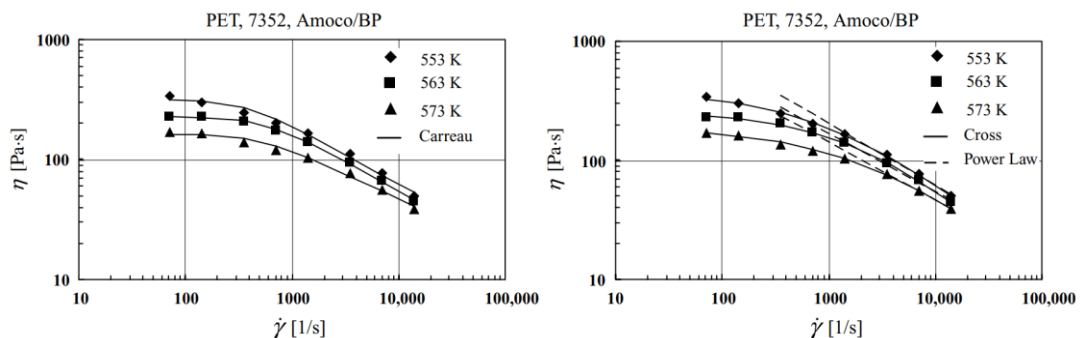


Figura 3-8: Curvas de flujo para PET. [11]

En la Figura 3-8 se muestra la curva de viscosidad para el PET, a diferentes temperaturas. Se observa como el aumento de la temperatura reduce la viscosidad del material.

3.3.6. Viscoelasticidad

Una propiedad importante de los polímeros en la extrusión es la viscoelasticidad. En resumidas cuentas, el material tiene “memoria” y luego de pasar por la zona de menor sección del troquel intenta volver a su sección original. Esto se debe a que los esfuerzos internos del material no desaparecen luego de atravesar el troquel y fuerzan al material a deformarse para restituirse.

Se puede calcular una relación de expansión para caracterizar a dicho comportamiento.

$$r_s = D_x/D_d$$

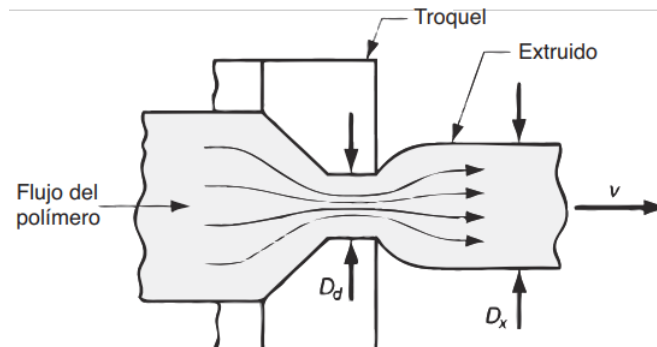


Figura 3-9: Expansión de la sección del extruido por viscoelasticidad. [1]

4. Estado del arte

El proceso de extrusión puede realizarse de distintas maneras. En función de la cantidad de tornillos, su geometría de filetes y el diseño de los cabezales existen diversos tipos de máquinas, cada una optimizada para una aplicación particular. A continuación, se analizarán los diseños más relevantes en la actualidad para reciclar polímeros.

4.1. Tornillo simple

El modelo más convencional de extrusora es el de tornillo simple. Consiste en un tornillo sin fin accionado por un motor eléctrico dentro de una camisa cilíndrica. La camisa presenta una abertura en el sector superior al inicio del tornillo. Allí el polímero escamado ingresa a la camisa para alojarse dentro del canal formado por los filetes del tornillo, el núcleo del tornillo y la camisa.

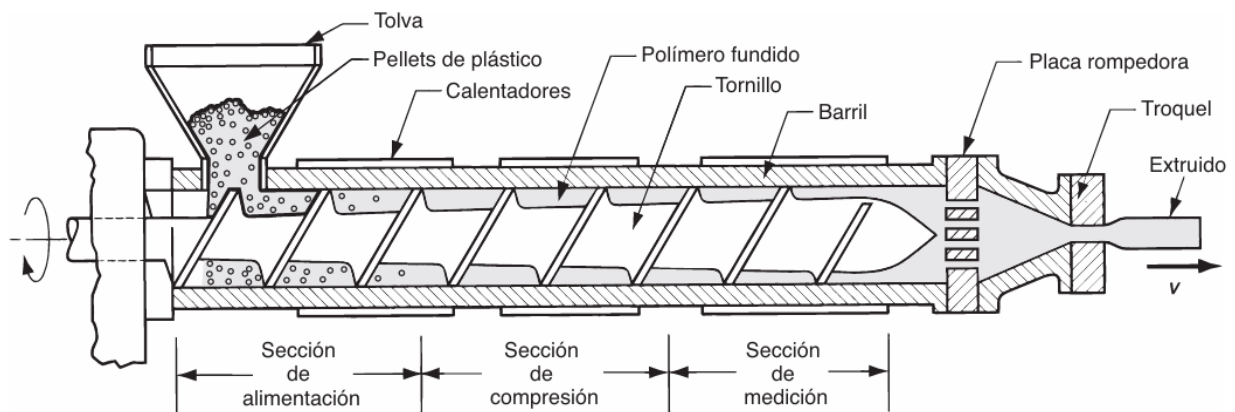


Figura 4-1: Diagrama esquemático de una extrusora de tornillo simple.

El polímero avanza hacia delante, impulsado por el filete. El núcleo del tornillo aumenta su diámetro conforme se avanza por el tornillo, por lo que el material experimenta compresión y fricción contra las paredes del canal.

La camisa es calentada por una serie de resistencias calefactoras, que proveen el calor para fundir la capa más exterior del polímero. El aporte de la fricción del tornillo y el calor resistivo funden progresivamente el material. El tornillo presenta tres zonas características: la sección de alimentación, donde ingresa el material sólido; la sección de compresión o fundido; y la sección de dosificación o medición. En esta última sección el polímero está totalmente fundido si la máquina está funcionando correctamente. Se estudian en detalle en el apartado 5.3.1.

El material atraviesa una serie de filtros para remover impurezas luego de dejar atrás el tornillo. Finalmente, es extruido a través del cabezal: El tornillo funciona como una bomba que presuriza el material y lo fuerza a salir a través de los orificios del cabezal, tomando su forma.

Es un sistema muy utilizado debido a la simpleza mecánica que posee, que implica un bajo costo y buena confiabilidad. El principal problema que presentan estas máquinas es que el material no tiene buen mezclado a lo largo del recorrido dentro de la máquina. Es decir, las partículas no experimentan una gran movilidad entre sí una vez que ingresan dentro de la camisa lo que implica poca homogeneidad en el extruido de salida si el material de entrada es de orígenes variados. Es el caso de la extrusión de recuperados, con lo que resulta de interés su estudio para este proyecto. Los procesos de mezclado del material se estudian en detalle en la sección 9.3.

4.1.1. Tornillo con mezcladores

Las dos funciones de los mezcladores son las de dispersar los aglomerados de material y distribuir uniformemente las partículas. Para ello, se utilizan las siguientes modificaciones:

Mezcladores Estriados

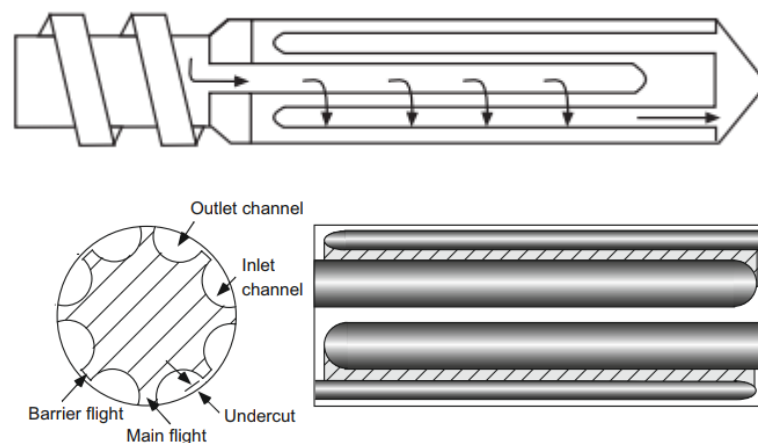


Figura 4-2: Mezclador LeRoy/Maddock. [10]

Es un mezclador del tipo dispersivo, usualmente localizado en la zona de dosificación. El más conocido es el tipo **LeRoy/Maddock**. Presenta una serie de canales o estrías paralelos al eje del tornillo, por donde el material es forzado a ingresar. Los canales se organizan de a pares, cada par tiene un canal de entrada y su correspondiente salida. La altura del filete entre ambos es menor que la altura entre los filetes que separan a los pares (ver Figura 4-2) con lo que el material es forzado a pasar al canal de salida. Al hacer ese salto el material desarrolla un gran esfuerzo de corte. Ese corte permite dispersar cualquier tipo de

aglomerado. [15]. El gran problema es el aumento en la caída de presión, lo que se traduce en un incremento de la potencia consumida por la máquina.

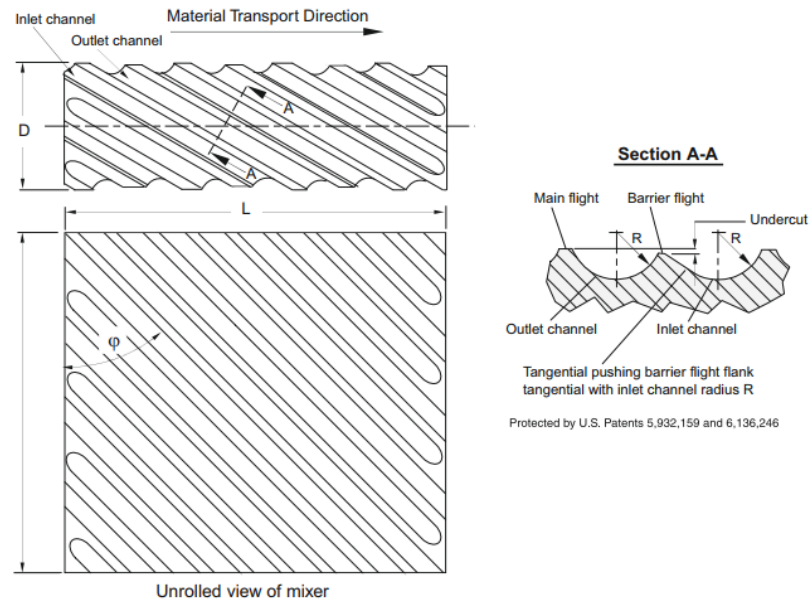


Figura 4-3: Mezclador tipo CRD. [15]

Otro mezclador similar es el denominado **CRD**. El material debe pasar por varias estrías antes de llegar al canal de salida. Al tener un ángulo helicoidal se reduce la caída de presión y se mejora el rendimiento del mezclado. [2]

Mezcladores Distribuidores

Para los casos donde se están mezclando elementos de viscosidad similar pueden utilizarse elementos que rompen el caudal y generan mezclado distributivo. Entre estos elementos pueden mencionarse los siguientes:

Mezclado con Pines

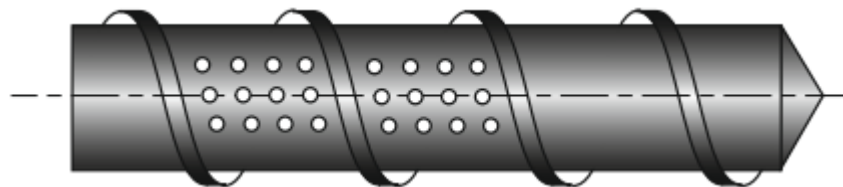


Figura 4-4: Mezclador con Pines [15]

La presencia de los pines modifica el perfil de velocidad del fluido permitiendo el mezclado de las partículas. [15]

Mezclador tipo Saxton

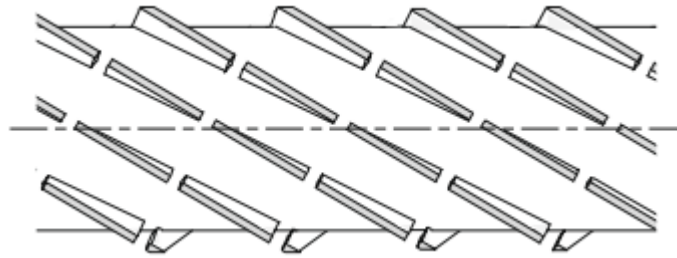


Figura 4-5: Mezclador tipo Saxton [15]

En este caso se colocan filetes de altura variable con un corte en dirección helicoidal. El polímero se divide en canales y tiene la posibilidad de cruzarse de canales, permitiendo un buen mezclado a lo largo de toda el área del tornillo. [15]

Este tipo de mezcladores de tipo distribuidor tienden a procesar de mejor manera el PET, dado que es un material cuya viscosidad varía en mayor medida con la temperatura que con la tasa de corte [16]. Por lo tanto, un mezclador dispersivo produce menores cambios de viscosidad que faciliten el mezclado a comparación de los distribuidores.

4.1.2. Tornillo de barrera

Otra modificación realizada al tornillo tradicional es el añadido de un segundo filete de “Barrera” en la zona de fundido del material.

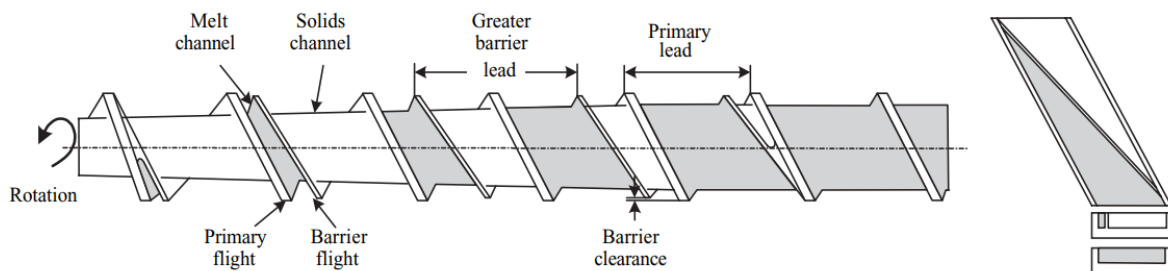


Figura 4-6: Tornillo de barrera. [11]

Como se explica en la sección 9.3 el fundido se aloja en la parte posterior del canal del tornillo, y ocupa progresivamente más espacio en el canal a medida que más material es fundido. Por las características del flujo puede aparecer material sólido que no llega a fundirse en el centro del canal.

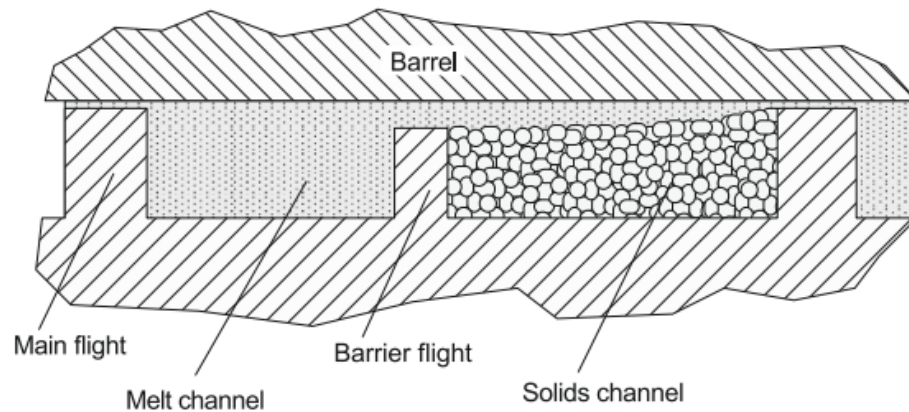


Figura 4-7: Distribución del material en un tornillo con barrera. [15]

El filete extra tiene una altura menor que los filetes principales y se diseña de manera tal que permite que el material fundido pase sobre el mismo, pero impide que los sólidos salgan del canal hasta que no estén totalmente fundidos. El canal para sólidos se reduce progresivamente en su sección hasta desaparecer al final de la zona de fundido. [15]

De esta manera se asegura que todo el **plástico de la mezcla se funde**. Además, todo el plástico que pasa sobre el filete de barrera experimenta un gran esfuerzo de corte, lo que mejora el mezclado del polímero.

Un inconveniente que presentan estos tornillos es que la tasa de fundido del plástico debe estar cuidadosamente equiparada con la reducción en la sección del canal de sólidos. De lo contrario, se pueden experimentar estrangulamientos o taponamientos que frenen el caudal y causen un sobrecalentamiento de la máquina. [15]

Tornillo Maifeller

Es el tornillo de barrera convencional explicado anteriormente. En la Figura 4-8 se muestra el desarrollo del canal en la zona de compresión, aquí llamada zona de barrera, del tornillo.

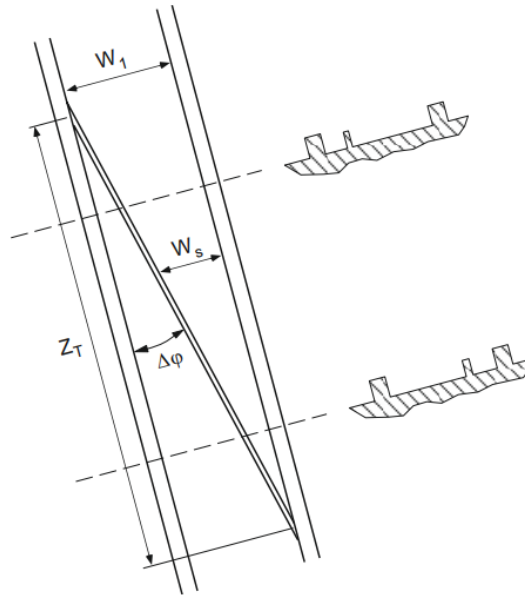


Figura 4-8: Desarrollo del canal del tornillo con barrera. Modelo tipo Maifeller. [15]

Tornillo Barr

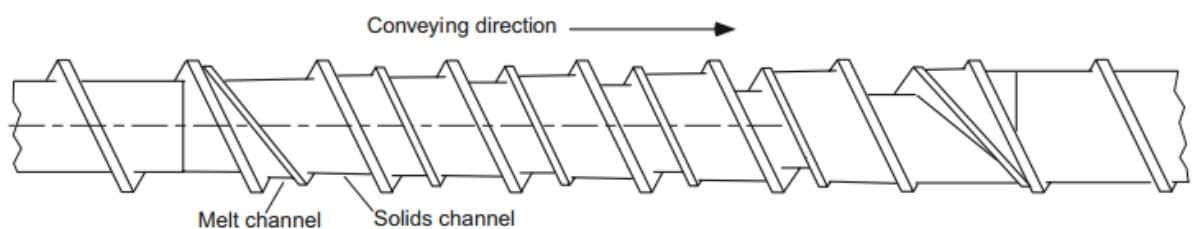


Figura 4-9: Tornillo tipo Barr. [15]

En este tornillo el canal de sólidos aumenta su profundidad a medida que se angosta. Además, la barrera corre paralela al filete principal con el mismo ángulo de hélice en la sección media de la zona de compresión. Esto aumenta el área de interfaz entre el sólido y el fundido, aumentando el rendimiento del proceso de fundido. El inconveniente que presenta es que los cambios de sección de los canales sólidos y fundidos pueden conducir a un flujo inestable.

4.1.3. Extrusoras venteadas

Un fenómeno importante discutido en la sección 8.1.3 es la generación de volátiles durante la extrusión. Al fundir el polímero pueden generarse gases volátiles que deben ser eliminados dado que forman burbujas que pueden cortar el material. Además, la pérdida de volátiles disueltos en la mezcla puede generar cambios grandes de viscosidad, lo que puede provocar un flujo inestable [15]. Puesto que la presencia de volátiles depende del plástico procesado a veces es indispensable diseñar la máquina con una salida al exterior que conduzca los vapores.

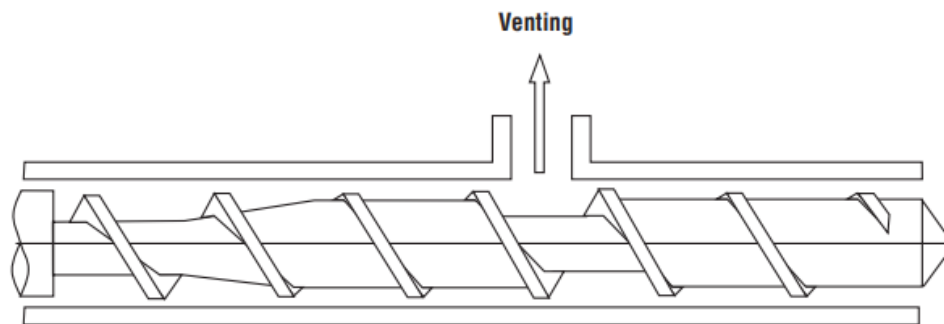


Figura 4-10: Tornillo venteado.

Se observa en la Figura 4-10 el diseño fundamental de un tornillo para extrusoras venteadas. El objetivo es que no haya presión positiva (mayor a la atmosférica) en el canal de venteo para que el material no fluya hacia el exterior por el conducto. Para lograrlo, se diseña el tornillo con una zona de expansión luego de la compresión inicial, buscando que el material esté fundido, pero a presión ambiente. Se denominan extrusoras de dos etapas. Permiten remover volátiles y humedad.

Tienen una tasa de extracción de volátiles del orden del 5% del total del peso del polímero. Para extraer mayores cantidades es preciso usar varios venteos en serie. Debido a requerir de dos etapas o más presentan tornillos de mayor largo, lo que implica más esfuerzos por pandeo/flexión y una mayor resistencia de los rodamientos y soportes.

Según lo investigado con diferentes fabricantes, para la extrusión de PET con tornillos de pequeño diámetro que incluyen barrera no se utiliza venteo por la poca cantidad de gases producida [17]. La remoción de humedad en el PET debe ser realizada previa a la extrusión, para evitar la degradación por hidrólisis [16], mediante algún tipo de secado.

4.1.4. Extrusoras con bombas de engranajes

En procesos donde es fundamental obtener un caudal constante de material a la salida se puede incluir una bomba de engranajes entre el cabezal y los filtros. Se trata de un par de engranajes que giran a una velocidad impuesta por un motor y una caja reductora. Funciona como una bomba de desplazamiento positivo [10] impulsando al material que llega a los dientes de los engranajes hacia delante.

Vuelve al caudal de salida independiente de la presión del tornillo, dado que los propios engranajes producen presión, y genera un flujo mucho más constante. Por lo tanto, se utiliza con frecuencia para la producción de filamentos, en particular con materiales de baja viscosidad de trabajo como el PET [10].

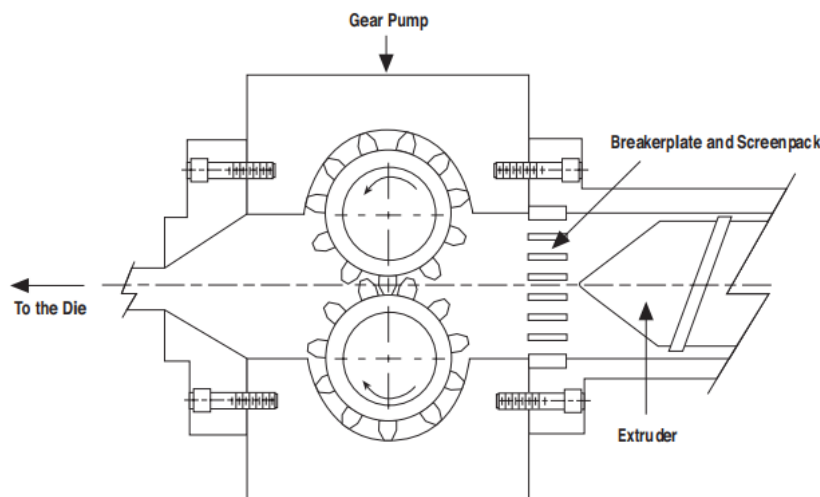


Figura 4-11: Bomba de engranajes.

4.1.5. Extrusoras con camisa estriada

Otra modificación que se incluye en algunas máquinas es un estriado axial en la zona de alimentación de la camisa. Esto aumenta significativamente la fricción en la zona, lo que mejora el transporte de sólidos [15]. Debe buscarse que el material no se funda en esa zona, por lo que debe refrigerarse para controlar la temperatura [10]. Algunos autores recomiendan una temperatura aproximada de 70 [°C] en la zona.

Las estrías tienen un largo de $3 \cdot D_{int} \dots 5 \cdot D_{int}$ y reduce su profundidad a lo largo de la camisa. Se suele utilizar en conjunto con tornillos de barrera.

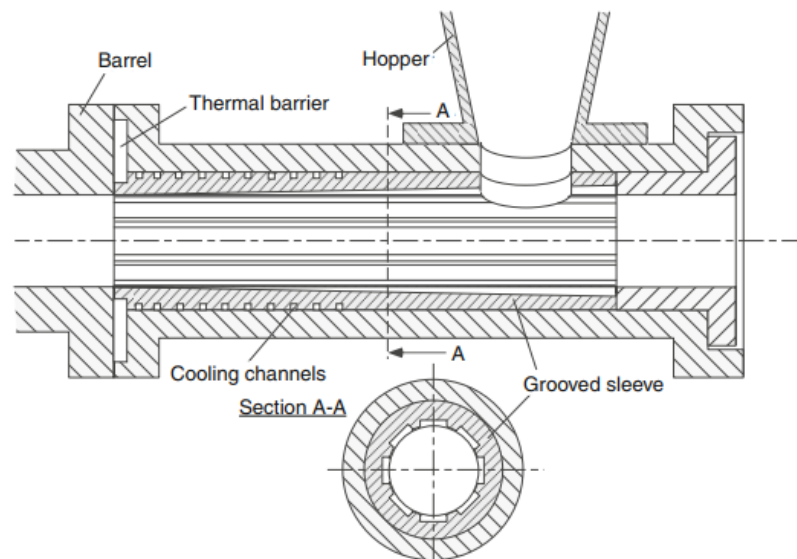


Figura 4-12: Camisa estriada [15]

Se ha observado que esta modificación mejora el caudal del material, volviéndolo más consistente e independiente de la presión desarrollada en el tornillo.

4.2. Doble tornillo

Hasta ahora se ha mencionado el uso de máquinas con un solo tornillo. Sin embargo, existe una infinidad de diseños que incorporan varios tornillos a la máquina, en función de la aplicación. El tipo más común es **la extrusora de doble tornillo**. Dentro de esta categoría pueden listarse múltiples tipos de máquina, en función del sentido de giro del tornillo y del grado de entrecruzamiento de sus filetes.

Una de sus principales características es su constitución modular, que le da gran versatilidad ya que permite diferentes diseños para todas las secciones deseadas.

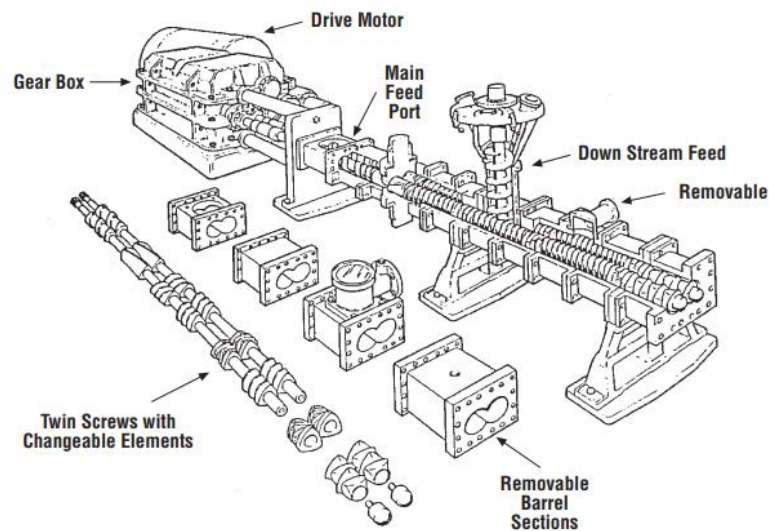


Figura 4-13: Extrusora de doble tornillo. [10]

Tanto la camisa como los tornillos están compuestos por piezas desmontables con diferentes geometrías, como se observa en la Figura 4-13. La camisa se compone de varios segmentos bridados entre sí, mientras que el tornillo presenta varios elementos que se colocan sobre cada núcleo, el cual suele contar con estrías para transmitir eficientemente el movimiento. [10] Otro punto importante que comentar es la mayor carga axial que deben soportar los rodamientos debido al gran empuje que se genera en estos tornillos [15].

El análisis teórico sobre el flujo de material dentro del canal es mucho más complejo que en las máquinas de tornillo simple. Los diseños y configuraciones se basan en la experiencia práctica ideal para cada aplicación. La posibilidad de usar componentes modulares permite ajustar las variables para conseguir cualquier configuración deseada. [15]. A diferencia de la extrusoras de tornillo simple, se trabaja con alimentación restringida de material a la entrada: es decir, se controla el caudal de acuerdo con lo deseado, y se vuelve independiente de la velocidad del tornillo.

La principal ventaja de estos tornillos es que la complejidad del flujo genera excelente mezclado y buena capacidad para fundir el material debido a la mayor cantidad de superficie en contacto con el material. Se utilizan usualmente en aplicaciones que requieren mezclado o *compounding* con aditivos o varios polímeros a la vez.

Los parámetros más generales para clasificarlos son el sentido de giro y el grado de entrelazamiento de los dos tornillos. Pueden ser contrarrotantes o corrotantes. En función de la distancia entre ejes pueden no presentar engranado, tener engranado parcial o tener engranado total. Se denomina engranado o entrelazamiento a la superposición de los diámetros externos de los filetes de los tornillos.

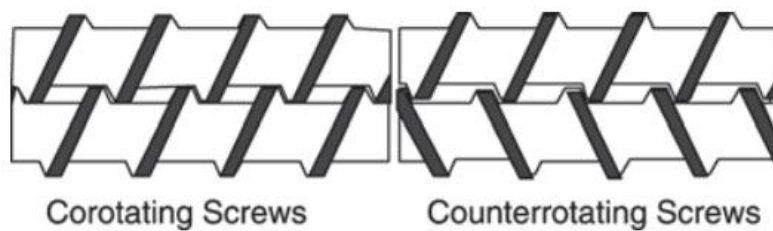


Figura 4-14: Comparación entre tornillos corrotantes y contrarrotantes.

Se resumen aquí los tipos de tornillos dobles más utilizados:

4.2.1. Contrarrotante con engrane parcial

Las extrusoras de doble tornillo contrarrotante presentan dos tornillos girando en sentidos opuestos. Funcionan como bombas de desplazamiento positivo, con los filetes empujando simultáneamente al material hacia delante en el espacio entre los dos tornillos. Debido a la restricción que experimenta el plástico en esa zona se desarrolla alta presión, calor y corte, que pueden generar que se rompa el flujo del material en las zonas opuestas a la restricción. Esto genera problemas de lubricación y el limitante para la velocidad de estas máquinas, que no suele sobrepasar los 150 rpm [11]. Para mejorar esa velocidad se diseñaron secciones con mezcladores que posibilitan un mejor mezclado y flujo, para lograr velocidades más altas.

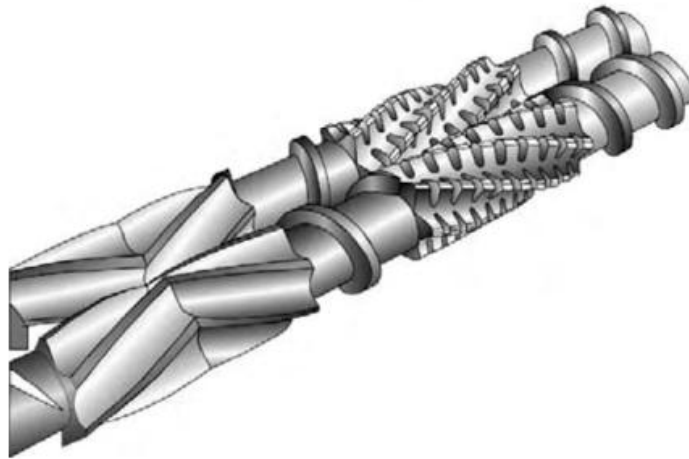


Figura 4-15: Tornillos contrarrotantes con entrelazamiento, con mezcladoras. [11]

Las extrusoras contrarrotantes se suelen utilizar para procesar y componer materiales termoplásticos sensibles, como es el caso del PVC con aditivos [16]

4.2.2. Contrarrotante sin engrane

En este caso los tornillos no presentan superposición entre los diámetros de los filetes. Debido a esto, el flujo es similar al de una extrusora de tornillo simple. El flujo total es algo menor al de dos extrusoras de tornillo simple del mismo diámetro, debido a la interferencia entre los dos flujos que acarrea cada tornillo [15].

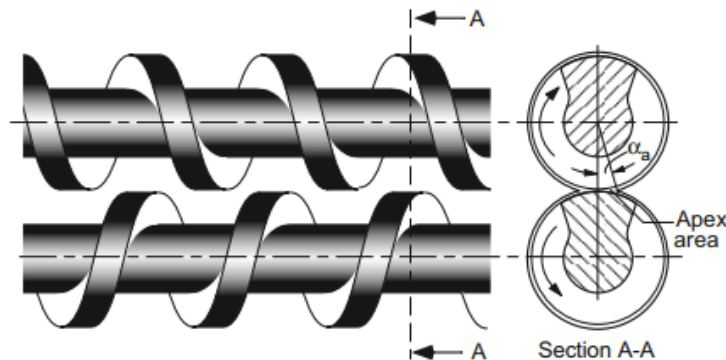


Figura 4-16: Tornillo contrarrotante sin engrane

Al no tener buenas propiedades de bombeo, se utiliza principalmente para aplicaciones de mezclado y devolatilización. No se utiliza para la extrusión de perfiles, con lo que no tiene aplicación específica para reciclaje de PET.

4.2.3. Corrotante con engrane parcial

En estas máquinas el material experimenta un flujo en forma de “8” entre los dos tornillos. Genera un buen mezclado. utiliza para extrusión de perfiles o tubos si es de baja

velocidad (10-40 rpm). Tienen además buena capacidad de devolatilización [15]. Existen variantes de alta velocidad (200-1400 rpm) que por sus buenas capacidades de mezclado se utilizan para la composición de materiales con aditivos, como si se tratara de reactores [15].

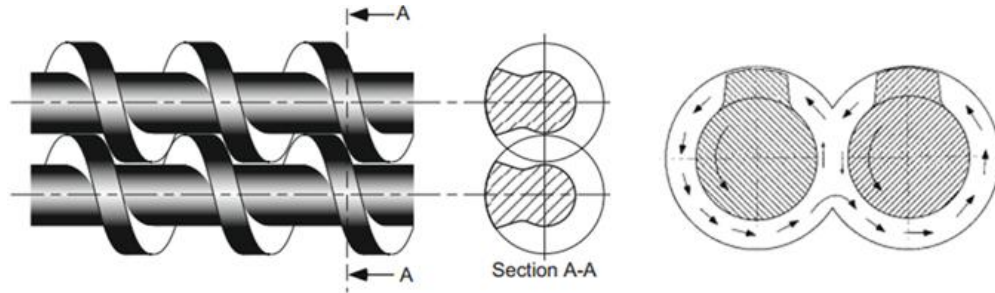


Figura 4-17: Doble tornillo corrotante de alto grado de engrane. [15]

Según el diseño del tornillo y camisa se les puede incluir una sección de degasificación. Por este motivo se utilizan para el procesado de escamas de PET para producir filamento. La menor tasa de corte que experimenta el material hace que experimente menos picos de fricción y por tanto de temperatura, con lo que se degrada en menor medida: presenta una baja caída de viscosidad intrínseca.

Typical PET Recycling Extruder

Model	Motor	L/D	Screw Speed	Output
CWT52-Plus	75kw	40	400rpm	200kg/hr
CWT65-Plus	110kw	40	400rpm	400kg/hr
CWT75-Plus	160kw	40	400rpm	600kg/hr
CWT95-Plus	355kw	40	400rpm	1000kg/hr

Tabla 4-1: Especificaciones de una extrusora para el reciclado de PET [18]

Se observa que fabricantes como Cowell Extrusion [18] indican sistemas con alta velocidad de rotación que permiten tener un gran flujo de material sin necesidad de deshumidificadores.

Se resumen a continuación las principales características de estas máquinas.

	Corotating Intermeshing	Counterrotating Intermeshing	Counterrotating Nonintermeshing
Practical Residence Time, minutes	0.35–6	0.35–6	0.35–6
Residence Time Distribution	Variable	Variable/Tighter	Variable
Dispersion	High	High	Good
Heat Transfer	Excellent	Excellent	Excellent
Venting	Excellent	Excellent	Excellent
Pumping	Good	Excellent	Fair
Self-Wiping	Excellent	Good	Fair
Zoning	Excellent	Excellent	Good
Output Rate	High	Moderate	High
Distributive Mixing	Good	Good	Excellent

Tabla 4-2: Resumen características de extrusoras de doble tornillo. [16]

4.3. Control

Una parte muy importante de cualquier proceso industrial es el manejo del sistema para tenerlo bajo control. Se define al control como todo el conjunto de acciones que se realizan para obtener un resultado deseado en un proceso. Implica actuar sobre las entradas o variables para operar, para lograr una salida o variable medida deseada. Para hacerlo, debe compararse la variable medida real con su valor deseado.

En el caso de una extrusora el resultado deseado es un polímero fundido de calidad y caudal uniforme a la salida del cabezal. Para conseguirlo, pueden monitorearse varias variables y operar sobre otras.

En ámbitos industriales puede trabajarse con sistemas automatizados, donde las acciones que gobiernan el sistema son manejadas mediante un PLC (Controlador Lógico Programable). Este trabaja con lógica programable, con diferentes salidas y acciones en función de las entradas que se configuren.

La extensión y complejidad del sistema de control depende de la precisión y nivel de automatización que se desee controlar. Puede utilizarse un control más simple, sin un controlador central, con los accionamientos del variador y de los pirómetros.

4.3.1. Variables del proceso

Un extrusor tiene muy pocas variables de control independientes que pueden ser modificadas durante el proceso. Las variables de diseño vistas quedan definidas a partir de la selección del material a trabajar, que imponen geometrías del tornillo adecuadas para cada tipo de polímero. En función de la forma del extruido deseado se define la característica del extrusor.

Las variables de proceso monitoreadas pueden ser varias en función del control que se desee realizar. Se monitorean varios parámetros para asegurar que el proceso esté controlado y funcionando correctamente: temperaturas de la camisa, carga del extrusor (porcentaje de carga, par o corriente consumida), velocidad del tornillo, temperatura de fusión, presiones de fusión (antes del paquete de mallas, en la matriz y en un extrusor de dos etapas en la sección de medición de la primera etapa). [16]

Es útil añadir un amperímetro indicador de aguja por cada resistencia en el tablero para asegurarse de que el funcionamiento del sistema es adecuado y las resistencias no están en cortocircuito o con algún tipo de falla.

En particular, cuando la extrusora se detuvo y se quiere volver a extruir se debe precalentar correctamente las distintas zonas de la camisa. El precalentamiento funde la capa del polímero sólido en contacto con la camisa. Esto permitirá que cuando se accione el motor y empiece lentamente a rotar el tornillo, el material pueda fluir y desarrollar una tasa de corte que genere buena viscosidad, y consecuentemente se funda completamente el material.

Junto con los amperímetros, debe seleccionarse adecuadamente el aparataje eléctrico de protección del motor para protegerlo adecuadamente ante una sobrecarga. Debe seleccionarse un guardamotor adecuado. Si se desea proteger al variador y al motor ante una sobrecarga puede utilizarse un contactor con un relevo térmico para protegerlo ante sobrecargas. Para las resistencias se instala una llave magnetotérmica adecuada para cargas resistivas. Los cables deben estar dimensionados adecuadamente.

Las variables de proceso a operar son los puntos de ajuste de temperatura y la velocidad del tornillo. La temperatura es controlada por los pirómetros. Es uno de los parámetros más importantes a controlar. La velocidad del tornillo se modifica desde el variador de frecuencia.

En la actualidad el control de la velocidad del tornillo se realiza mediante un variador de frecuencia. Poseen un sistema que permite tener una corriente eléctrica de salida con la frecuencia, voltaje y potencia deseada. Un rectificador convierte la entrada en corriente continua. Un convertidor CC-CC regula la intensidad y la tensión, y filtra la corriente para

reducir el ripple. Por último, un inversor trifásico genera tres ternas de tensión de forma casi sinusoidal para alimentar el motor.

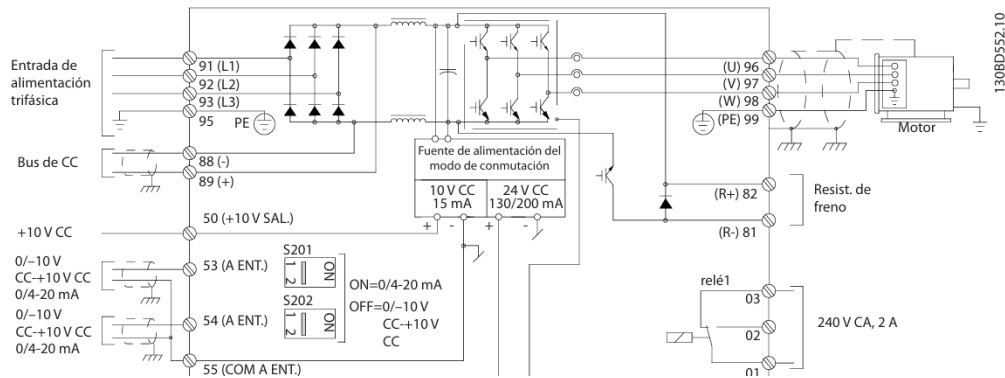


Figura 4-18: Esquema eléctrico de un variador de frecuencia. Fuente: DANFOSS.

La velocidad del tornillo puede regularse desde la entrada analógica del sistema de control del variador. Puede colocarse un potenciómetro alimentado por una tensión auxiliar de 10 [VCC] del propio variador, y medirse la tensión en el punto medio del mismo para tener una referencia de velocidad.

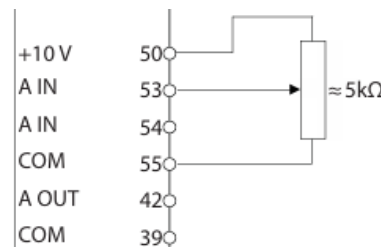


Figura 4-19: Control de velocidad por potenciómetros. Fuente: DANFOSS.

El efecto de la variación de velocidad es muy importante para la calidad del recuperado. El caudal másico es directamente proporcional a la velocidad, por lo que una mayor velocidad implica mayor capacidad de recuperación. Sin embargo, un aumento de la velocidad implica que el flujo de calor que recibe el material debe aumentar para seguir fundiéndose completamente. Como el área de fricción entre el polímero y la camisa no varía, la tasa de calor disponible por área y por kilogramo de material se reduce [19], con lo que pueden aparecer partes no fundidas en el final del tornillo. Esto puede provocar que los filtros se tapen o aparezcan partes sólidas en la salida del material. En la etapa de diseño se soluciona con un mayor largo de tornillo, pero durante la operación es un factor que limita la velocidad operativa del sistema.

El análisis de la temperatura requiere de un apartado completo, que se desarrolla a continuación.

4.3.2. Regulación de temperatura

El control de la temperatura es realizado por los pirómetros. Son dispositivos que miden la temperatura de un sistema a través de transductores de temperatura (RTD's, Termocuplas NTC, etc.), y permiten operar un sistema de calentamiento para lograr una temperatura deseada. Hoy en día los sistemas más económicos incluyen al controlador, una termocupla para medir el proceso y un relé de estado sólido. Estos relés reemplazan a los contactores de maniobra, dado que permiten abrir o cerrar el circuito de potencia sin tener contactos físicos. Esto alarga la vida del sistema, dado que los relés no poseen el desgaste eléctrico y mecánico que sufre un contactor tradicional.

Se suele utilizar un pirómetro por cada zona que se desee controlar. Esto permite configurar un perfil de temperaturas particular a cada tipo de material para mejorar el rendimiento de la máquina.

Medición

La medición de temperatura en máquinas extrusoras se puede realizar de distintas maneras. El método más común es la utilización de termocuplas. Si bien la temperatura real del polímero nunca es exactamente igual a la de la camisa debido a la mala conductividad térmica del material, la manera más práctica de medir la temperatura es medir en el seno de la camisa. Al trabajar con presencia de sólidos es muy difícil medir el polímero en sí, salvo la zona de dosificación, donde a veces se colocan termocuplas luego de la finalización del canal.

Las termocuplas deben estar incrustadas en la camisa, con una profundidad de 30 mm, y alejadas de las resistencias calefactoras. Nunca se debe colocar la termocupla entre la resistencia calefactora y la camisa. Se recomienda que presenten una aislación para disminuir la transferencia de calor con el ambiente, a su vez, una buena práctica es que se encuentren presionadas contra la superficie del barril mediante un resorte, garantizando un buen contacto.

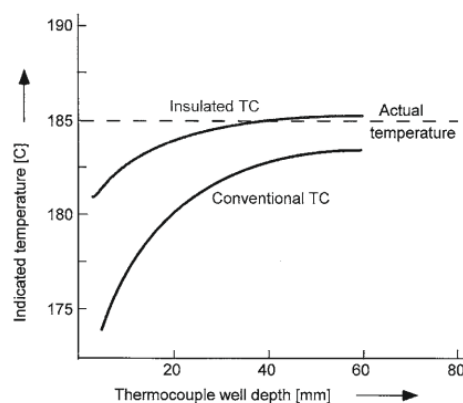


Figura 4-20: Capacidad de medición de termocuplas. [15]

En la Figura 4-20 se observa el efecto de la profundidad donde se coloca la termocupla en la efectividad de la medición. Se muestra la diferencia entre una termocupla aislada y una termocupla tradicional.

Otro punto importante para tener en cuenta es que la temperatura del propio material varía mucho en dirección radial. Puesto que el calor proviene de la superficie de fricción, al acercarse al centro del tornillo se observan gradientes muy grandes de temperatura en relativamente poca distancia. [15]

Perfil de temperaturas

Tener un pirómetro por cada zona de control permite tener un perfil específico de temperaturas a lo largo de la extrusora. En el proceso se busca fundir el polímero desde la zona de transición para lograr tener un material homogéneamente fundido en la zona de dosificación. Los perfiles de temperatura posibles son:

- Un perfil progresivamente creciente desde la boca de alimentación hasta la matriz.
- Un perfil invertido o decreciente.
- Un perfil recto de temperatura.
- Un perfil en forma de joroba, donde se tiene un máximo en la zona de transición, y una temperatura menor en la matriz.

El perfil de temperatura que funciona mejor con un producto y una configuración de extrusora dada depende del polímero y su viscosidad, el diseño del tornillo y el caudal producido. Es crítico que el polímero tenga una temperatura cercana a la temperatura de fusión T_m sin sobrepasarla en exceso, para evitar que se degrade [16]

Se busca seleccionar la temperatura mínima que permita el proceso con el objeto de evitar la generación excesiva de acetaldehído (ver sección 8.1.4) así como la pérdida de peso molecular o caída de viscosidad (una caída en la viscosidad reduce el calor disipado en el material por fricción, reduciendo la eficiencia de la máquina). Para el PET se recomienda secar el polímero antes del proceso. [16]

Resin	Zone 1, °F (°C)	Zone 2, °F (°C)	Zone 3, °F (°C)	Zone 4, °F (°C)	Die, °F (°C)	Melt Temp °F (°C)
PET	480–520 (249–271)	520–550 (271–288)	550–570 (288–300)	550–570 (288–300)	550–570 (288–300)	540–570 (282–300)

Tabla 4-3: Temperaturas en las zonas del tornillo para el PET. [16]

En la Tabla 4-3 se detalla un posible perfil de temperaturas para lograr un procesamiento eficiente del PET. Se observa que se recomienda el trabajo a $T = 300 [^{\circ}\text{C}]$ para asegurar un correcto fundido del material.

Un punto importante para comentar es que este perfil de temperatura no se debe considerar como un ideal, sino que se debe tomar como una referencia inicial. La temperatura de fusión del plástico varía en función de la presión del cabezal, del desgaste de la camisa, la ubicación exacta de las resistencias y los sensores de temperatura, temperatura ambiente y temperatura del polímero, entre las variables más importantes [20].

4.4. Extrusión de PET Reciclado - Resumen

Como se ha observado en las secciones previas, la extrusión de PET reciclado puede realizarse con diferentes tipos de máquina gracias a la gran variedad de diseños que existen en el mercado.

El reciclaje de PET con extrusoras de tornillo simple requiere que la máquina tenga buena capacidad de mezclado, capacidad para trabajar con escamas y preferentemente un sistema de devolatilización para remover humedad y volátiles. En Argentina, fabricantes como Golche [17] han recomendado el uso de tornillos de barrera en conjunto con camisas estriadas para el procesado de PET en forma de escamas. El uso de extrusoras con venteo para devolatilización suele recomendarse para diámetros de tornillo mayores a $60 [mm]$. Esto implica utilizar sistemas de secado. Se realiza un resumen de los sistemas más interesantes para el proyecto en la sección 7.1.

Existen alternativas que utilizan extrusoras de tornillo simple sin necesidad de secadoras, que introducen algunas modificaciones en el diseño. El fabricante alemán Gnauss presenta un sistema llamado MRS “Multi-Screw Extruder” [21].

**Fig. 2. The multi rotation section
of the extruder**



Figura 4-21: Extrusora MRS [21]

Se trata de una extrusora de tornillo simple con una sección de devolatilización que utiliza un conjunto de tornillos planetarios que giran sobre el tornillo. Se utiliza un sistema de desgasificación con bombas de vacío para remover eficientemente los volátiles y la humedad en esa zona. El fabricante indica que la máquina es capaz de procesar material con mínima degradación gracias a este diseño.

La fabricación de extrusoras de doble tornillo para el reciclado de PET está mucho más establecida. Numerosos fabricantes localizados en China producen máquinas especializadas. Se muestra a continuación una solución ofrecida por USEON [14].



Figura 4-22: Sistema de reciclaje de PET USEON [14].

Se utilizan sistemas de doble tornillo corrotante de alta velocidad, con secciones de desgasificación por medio de bombas de vacío. La camisa presenta tanto resistencias calefactoras como sopladores de aire para refrigeración. Muchos fabricantes ofrecen la línea completa de equipamiento, incluyendo la piletta de enfriamiento y la peletizadora, como se observa en la Figura 4-22.

4.5. Producción de Filamentos para Impresión 3D

Por sus propiedades el PET comenzó a utilizarse durante las últimas décadas para una gran diversidad de aplicaciones, como fibra, films, envases, etc. Entre los posibles usos para el material recuperado se ha contemplado la posibilidad de producir filamentos para impresión 3D. A continuación, se estudia la factibilidad de producir el filamento de impresión 3D:

4.5.1. Filamento de PETG

El material más utilizado basado en el PET para la producción de filamentos 3D es el Polietileno Tereftalato Glicol. Se prefiere para la impresión 3D dado que presenta menos fragilidad a altas temperaturas y no se cristaliza si se aplica un esfuerzo sobre el material [22]

Para producirlo se añade ciclohexano di-metanol (CHDM) en lugar de etilenglicol durante la polimerización del plástico. Para realizarlo a partir de material 100% reciclado debe aplicarse un proceso de reciclado químico (ver sección 2.3.2), y añadir CHDM durante la re-polimerización del pellet. Por lo tanto, requiere un nivel de inversión inicial importante, y no está involucrada la extrusión directamente. Se concluye que no es una alternativa viable para el procesado en planta del material que maneja actualmente la ONG.

4.5.2. Filamento de rPET

El PETG es un material apto para la impresión 3D. Sin embargo, presenta un costo alto de manufactura [23]. Si bien el PET reciclado presenta un rendimiento menor para la impresión, resulta mucho más barato de producir dado que pueden omitirse las etapas de procesado químico del material.

Para producir filamento 3D a partir de botellas el método tradicional es procesar las escamas a través de una extrusora junto con una bobinadora que produce pellets. Luego esos pellets son procesados por una extrusora de tornillo simple para producir filamento. [23]

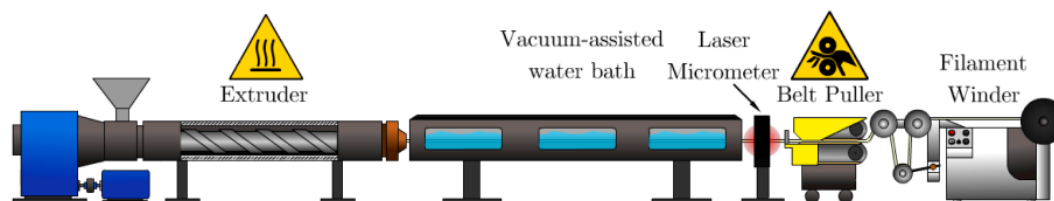


Figura 4-23: Producción de filamentos de rPET [23]

Luego de la producción de filamentos se enfría el material en una pileta asistida con vacío. Posteriormente, un juego de rodillos y poleas traccionan el filamento, y lo envían a una bobinadora.

La primera etapa de producción de pellets suele realizarse mediante una extrusora de doble tornillo corrotante de alta velocidad, con secciones de mezclado y secciones de devolatilización. Puesto que no entrega un caudal constante -debido a que el flujo depende de la tasa de alimentación de la máquina- no es la más apropiada para producir filamentos.

La extrusión por tornillo simple no depende de la tasa de alimentación, entrega un caudal más constante, con lo que es más adecuada para la producción de filamentos. Se remarca entonces la utilización de dos extrusoras en serie.

La necesidad de incluir dos extrusoras distintas o al menos dos procesos de extrusión (uno para pelletizar, otro para producir filamentos) vuelve más complejo al proceso.

Otro procedimiento que no involucra extrusión es el termoformado de tiras de PET de botella [22]. Se realiza a una escala mucho menor. Se corta una tira de la botella, “desenrollándola” para obtener una cinta. La cinta se hace pasar por una matriz calefaccionada, que no llega a derretir del todo el material, pero lo calienta lo suficiente para que al pasar por un orificio calibrado tome sección circular. El filamento luego se bobina y se presenta listo para utilizar.

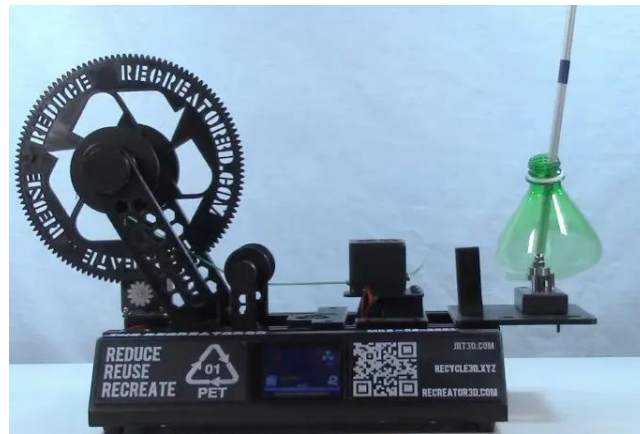


Figura 4-24: Filamento de botella PET [22]

Es importante remarcar que, si bien se trata de una extrusión, el material no se funde, sino que se moldea por acción del calor. Por lo tanto, no existe un mezclado importante del material con lo que las propiedades mecánicas no serán las mismas a las de un filamento de rPET extruido. Se muestra una comparación cualitativa de las propiedades en la Tabla 4-4.

Tipo de filamento	Material	Resistencia	Flexibilidad	Compatibilidad
Filamento PLA	Ácido poliláctico	Media	Baja	Alta
Filamento PETG	Tereftalato de polietileno	Alta	Media	Alta
Filamento de plástico reciclado	Plásticos reciclados	Variable	Variable	Variable

Tabla 4-4: Comparación de propiedades de filamentos para impresión 3D [22]

5. Componentes de la extrusora

Una extrusora puede ser analizada a partir de sus componentes individuales. Fundamentalmente se trata de un tornillo sinfín que impulsa al plástico hacia adelante mientras se calienta, para pasar forzosamente por el troquel y tomar la forma del orificio de salida. El tornillo sinfín, gira dentro de una camisa o barril. Se encuentra acoplado a un reductor que es impulsado por un motor eléctrico a través de una correa. La camisa presenta una abertura en la sección de alimentación donde se ubica la tolva en la cual se carga el plástico triturado. A lo largo de la camisa se dispone un conjunto de resistencias calefactoras que contribuyen con el precalentamiento del equipo y la regulación de temperatura durante el proceso. El extruido sale por un troquel, que le da la forma de filamento.



Figura 5-1: Extrusora a estudiar. [24]

Como se mencionó previamente, la extrusora presente en la ONG es del tipo de tornillo simple de pequeña escala. La máquina al inicio del proyecto estaba totalmente desmantelada. La pelletizadora, la camisa y los filtros fueron extraviados luego de ser adquirido el equipo por la asociación.

Sobre esa base, se realizaron dos viajes a la ciudad de Necochea para relevar los componentes presentes en el taller, su estado y características. A continuación, se detalla el relevamiento realizado y se describe la función de cada elemento en el funcionamiento del equipo.



Figura 5-2: Componentes de la máquina, en el estado inicial del proyecto.

5.1. Tolva

La tolva es el lugar donde ingresa el polímero a la máquina. Es un depósito que sirve para canalizar el ingreso del material al tornillo y asegurar un flujo continuo de material. Se puede cargar de forma manual o automática. El material suele presentarse en forma de escamas producto de una trituradora. La boquilla inferior de la tolva deposita por gravedad el material (para el caso estudiado, escamas de PET triturado) sobre la abertura de ingreso al tornillo, donde es arrastrado por fricción hacia adelante.

Se debe de asegurar que el paso del material en la tolva sea continuo y que el tiempo de residencia sea el mismo para todo el material, ya que en ocasiones la formación de cavernas hace que haya flujos indeseables del material: existe la posibilidad de que se bloquee el flujo del polímero al formarse “puentes” que obstruyen el paso de material. La formación de puentes depende de la geometría del material. En el caso particular del plástico reciclado PET, suelen ser escamas pequeñas. [15]

Para solucionar estos problemas se puede agregar un dispositivo que haga vibrar la tolva o un agitador que mezcle el material, de manera que se elimine inmediatamente cualquier obstrucción. A su vez, es recomendable utilizar tolvas circulares en vez de cuadradas, debido a que las primeras tienen menor tendencia a presentar formación de obstrucciones. [15]

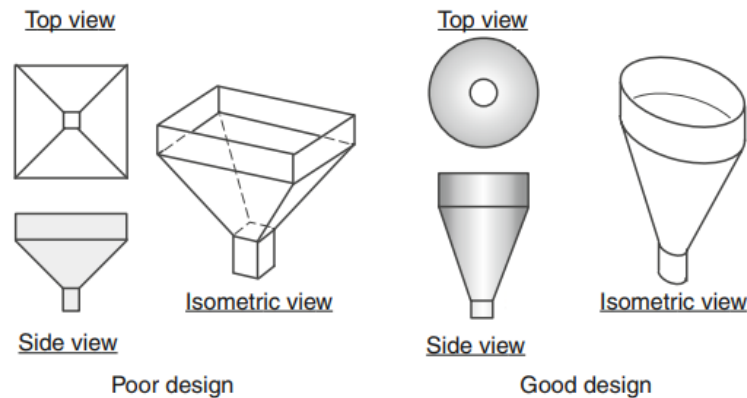


Figura 5-3: Comparación entre modelos de tolvas. [15]

Opcionalmente, la tolva puede ser precalentada para tener al polímero a una temperatura deseada. Se debe tener en cuenta que en ningún caso la temperatura de la tolva y del material que esta por ingresar a la extrusora debe elevarse hasta el punto de comenzar a fundir al polímero [2]. Esto asegura que el material no se pegue a las paredes formando potenciales obstrucciones. [15]

Es importante que el ingreso de material sea continuo, por lo tanto, se debe asegurar un suministro constante de nuevas escamas a la tolva. Esto permite tener un correcto suministro de material en la extrusora, y evita que la tolva sea un cuello de botella en el proceso de extrusión. [11]

Cuando la densidad aparente del material cargado es baja o existen problemas de alimentación en la máquina [2] a veces se utilizan tolvas tipo Crammer, como se mencionó en la sección 3.2.2. La elección y diseño de estas debe realizarse con un cuidadoso estudio sobre el material de ingreso trabajado. [13]

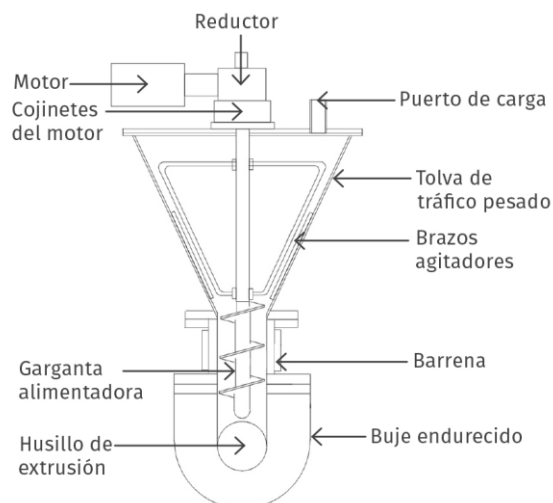


Figura 5-4: Tolva Tipo Crammer. [13]

5.1.1. Relevamiento Tolva

La tolva original de la máquina es de diseño básico. Es circular cónica, no presenta ni calentadores ni mezcladores. Se halla en buen estado. Considerando que el material de entrada serán escamas de PET, un diseño ideal podría incorporar sistemas de calefacción o secado para mantener niveles de humedad adecuados. Al tener la parte superior abierta a la atmósfera el material tendería a humedecerse. Esto puede solucionarse mediante el añadido de una tapa para la tolva.



Figura 5-5: Detalle Tolva original.

Se observa también que la boquilla presentaba una tapa ciega lateral removible, y un indicador de nivel transparente. Se realizó un esquemático de la tolva con las dimensiones principales, junto con la omega para fijarla a la camisa.

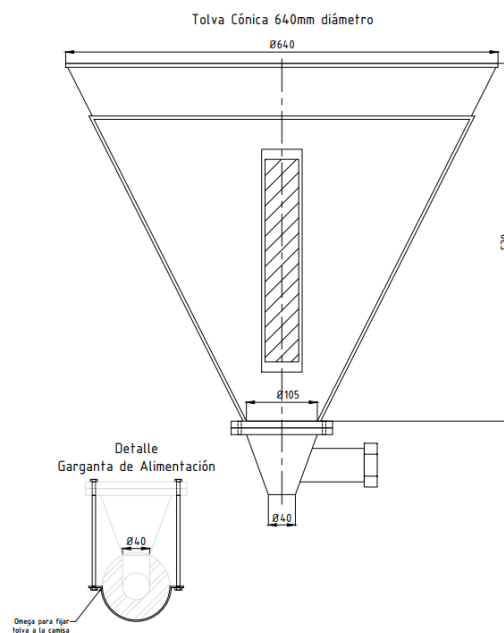


Figura 5-6: Dimensiones tolva y fijación a la camisa.

5.2. Camisa y garganta de alimentación

La camisa o barril de la extrusora es fundamentalmente un cilindro bridado. En un extremo presenta la brida donde se coloca el cabezal. En el otro, puede hallarse otra brida que se acopla al reductor de la transmisión. La garganta de alimentación puede estar sobre la propia camisa o sobre un cilindro propio que se monta entre la transmisión y la camisa, como se ilustra en la Figura 5-7. La camisa debe tener orificios donde se colocan las termocuplas.



Figura 5-7: Camisa de una extrusora.

Tiene que soportar presiones relativamente altas, de hasta 70 MPa (10.000 psi), y debe poseer una buena rigidez estructural para minimizar la deflexión. Deben soportar los efectos térmicos de temperaturas altas, en casos extremos de 400 °C [2] [25]. Deben tener buena resistencia al desgaste. Pueden ser construidas en acero al carbono o acero inoxidable [2]. Esta última opción aumenta los costos, dado que es más difícil de maquinar y es una aleación más cara que la primera.

La gran mayoría de los barriles de extrusora están fabricados con una superficie interna resistente al desgaste para aumentar la vida útil. Si se construyen con una pieza forjada o fundida, se nitrura el interior de la camisa. Puesto que el nitrurado es susceptible a grietas o corrosión se pueden utilizar otras alternativas si la aplicación es muy exigente:

Pueden estar contruidos con una camisa interior, logrando camisas bimetálicas fabricadas mediante fundición centrífuga. Las aleaciones utilizadas en la camisa son Colmonoy 5 y 6 con 9 al 17% de Cromo; Stellite 6 y 12 con el 27 a 32% de Cromo; y Xaloy 306, 420 y 600 con 9 al 30% de Cromo [25]. Estos recubrimientos se utilizan en casos donde la corrosión es un factor importante para tener en cuenta. Otros fabricantes como Golche S.R.L. [17] utilizan acero Böhler V-820 (acero aleado de cromo-níquel-aluminio) con un nitrurado superficial.

Existen extrusoras refrigeradas por agua, las cuales poseen un sistema de circulación de agua por dentro de la camisa. Se omite su análisis debido a que escapa al alcance del trabajo.

Se recomienda mantener juegos radiales reducidos entre las hélices del tornillo y la pared interna de la camisa para evitar el retroceso del material fundido y posibles fluctuaciones en el caudal de salida. Los juegos radiales recomendados según el diámetro del tornillo son [2]:

- **Tornillos de hasta 60 [mm] de diámetro, aproximadamente 0,1 [mm]**
- Tornillos de hasta 120 [mm] de diámetro, aproximadamente 0,13 [mm]

Para favorecer el flujo del plástico, puede aplicarse un rebaje en la entrada del tornillo de unos 0,25 [mm], y/o en su extremo de hasta 0,50 [mm].

El cuello de alimentación es la sección de la camisa donde el material se introduce en los canales del tornillo. Se ubica en el inicio del tornillo, en la zona de alimentación.

Un aspecto fundamental es que no se genere demasiada transferencia de calor hacia la garganta de alimentación y la tolva que provoque una sobre temperatura del polímero en el ingreso a la extrusora. Si la temperatura del polímero aumenta demasiado, puede adherirse a la superficie de la abertura de alimentación, lo que provoca una restricción del flujo hacia la extrusora. A su vez, el polímero se adhiere a la superficie del tornillo provocando problemas en el transporte de sólidos porque las partículas de polímero que se adhieren al tornillo no se moverán hacia adelante y restringirán el movimiento hacia adelante de las otras partículas de polímero.

Para garantizar un servicio continuo de la extrusora existen principalmente dos diseños:

1. Extrusora con la garganta de alimentación separada del resto de la camisa. En la conexión de la garganta de alimentación a la camisa se incorpora una barrera térmica de manera de disminuir la transferencia de calor desde la zona donde se encuentran las resistencias y desde donde se funde el material.
2. Extrusoras con refrigeración de la tolva, manteniendo una temperatura apropiada. Este diseño incorpora la garganta de alimentación directamente en la camisa de la extrusora. No se debe enfriar por demás ya que esto disminuye considerablemente el rendimiento de la máquina.

Sumado a las consideraciones térmicas, se debe realizar un diseño mecánico que permita el correcto ingreso del material en la extrusora. La geometría de la garganta de alimentación debe ser tal que la restricción al ingreso de material sea mínima. Las geometrías más comunes de la boca de alimentación se muestran en la Figura 5-8.

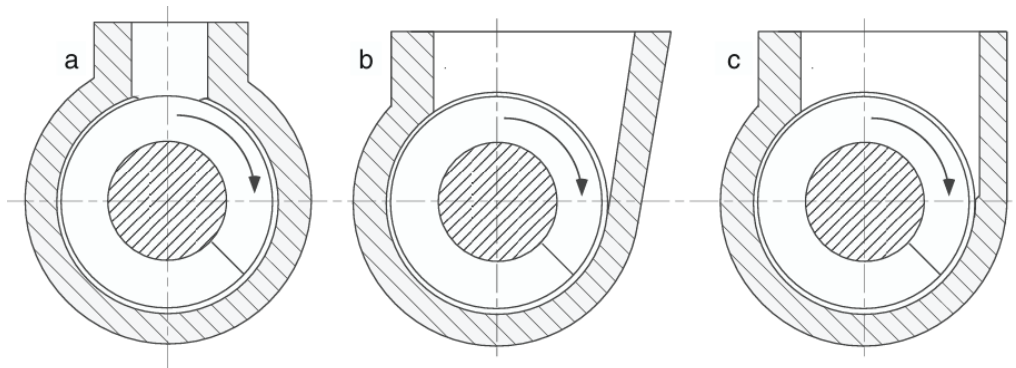


Figura 5-8: Diferentes geometrías de gargantas de alimentación.

A continuación, se describe brevemente las geometrías mostradas:

- Es la geometría más utilizada.
- Geometría utilizada usualmente en extrusoras donde el material ingresa fundido. Si la masa que ingresa a la extrusora presenta cierta rigidez puede producir que se generen fuerzas laterales significativas sobre el tornillo. Esto puede provocar incluso que se descentre el tornillo y entre en contacto con la camisa.
- Tiene un socavón para mejorar la capacidad de admisión, pero la cuña pronunciada se elimina mediante una sección plana orientada más o menos en la dirección radial.

En cuanto a la forma de la apertura de entrada, esta suele ser circular o cuadrada. Debe ser igual a la forma de la tolva que se conectará. Algunos autores recomiendan que la garganta de alimentación tenga forma rectangular en los casos donde se utiliza material escamado o triturado, ya que reduce la chance de puentes u obstrucciones de material. [2]

5.2.1. Relevamiento

Al momento del relevamiento no se hallaba la camisa con el resto del conjunto. Se decidió presentar un croquis a partir de los datos levantados durante las visitas, para tener como referencia. Para determinar la forma de la camisa se comenzó por medir el diámetro de las resistencias calefactoras (ver sección 5.9.1). Se sabe que las mismas se colocan en la parte externa de la camisa, por lo que los diámetros deben coincidir. Luego el diámetro resultó $D_{ext} = 100 \text{ [mm]}$.

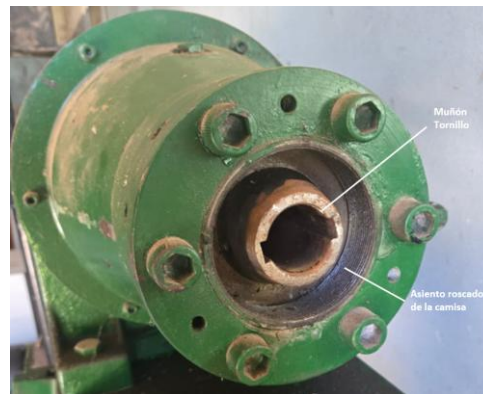


Figura 5-9: Detalle alojamiento camisa.

Para determinar la conexión con la caja reductora se estudió el asiento sobre la brida de la Figura 5-9. Se observó que allí la camisa presentaba un roscado de diámetro externo de $D_r = 97 \text{ [mm]}$. La profundidad de la zona de roscado era igual a la de la brida, que resultó ser de $L_{brida} = 35 \text{ [mm]}$. El ancho de la brida resultó de $D_{brida} = 200 \text{ [mm]}$.

El largo de la camisa original es imposible de determinar. Se sabe que el largo de la sección útil del tornillo es de $L_{tornillo} = 750 \text{ [mm]}$, se esquematizó una camisa del mismo largo, con una sección para la brida de los filtros.

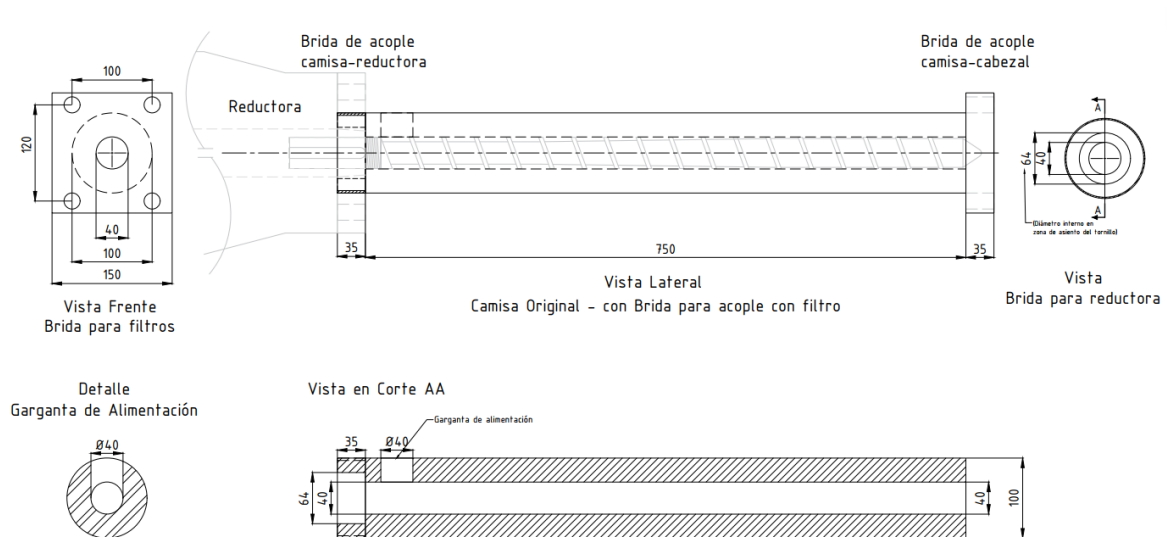


Figura 5-10: Esquemático de la camisa.

Para la sección que se acopla a la brida del reductor se propuso a modo esquemático un cambio en la sección interior, para permitir el alojamiento de la manga de asiento del tornillo. Se supuso que no poseía agujeros para termocupas, dado que el tablero poseía solo un pirómetro (ver sección 5.10.1) y el cabezal presentaba un orificio para colocar una termocupa (ver sección 5.5.1). Se supuso que la garganta de alimentación tenía el mismo diámetro que la boquilla de la tolva.

Se presentó un croquis en la Figura 5-10 para facilitar el entendimiento del sistema.

5.3. Tornillo

El tornillo es, junto con la camisa y el cabezal, el componente más importante de la máquina. Transmite el movimiento rotante del motor al plástico, transportándolo hacia delante por arrastre y fundiéndolo por fricción.

5.3.1. Geometría

La geometría de su filete es uno de los factores más importantes para determinar el rendimiento de la máquina.

El caso de estudio está compuesto por un solo filete, donde el paso (distancia axial entre dos puntos sucesivos de un filete) es aproximadamente igual al diámetro. A lo largo del tornillo, la profundidad del canal se reduce para comprimir el material y favorecer el fundido.

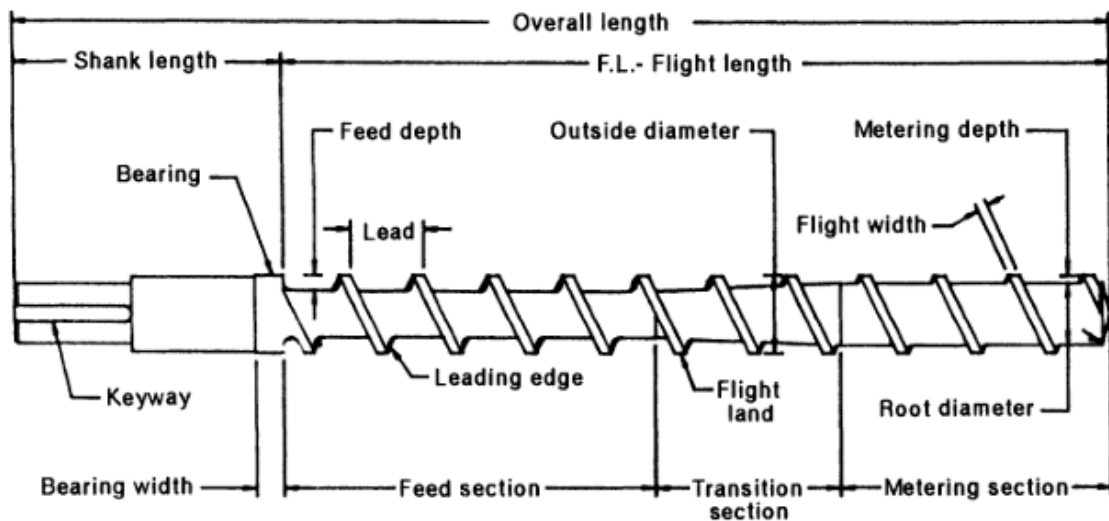


Figura 5-11: Diagrama esquemático del tornillo. [2]

En función de la profundidad del canal, pueden definirse tres etapas con diferentes funciones y características:

Alimentación (feed): Sección de mayor profundidad del canal. El transporte de material aquí se da con todas las escamas en estado sólido. Las escamas se comienzan a comprimir entre sí, reduciendo su espacio. Las ubicadas en la parte superior sufren la fricción con la camisa, que es el mecanismo que impulsa hacia adelante las partículas. Esto comienza a elevar la temperatura del polímero.

Compresión (transition/melting): En esta etapa se da el cambio de altura del canal, reduciéndose bruscamente. El material desarrolla una capa de fundido en contacto con la camisa, por lo que el mecanismo de transporte comienza a darse por caudal por arrastre (ver sección 0). El calor generado por el corte que sufre el material comienza a fundirlo.

Dosificación (metering/pumping): Aquí se da el pico de presión de la extrusora. La caída de presión hacia adelante hace que el tornillo trabaje como una “bomba” transportando material. La compresión en el material sigue aumentando ya que la altura del canal es mínima, la tasa de corte es alta debido a la poca sección de canal y el material idealmente se vuelve un fundido total.

Puede ocurrir que debido al aumento de compresión el material se sobrecaliente, lo cual es indeseable ya que se provocan daños en la estructura molecular del PET. [2, p. 209]

Los parámetros geométricos más importantes se definen a continuación.

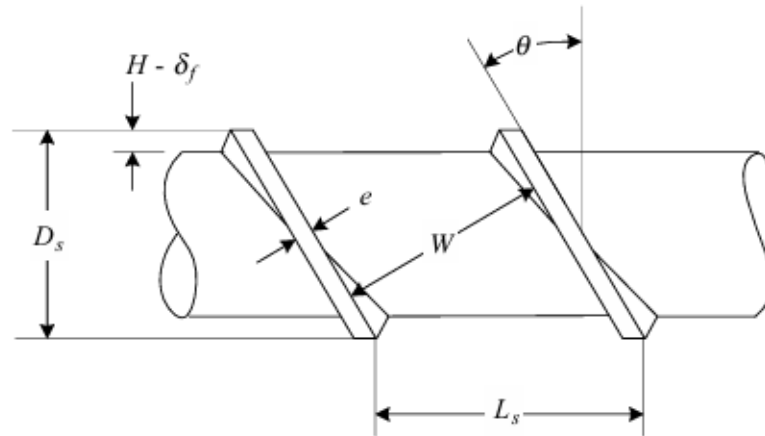


Figura 5-12: Parámetros geométricos del tornillo. [11]

- D_s : Diámetro del tornillo
- H : Profundidad del canal. Distancia desde la parte superior del filete del tornillo hasta la raíz.
- δ_f : Huelgo entre tornillo y camisa.
- L_s o p : Paso. Distancia axial entre dos puntos del filete ubicados sobre una línea recta paralela al eje.
- θ : Ángulo de hélice: Ángulo que forman los vuelos con respecto a una línea perpendicular al eje del tornillo. Se calcula como $\tan \theta = L_s / (\pi D)$
- W : Ancho efectivo del canal de tornillo. El canal se forma por los flancos de los filetes, el núcleo del tornillo y la pared interior de la camisa. Se calcula, (despreciando el ancho del propio filete) como: $W = \pi \cdot D \cdot \sin(\theta)$
- Flanco trasero del filete: Borde trasero del filete.
- Flanco delantero del filete: Borde frontal del filete.
- Enchavetado: Extremo del tornillo que contiene la chaveta que encaja en el eje del reductor.

- D_{int} : Diámetro de la raíz: Distancia desde el fondo del canal de un lado al fondo del canal en el lado opuesto. Se calcula como
- L : Longitud del tornillo: Distancia efectiva que recorre el polímero, desde la alimentación en la garganta de la tolva hasta la punta del tornillo.
- L/D : Relación L/D : Longitud del tornillo dividida por el diámetro. Es un número adimensional que caracteriza la forma del tornillo. Está asociada al tiempo de residencia, que se puede definir como el tiempo que tarda una partícula de polímero en recorrer el tornillo hasta salir por el cabezal.
- ξ o CR : Relación de compresión: Relación de la profundidad del canal en la zona de alimentación con la profundidad en la zona de compresión.

Se calcula como $\xi = \frac{D_s - D_{int\ inicial}}{D_s - D_{int\ final}} = \frac{H_{inicial}}{H_{final}}$.

Es un parámetro que determina la forma del canal del tornillo. Existen relaciones de compresión recomendadas para cada tipo de polímero, dado que influyen en la presión que desarrolla el tornillo y en la temperatura que desarrolla el polímero a lo largo del mismo.

Table 4.1 Examples of different screws for different products

Purpose	Polymer	Depth (mm)			Length (diameters)			Total	Compression ratio ^b
		Feed	Transition ^a	Meter	Feed	Transition	Meter		
High-output compounding	LDPE	15	15-6.5T	6.5	6	12	6	24	2.1:1
General purpose	LDPE	15	15-5.5T	5.5	4	10	6	20	2.4:1
	HDPE								
	PS								
Film	LDPE	15	15-3.0S	3.0	10	11	9	20	4.3:1
High-output compounding	PP powder	-	15-7.9T	7.9	-	18	2	20	1.8:1
General purpose	PP	-	15-6.0T	6.0	-	16	-	16	2.2:1
General purpose	PP	-	12.7-5.6T	5.6	-	10.9	9.1	20	2.1:1
General purpose	POM	15	15-5.0T	5.0	4	12	4	20	2.7:1
General purpose	PMMA	15	15-4.0S	4.0	14	1	5	20	3.3:1
Compounding	Nylon 66	-	11.1-9.6T/S	2.8	-	12 + 1/2	7.5	20	3.6:1
Film	PET	15	15-3.0S	3.0	14	1	9	24	4.3:1
Film	UPVC	15	15-7.0T	7.0	4	12	4	20	1.9:1
Low-output compounding	UPVC	15	15-9.0T	9.0	4	7	4	15	1.5:1

^aT = tapered; S = stepped.

^bCross-section basis.

Tabla 5-1: Relaciones de compresión para tornillos. [2]

En la Tabla 5-1 se observan diferentes relaciones de compresión para diferentes materiales, con distinta finalidad. Se observa que para extruir PET en forma de film se recomienda que el canal tenga un escalón para reducir la sección. Esto genera un salto de presión muy importante.

5.3.2. Material

Suele producirse con aceros aleados. Para el cuerpo se suele utilizar acero AISI 4140, AISI 4340, Nitralloy 135-M, Acero Inoxidable AISI 304 o 316, Aceros especiales (CPM-10V, CPM-T440V, CPM-9V, D-2, H-13) o aceros de alta temperatura (Duranickel 301, Inconel 718, o Hastelloy C-276). [16] El fabricante nacional Golche S.R.L. [17] fabrica al tornillo en acero aleado Cr-Ni-Al Böhler V820, con nitrurado superficial.

Para reducir el desgaste sobre la superficie del tornillo suelen utilizarse tratamientos superficiales, como nitruración, endurecimiento a la llama y endurecimiento por envejecimiento, entre otros [16]. Se resumen en la Tabla 5-2. Se suele recubrir toda la superficie del tornillo, no solamente los filetes del tornillo.

Method	Hardness (Rockwell C)	Hardness Depth (Inches)	Cost	Abrasive Resistance	Corrosion Resistance	Adhesive Resistance
Nitriding	60–70	0.010–0.030	C	8	5	7
Dynablue	65–70	0.005–0.010	C	10	6	8
Ion Nitriding	>70	0.010–0.030	1.75C	10	6	8
Flame Hardening	50–55	0.015–0.250	0.5C	5	4	5
Age Hardening	35–45	Fully Hard	4C	8	8	8

Comparison number based on 10 = best, 1 = worst; C = average cost of nitriding.

Tabla 5-2: Tipos de tratamientos superficiales para tornillos. [16]

Otra alternativa es soldar aleaciones duras con cromo o níquel sobre la superficie del tornillo. Asegura mayor durabilidad y dureza, pero es comparativamente más cara que realizar tratamientos superficiales. Se denominan “tornillos bimetálicos”

Polymer	Abrasiveness	Corrosiveness	Base Material	Flight Hardening Material
Nylon 6, LDPE	Soft	Not Corrosive	AISI 4140	Stellite 12, Flame Hardened to 50 RC
Flexible PVC	Soft	Medium	AISI 4140	Stellite 12
FEP	Soft	High	Inconel 718; Hastelloy C-276; AISI 4140	Stellite 12, Age Hardened to 39–42 RC
HDPE, PP, GP PS	Medium	Not Corrosive	AISI 4140	Colomony 56
Rigid PVC	Medium	Medium	AISI 4140; Nitralloy 135M	Colomony 56
High Loadings FR	Medium	High	Inconel 718; Hastelloy C-276	Colomony 56, Age Hardened to 39–43 RC
Glass Filled	High	Not Corrosive	CPM 9V/10V; AISI D2	Heat Treated to 39–43 RC
Clay Filled PVC	High	Medium	Nitralloy 135M	Coltung 1
PTFE/TFE Filled	High	High	AISI 4140	Coltung 1

Tabla 5-3: Materiales de tornillo en función del polímero procesado. [16]

En la Tabla 5-3 se presentan los materiales utilizados en función del polímero. Sabiendo que el PET se hallará reciclado, tendrá una abrasividad mayor que el PET virgen. Se estima que posee una abrasividad y corrosividad media.

5.3.3. Relevamiento

El tornillo sin fin de la extrusora se encuentra completo, aunque presenta corrosión superficial y desgaste. En el momento de ser relevado presentaba suciedad propia de haber estado en funcionamiento en la extrusora. Se lo llevó al edificio de la Facultad de Ingeniería de la U.N.M.D.P. para ser relevado en detalle.



Figura 5-13: Tornillo en su estado original. Imagen Propia

El tornillo es del tipo de rosca derecha. Al girar en sentido horario (visto desde el cabezal) empuja el polímero hacia delante. Se midieron los parámetros geométricos más importantes del tornillo. continuación se presentan los valores obtenidos:

$$L = 752 \text{ [mm]}$$

El largo fue medido desde el inicio del filete roscado hasta la punta del tornillo, dado que no se tenía la camisa al momento de la medición.

$$D_s = 39 \text{ [mm]}$$

$$p = 40,5 \text{ [mm]}$$

$$\theta = 20 \text{ [}^\circ\text{]}$$

$$W = 41,9 \text{ [mm]}$$

$$H_{inicial} = 5,75 \text{ [mm]}$$

$$H_{final} = 1,5 \text{ [mm]}$$

A partir de esas dimensiones se calculó la relación de compresión y la relación entre L/D

$$\xi = CR = \frac{D_s - D_{int \text{ inicial}}}{D_s - D_{int \text{ final}}} = \frac{H_{inicial}}{H_{final}} = \frac{39 \text{ [mm]} - 27,5 \text{ [mm]}}{39 \text{ [mm]} - 36 \text{ [mm]}} = \frac{13,5 \text{ [mm]}}{3 \text{ [mm]}} = 3,83$$

$$\frac{L}{D} = \frac{752 \text{ [mm]}}{39 \text{ [mm]}} = 19,28$$

El peso del tornillo es de 5,5 Kg. Debe tenerse en cuenta para la verificación mecánica del tornillo.



Figura 5-14: Zona de fijación del tornillo.

El tornillo presenta chaveteros en el muñón para fijarse a la transmisión. Tienen un largo de 94,7 [mm], una profundidad de 4,15 [mm] y un ancho de 13,75 [mm]. El largo del muñón es de 111 [mm]. El chavetero posee un extremo redondeado para asegurar que quede en posición la chaveta una vez colocada. Presenta una sección roscada donde se colocaba un sello para impedir el paso del material a la camisa, con un largo de 18,4 [mm]

Tornillo Original - 39mm Diámetro

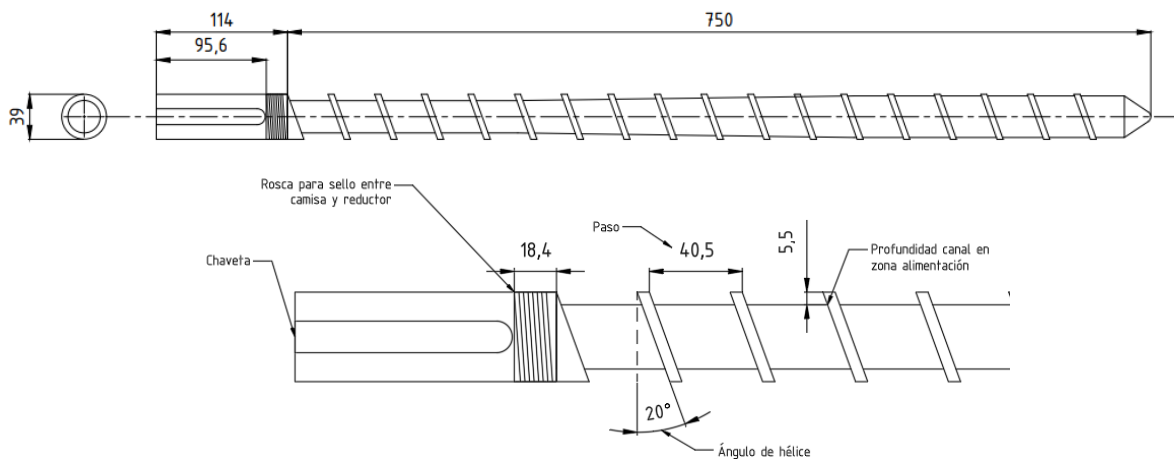


Figura 5-15: Croquis esquemático de medidas del tornillo.

A partir del material incrustado en el tornillo, se determinó que la extrusora previamente había funcionado con Polietileno.

Determinación de la rectitud

Para verificar el estado del tornillo debe medirse su diámetro con un reloj comparador y un micrómetro, como se muestra en la Figura 5-16.

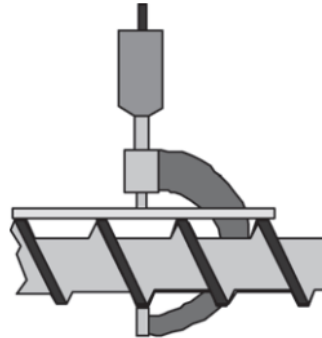


Figura 5-16: Comprobación del diámetro del tornillo.

Para comprobar la rectitud debe colocarse el tornillo en una cama de granito recta, y verificar que no existan holguras al hacerlo rodar. Si existe holgura, puede verificarse con galgas pasa-no pasa. [16]

5.4. Filtros y placa rompedora

En muchas extrusoras se incorpora una placa perforada antes del cabezal. Consiste en un disco metálico que contiene múltiples orificios paralelos al eje del tornillo. Dichos orificios suelen tener un diámetro aproximado de 3 [mm]. [10] Se recomienda que los orificios tengan un chanfleado a ambos lados para no obstruir el paso de material.

Además, antes de llegar al troquel el fundido pasa por una serie de mallas de alambre sostenidas por una placa rígida o que contiene orificios axiales pequeños (llamada placa rompedora). El paquete de la pantalla tiene las siguientes funciones:

- Filtrar los contaminantes y grumos duros del fundido.
- Generar presión en la sección de medición. Una buena presión asegura buena calidad del fundido. [10]
- Forzar al flujo del polímero fundido y borrar de su “memoria” el movimiento circular impuesto por el tornillo. Esta última función tiene que ver con la propiedad viscoelástica del polímero; si el flujo no se forzara, el polímero repetiría su historia de girar dentro de la cámara de extrusión, y tendería a rotar y distorsionar el extruido.
- Mejorar la transferencia de calor al polímero, logrando mayor homogeneidad de temperaturas.

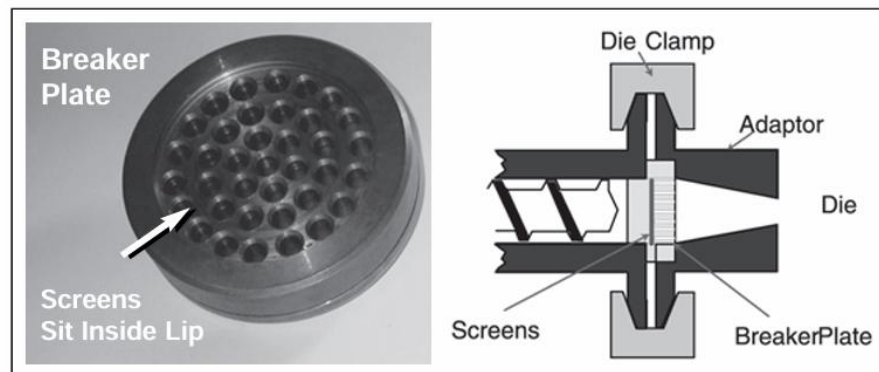


Figura 5-17: Plato rompedor con sello en el final de la extrusora [11]

Cuando se procesan materiales de recuperado (como es el caso de estudio), es conveniente trabajar con un paquete de mallas apropiadas para detener la mayoría de las impurezas. Idealmente se deben instalar 2 manómetros antes y después del cambiador de mallas, para saber en qué momento es necesario retirarlas para limpiarlas. Si se omite el uso de estos elementos, debe verificarse la calidad del extruido cada cierto tiempo para determinar cuándo se tapan dichos filtros, y realizar la tarea de cambio periódicamente.

U.S. Mesh	Opening (in.)	Opening (μm)	Opening (mm)	Void Fraction or Open Area Fraction
4	0.1875	4760	4.760	0.75
40	0.0165	420	0.420	0.66
100	0.0059	149	0.149	0.59
400	0.0015	37	0.037	0.60

Tabla 5-4: Tamaños de filtros [26]

Se recomienda utilizar un paquete de mallas de distinta densidad de hilos para lograr remover la contaminación fina y gruesa. Las mallas más densas filtran contaminantes, mientras que las menos densas atrapan impurezas e impiden que se bloqueen las primeras.

Una configuración típica [15] incluye la malla más gruesa ubicada contra la placa rompedora, con mallas más finas ubicadas aguas arriba. Puede utilizarse una configuración sucesiva de mallas 100-60-30 para lograr un filtrado eficiente.

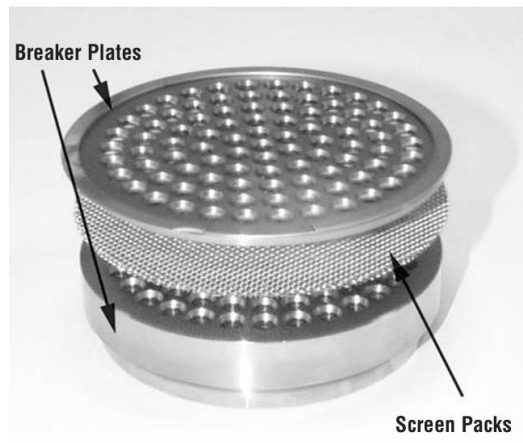


Figura 5-18: Detalle de conjunto de filtros + placas rompedoras. [10]

El cambiador de mallas se instala justamente en la cabeza del cabezal. Consiste en una pieza con dos cavidades donde se alojan dos juegos de placas y filtros. La pieza puede rotar sobre un bulón para permitir tener una u otra cavidad alineada con la camisa. Para cambiar los filtros basta con aflojar dos bulones para permitir el movimiento de dicha pieza, y así intercambiar el paquete de filtros utilizado. Se observa en la Figura 5-19 un detalle del anclaje del cambiador de filtros. Puede ser manual, hidráulico o continuo. Se decide utilizar el método más económico, que es el manual.

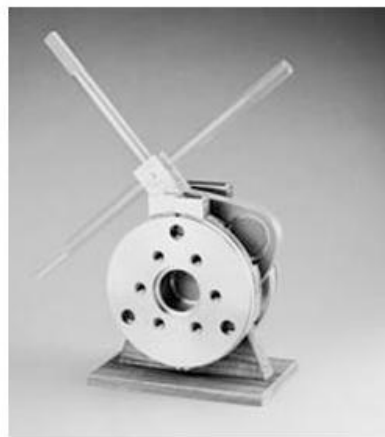


Figura 5-19: Cambiador de filtros manual. [10]

Si bien tener un sistema de filtros es casi obligatorio para recuperar material, debe tenerse en cuenta que el caudal máximo que pueda manejar la máquina se ve reducido, debido a la resistencia al flujo que imponen todos los orificios. Se debe tener en cuenta para el dimensionamiento del motor, en la sección 9.5. Además, aumenta los tiempos de residencia, lo que aumenta las chances de degradación del material. El caudal se vuelve variable en el tiempo, a medida que los filtros se tapan progresivamente. [10]

5.4.1. Relevamiento

La extrusora en su configuración original poseía un sistema de cambiafiltros muy simple. Entre la brida del cabezal y la de la camisa se colocaba una pieza con dos orificios para alojar a los filtros y placas rompedoras. Las bridas se sujetaban por cuatro pernos. Tenía una palanca que pivotaba sobre el cabezal para desplazar horizontalmente el filtro y así permutar entre los dos filtros.

Al momento de relevar la máquina se encontraba la palanca con la placa portafiltros. Los filtros propiamente dichos, junto con la placa rompedora, se hallaban ausentes.



Figura 5-20: Sistema cambiador de filtros original manual.

A partir de los elementos hallados se determinó que el sistema trabajaba de la siguiente manera:

Filtros y Cambiador de Filtros

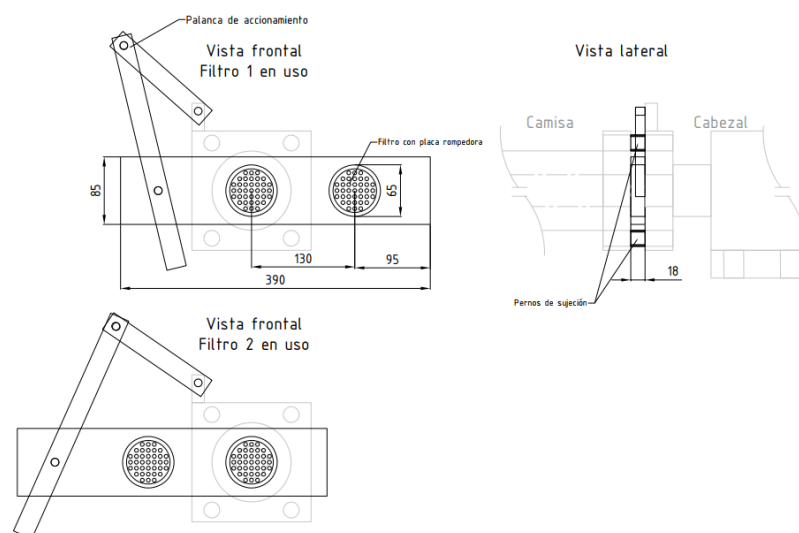


Figura 5-21: Croquis del sistema original de cambio de filtros.

5.5. Cabezal

El troquel o cabezal es una de las partes críticas de la extrusora. La forma del orificio del troquel determina la forma de la sección transversal del extruido.

El análisis del flujo en las matrices de extrusión es muy difícil debido a la naturaleza del polímero fundido. El diseño de troqueles, por lo tanto, sigue siendo en gran medida una ciencia empírica.

Existen distintos tipos de matrices para formar distintas secciones transversales en el extruido. Se puede enumerar los perfiles de troquel comunes y las formas extruidas correspondientes:

- 1) perfiles sólidos,
- 2) perfiles huecos, como tubos,
- 3) recubrimientos de alambre y cable,
- 4) hoja y película y
- 5) filamentos.

Para la aplicación particular que se le dará a la extrusora en la ONG, se busca que lo extruido sea filamento circular, con la posibilidad de un posterior pelletizado.

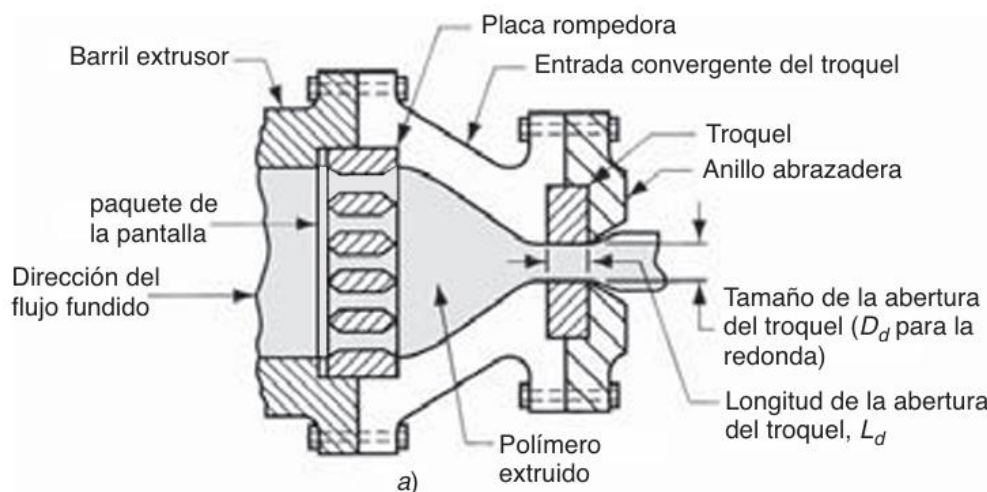


Figura 5-22: Vista en corte de la sección transversal de un troquel circular [1]

Se debe tener en cuenta que el diámetro de la sección circular del filamento extruido será distinto al diámetro del agujero del troquel por el que es extruido. Esto se da porque inmediatamente posterior a la salida de la matriz, el polímero tiende a expandirse. (Ver sección 3.3.6). Muchas veces para limitar la expansión se aplican métodos como:

- 1) Abertura del troquel suficientemente extensa como para eliminar la memoria del polímero.
- 2) Estirar el polímero a la salida

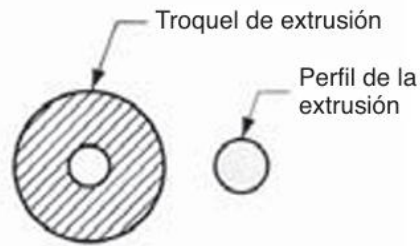


Figura 5-23: Vista frontal de troquel con perfil extruido [2] p. 268

Los cabezales suelen producirse con acero aleado AISI 4140, que garantiza buena resistencia mecánica y buena maquinabilidad para ser producidos. El interior suele recubrirse con cromo o níquel para mejorar el acabado superficial y así mejorar el flujo. [16]

5.5.1. Relevamiento

El cabezal presenta la salida del material a 90° de la dirección axial de la camisa. Se asume que está dispuesto de esa manera para permitir que los hilos de fundido salgan en dirección vertical hacia abajo, y caigan sobre la batea de enfriamiento inmediatamente.



Figura 5-24: Cabezal original, con material remanente.

Presenta 10 orificios de salida, con un diámetro promedio 5,5 [mm] cada uno. Esto entrega un área total de $\frac{10 \cdot \pi \cdot 0,0055^2}{4} = 2,4 \times 10^{-4} [m^2]$. El cabezal aún presentaba material de la última puesta de marcha de la máquina. A partir de su color, resistencia a la llama y olor se determinó que se trataba de polietileno. Por la falta de disponibilidad de tiempo se decidió no limpiar el interior del cabezal. No se poseían tampoco las herramientas para aflojar los pernos que fijaban los componentes entre sí.

Se observó que poseía un agujero en su lateral, que probablemente se utilizaba para alojar a la termocupla.

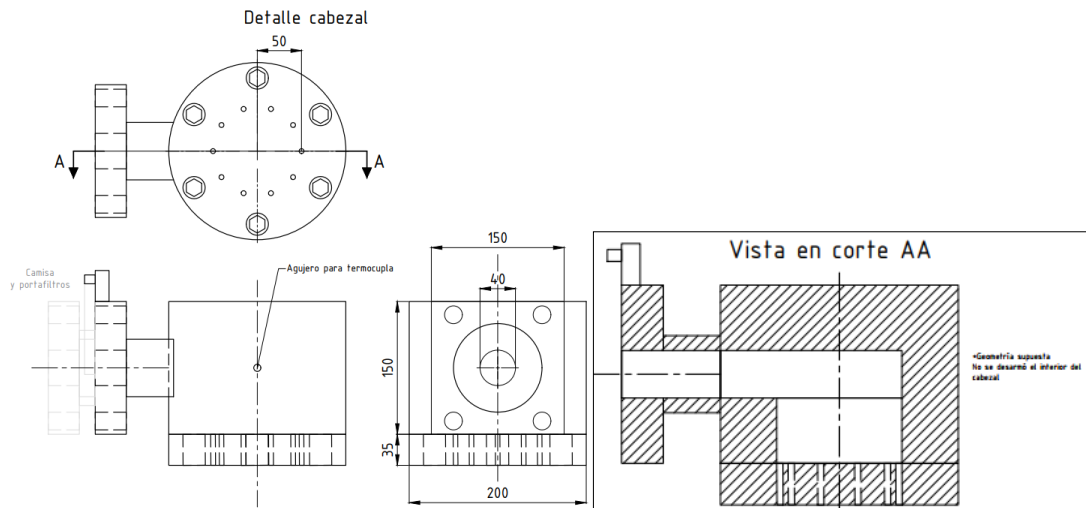


Figura 5-25: Croquis del cabezal

A partir de las imágenes se construyó un boceto del cabezal, como se muestra en la Figura 5-25. La sección en el interior del cabezal se decidió dibujar de la manera más simple posible en la vista AA, dado que no se pudo realizar el relevamiento correcto por los motivos antes expuestos.

Un cabezal con un diseño apropiado debería presentar secciones cónicas y radios de acuerdo que posibiliten un mejor flujo dentro de sí. Tener secciones como las dibujadas implica que puede haber partículas que se frenan y no pueden salir, aumentando así el tiempo de residencia y la chance de degradación del material.

5.6. Motor

El motor es el encargado de proveer la potencia para girar el tornillo. Gran parte de la potencia eléctrica se aprovecha en forma de calor, ya que la fricción que se produce por corte en el material lo calienta hasta fundirlo. Para las extrusoras que trabajan fundiendo material, es importante determinar la potencia teniendo en cuenta que deben fundir el material además de transportarlo y mezclarlo.

Pueden hacerse aproximaciones para determinar el tamaño del motor. Las mismas se detallan en la sección 9.4.2, dado que precisan del caudal estimado para su cálculo. A continuación, se listan recomendaciones de la bibliografía para dimensionar el motor.

Una relación estimada para comenzar el dimensionamiento de una máquina indica que cada $10 \left[\frac{lb}{hr} \right] = 4,536 \left[\frac{Kg}{h} \right]$ de flujo de material se requiere 1 [HP] de potencia del motor. [10].

Puede relacionarse el flujo de caudal que puede transportar una extrusora con su diámetro de tornillo, de manera aproximada. Se indica a continuación la siguiente tabla.

Diameter		Power	
(in.)	(mm)	(kW)	(HP)
1.5	38	12	16
2.5	50	40	50
3.5	90	85	115
4.5	100	130	175
6.0	150	230	310
8.0	200	400	530

Tabla 5-5: Estimación de potencias en función del diámetro de tornillo. [10]

La Tabla 5-5 indica que para un tornillo simple de $D_s = 38 [mm]$, se requiere un motor de al menos $P = 12 [kW] = 16 [HP]$. Para dicha estimación se indica que se trabajó con un tornillo de camisa lisa, sin ventilación, con una relación $\frac{L}{D} = 24$.

Se observa que la potencia estimada para el tornillo es mucho mayor a la potencia que presenta el motor. Si se desea colocar otro motor, debe verificarse que la transmisión sea capaz de soportar el aumento de potencia [15], lo cual se estudia en la sección 5.7.2.

5.6.1. Relevamiento

El motor eléctrico original es del tipo asíncrono trifásico de 4 polos. Es el modelo “Genalex (General Electric) xp434”. Sus características de chapa indican que tiene:

- Potencia Nominal: $P = 4,416 [kW] = 6 [HP]$
- Factor de potencia: $\cos(\theta) = 0,85$
- Velocidad nominal: $n = 1455 [rpm]$
- Corriente Nominal: $I_n = 9,55 [A]$
- Rendimiento: $\eta = \frac{P_{mec}}{P_{eléctrica}} = 82,7\%$



Figura 5-26: Detalle de la placa de datos. Imagen propia.

Medición de resistencias

En la primera visita realizada a la planta se midió mediante un megóhmetro la resistencia de aislación entre cada fase y la carcasa para asegurar el correcto funcionamiento del motor. Se observó que una de las fases presentaba un valor notoriamente menor al deseado:

- Resistencias de aislación fase-carcasa:

$$R_{Fase\ 1-Carcasa} = 16 \dots 17 [M\Omega] - (Medida\ a\ 250\ V)$$

$$R_{Fase\ 2-Carcasa} = 200 \dots 205 [M\Omega] - (Medida\ a\ 1000\ V)$$

$$R_{Fase\ 3-Carcasa} = 80 \dots 90 [M\Omega] - (Medida\ a\ 1000\ V)$$

Asimismo, se midió la resistencia de aislación entre fases para verificar que no hubiera perforaciones que provoquen un cortocircuito entre fases.

- Resistencias de aislación entre fases:

$$R_{Fase\ 1-2} = 277 [M\Omega] - (Medida\ a\ 1000\ V)$$

$$R_{Fase\ 2-3} = 100 [M\Omega] - (Medida\ a\ 1000\ V)$$

$$R_{Fase\ 2-3} = 180 [M\Omega] - (Medida\ a\ 1000\ V)$$

- Luego se utilizó el multímetro para medir la resistencia propia de cada bobinado.

$$R_{Fase\ 1} = 2,5 [\Omega]$$

$$R_{Fase\ 2} = 2,5 [\Omega]$$

$$R_{Fase\ 3} = 2,5 [\Omega]$$

Se observa que la resistencia de aislación entre fases varía mucho entre las tres medidas, al igual que las resistencias entre fase y carcasa. Esto implica que, si se desea reutilizar el motor, debe rebobinarse para reparar la aislación.

La potencia nominal del motor es de 6 [HP]. Las estimaciones que indicadas más arriba establecen que para un tornillo de ese diámetro la potencia debería estar en el orden de los

16 [HP]. Si bien esa estimación se realizó con un tornillo más largo (con mayor relación L/D), la diferencia de potencia resulta llamativa y puede ser un motivo por el cual la aislación se halla dañada. Puede que utilizar la máquina para recuperar plástico haya exigido en exceso al motor, dañándolo.

5.7. Transmisión – Reductor – Correa

El motor eléctrico gira a una velocidad excesiva para el tornillo, usualmente a 1500/1800 [rpm]. Debe reducirse la velocidad para poder trabajar de manera adecuada con el material, a 80/150 [rpm]. Se utiliza una transmisión para multiplicar el torque y reducir la velocidad. Es una parte importante del costo de la máquina.

Puede utilizarse un sistema de engranajes rectos de dos etapas. A veces en lugar de engranajes rectos se utilizan engranajes con doble helicoide tipo Herringbone dado que se reduce el esfuerzo axial sobre los rodamientos [15]. Otra alternativa es utilizar un sistema de engranaje helicoidal + tornillo sin fin, lo que reduce el tamaño y precio, pero reduce el rendimiento del sistema (estos reductores tienen una eficiencia que oscila entre el 75% y el 90%). [15]

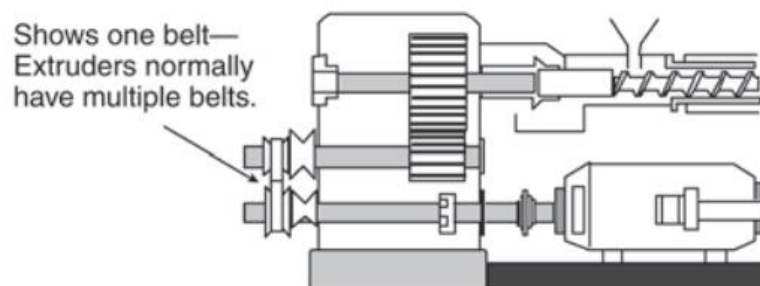


Figura 5-27: Esquema de la transmisión de una extrusora. [16]

Utilizar una correa entre el eje del motor el reductor permite modificar de manera simple la velocidad del sistema, variando los tamaños de las poleas. Además, funciona como acople mecánico elástico entre los dos elementos, reduciendo el esfuerzo por golpes o cambios bruscos de fuerza sobre el motor. Como desventajas, introduce otro elemento móvil en que aumenta la posibilidad de roturas. Requiere del mantenimiento propio de una correa, que es mayor que un reductor. Además, puede traer pérdidas en el sistema del orden del 5% al 10%. [15]

La mayoría de las extrusoras de tornillo simple de baja velocidad poseen transmisiones con una relación reductora de 10:1 hasta 30:1. Mientras más corto es el tornillo, mayor reducción suele utilizarse para aumentar los tiempos de residencia del material. [2]

5.7.1. Relevamiento correas y poleas

El sistema de correas comunicaba el motor eléctrico con el reductor. Eran de forma trapezoidal, con las siguientes dimensiones:

Tipo: Trapezoidal – Largo: $l = 1480 \text{ [mm]}$

Poleas de los extremos: $D_1 (\text{motor}) = 240 \text{ [mm]}$

$D_2 (\text{reductor}) = 160 \text{ [mm]}$

Relación de transmisión: $r_{pol} = \frac{D_1}{D_2} = 1,5:1$

El reductor poseía una polea doble para la transmisión de potencia, mientras que el motor presentaba una polea triple.



Figura 5-28: Poleas del reductor (izquierda) y motor (derecha)

El sistema aún conservaba las guardas originales para evitar contactos peligrosos.

Las correas trapezoidales dentadas que se encontraron eran modelo BTS BX 92. El largo medido resultó de 1480 [mm] . Según el fabricante, las dimensiones de esta correa son las siguientes: Ancho superior: 17 [mm] – Altura 11 [mm] .

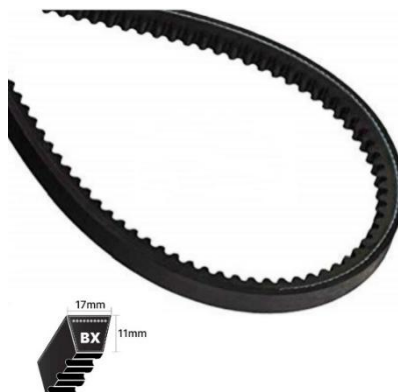


Figura 5-29: Correa BX 92

5.7.2. Relevamiento Reductor

El reductor se hallaba en buen estado. Se decidió por el estado general no desarmar el sistema durante el relevamiento. Se obtuvo que su relación de transmisión es del orden de $r_{red} = 8,5:1$.

Se observó que, con las poleas colocadas de la manera relevada, **la correa multiplicaba la velocidad del sistema**. Esto entregaría una velocidad de:

$$n_{sist\ actual} = \frac{n_{mot}}{r_{pol} \cdot r_{red}} = \frac{1455[rpm]}{8,5} 1,5 = 264,7 [rpm]$$

De acuerdo con lo relevado en la sección 4.1, resulta una velocidad **excesivamente elevada** para el sistema. Se concluye entonces que en algún momento del montaje se colocaron de manera errónea las poleas, multiplicando la velocidad. Esto además de multiplicar la velocidad provoca un aumento en el torque requerido del motor, lo cual **es otro motivo que pudo haber generado una sobrecarga y un daño al motor**.

Se calcula nuevamente la velocidad del sistema con las poleas en la posición inversa. Con esto, se determinó la velocidad nominal original del sistema.

$$n_{sist} = \frac{n_{mot}}{r_{pol} \cdot r_{red}} = \frac{1455[rpm]}{8,5 \cdot 1,5} = 114 [rpm] = 1,9 \left[\frac{vueltas}{seg} \right]$$

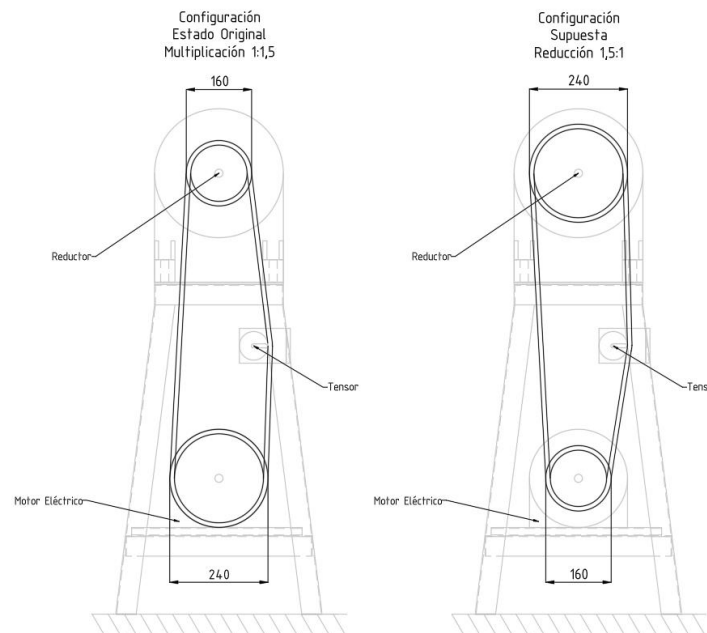


Figura 5-30: Corrección ubicación poleas

Puesto que la camisa y el cabezal estaban suspendidos, la estructura de soporte del sistema era la encargada de soportar todo el peso de la máquina.



Figura 5-31: Reductor y soporte.



Figura 5-32: Detalle asiento del tornillo

Se observó además el sistema de sujeción del tornillo al reductor. Se muestra en la Figura 5-32 el enchavetado sobre la manga o asiento donde se aloja el tornillo. Se supone que las cargas axiales son soportadas por este asiento, en cuyo caso se infiere que posee un sistema de apoyos que soporten esfuerzo axial, como rodamientos cónicos.

Si bien no se desarmó el reductor, por el diseño visto desde fuera se puede inferir el sistema de transmisión utilizado, con un tren de engranajes de ejes paralelos.

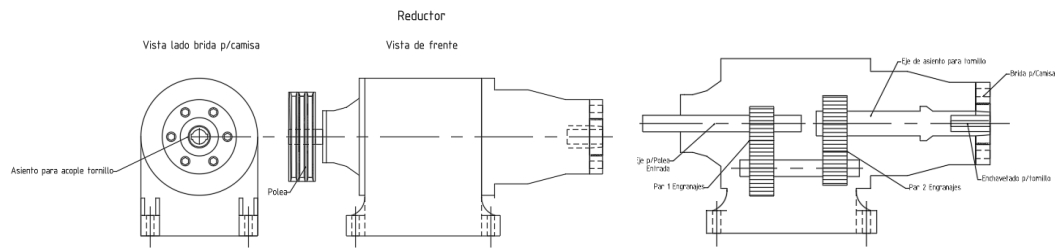


Figura 5-33: Croquis esquemático reductor

Con todos los elementos de la transmisión definidos, se representa la disposición más probable de los elementos de la transmisión.

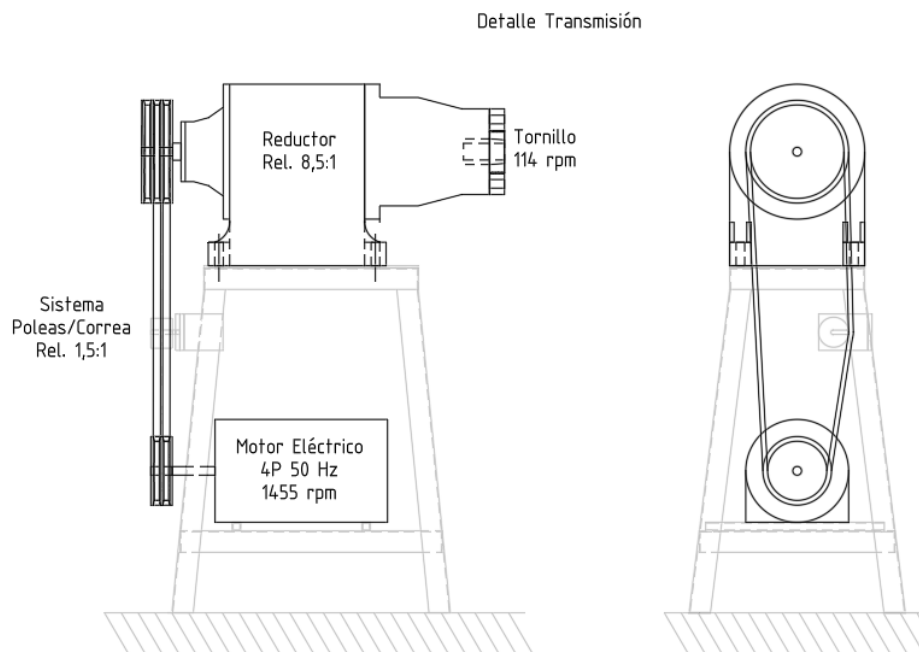


Figura 5-34: Croquis detalle transmisión del sistema

5.8. Rodamiento

Los rodamientos del tornillo se alojan en la caja reductora. Son los elementos que deben soportar todo el peso y los esfuerzos del tornillo, dado que en el otro extremo el tornillo gira libremente sobre la camisa.

El rodamiento más solicitado es el axial. Debe soportar esfuerzos axiales además de esfuerzos circunferenciales, debido a la presión que desarrolla el sistema. Puede calcularse el esfuerzo requerido con la siguiente expresión: [15]

$$F_{axial} = P_{cabezal} \cdot \text{Área seccional tornillo} = P_{cabezal} \cdot \pi \cdot \frac{D_s^2}{4}$$

Se debe dimensionar al rodamiento para tener una vida útil igual o mayor a la del tornillo. Debe tenerse en cuenta que la fuerza puede fluctuar en función de los cambios de presión y velocidad que pueda tener la máquina.

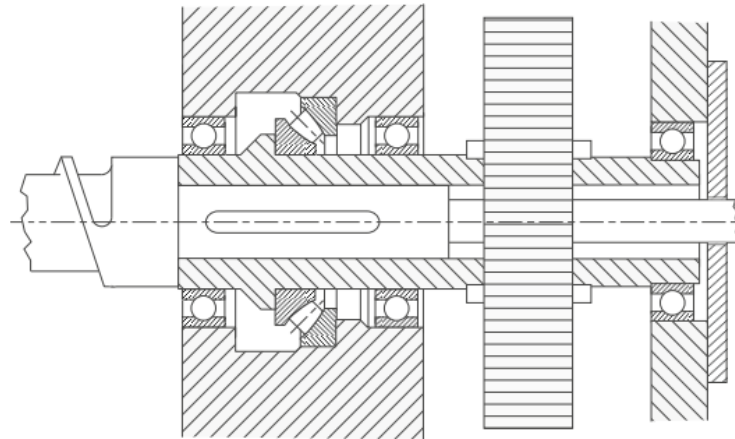


Figura 5-35: Representación esquemática de la fijación del tornillo. [15]

En la Figura 5-35 se muestra un alojamiento posible para el tornillo. El eje está fijado mediante el enchavetado a un eje hueco o muñón de la transmisión. Sobre ese eje se asienta el engranaje que lo vincula al resto de la transmisión. Utiliza cuatro rodamientos, tres de bolas para soportar el peso del sistema y uno cónico para soportar el empuje axial.

5.8.1. Relevamiento

El rodamiento de soporte está alojado en la estructura del reductor. Si se dimensionó de acuerdo con la potencia del motor original, puede darse el caso en que deba ser reemplazado para soportar la potencia y los esfuerzos transmitidos. Sin embargo, por los parámetros de diseño que se suelen utilizar para estos rodamientos se supone que el dimensionamiento original tuvo en cuenta factores de seguridad que muy probablemente lo vuelvan apto para la actualización.

5.9. Resistencias eléctricas – Pirómetros

Las extrusoras poseen resistencias de calentamiento ubicadas en el exterior de la camisa. Suelen tener formato de abrazadera, para dirigir el calor que generan de manera eficaz hacia el interior de la camisa. Son un elemento muy importante para la extrusión, ya que se encargan de controlar la temperatura del material. Son accionadas usualmente por un controlador programable (PLC) o desde pirómetros ubicados en el tablero de control.

5.9.1. Relevamiento

La máquina tenía varias resistencias tipo abrazadera listas para ser instaladas, de diferentes medidas. Se disponía de siete resistencias para la camisa, y tres resistencias para el cabezal.



Figura 5-36: Resistencias tipo abrazadera.

Cada resistencia tenía una inscripción donde se detallaba su largo (axial) y su valor resistivo, el cual fue medido con un multímetro. Se observó que, si bien estaban en buen estado, los terminales de conexión presentaban signos de corrosión.

Las resistencias para la camisa tenían las siguientes características:

Modelo 1: Resistencia 107-50

- $R = 107 \text{ } [\Omega]$
- $D_{int} = 100 \text{ } [mm]$
- $L = 50 \text{ } [mm]$
- $Cantidad = 2 \text{ } [unidades]$

Modelo 2: Resistencia 107-60:

- $R = 107 \text{ } [\Omega]$
- $D_{int} = 100 \text{ } [mm]$
- $L = 60 \text{ } [mm]$
- $Cantidad = 5 \text{ } [unidades]$

Las resistencias para el cabezal eran de mayor diámetro:

Modelo 3: Resistencia 157-45:

- $R = 157 [\Omega]$
- $D_{int} = 200 [mm]$
- $L = 45 [mm]$
- $Cantidad = 1 [unidades]$

Modelo 4: Resistencia 142-38:

- $R = 142 [\Omega]$
- $D_{int} = 200 [mm]$
- $L = 38 [mm]$
- $Cantidad = 1 [unidades]$

Modelo 5: Resistencia 137-10:

- $R = 137 [\Omega]$
- $D_{int} = 200 [mm]$
- $L = 10 [mm]$
- $Cantidad = 2 [unidades]$

Por último, se tenía una resistencia de menor diámetro, que se dedujo que podía utilizarse para calefaccionar la tolva.

Modelo 6: Resistencia 62-35:

- $R = 62 [\Omega]$
- $D_{int} = 60 [mm]$
- $L = 35 [mm]$
- $Cantidad = 1 [unidades]$

El accionamiento de las resistencias se realizaba desde el tablero de control. Montado sobre la puerta se hallaba un pirómetro o controlador digital de temperatura marca Gaynor, con una entrada para termocuplas y un contacto seco para energizar las bobinas de los contactores que comandan las resistencias. Incluía además un indicador visual en forma de reloj informado la temperatura del sistema. En el frente del aparato se alojaba una botonera para configurar la temperatura deseada.



Figura 5-37: Pirómetro original. Imagen propia.

5.10. Panel Eléctrico

El panel eléctrico debe alojar a todos los componentes necesarios para la protección y el comando de la máquina. En función de la complejidad del sistema puede incluir un PLC, es decir, una computadora industrial para automatizar y controlar el proceso, un pirómetro, un variador de velocidad para controlar la velocidad del motor, y todos los elementos de protección y maniobra de las resistencias, motores o bombas anexas al sistema. Se detalla el diseño a lograr en la sección 11.

5.10.1. Relevamiento

La máquina presentaba al momento del relevamiento tres tableros.

Tablero 1: Protección del motor de la pelletizadora

En el primero, se hallaban las protecciones de la pelletizadora:

-Guardamotor: Allen Bradley 140M-F8CN, con corriente nominal $I_n = 45 A$ – Incluye contactos auxiliares SA11 (1NA, 1NC).

-Contactor: Allen Bradley 100-C37D10 - $I_n = 37 A$ – Incluye contacto auxiliar 100-SB10 (1NA) y bloque de contactos auxiliares 100-FA11 (1NA, 1NC). Bobina 230V 50/60 Hz

-Relé térmico. E1 Plus IEC 193. Regulado en $I_r = 15 [A]$

-Se incluía un transformador para la tensión de trabajo de los accionamientos de la puerta.

En la puerta, se alojaban los siguientes controles: Una botonera de marcha parada, y una luz piloto. Se observa que el motor funcionaba con un sistema de arranque directo DOL ("Direct On Line").



Figura 5-38: Tablero de protección y comando de la pelletizadora. Imagen Propia.

Tablero 2: Control Resistencias y motor extrusora

En el segundo tablero se ubicaban las protecciones de las resistencias, los controles de temperatura y la protección del motor de la extrusora:

-Un conjunto de fusibles cerámicos tipo NH, con uno por fase, de corrientes $I_n = 100 [A]$, $I_n = 125 [A]$, $I_n = 100 [A]$.

-Contactor Tubío S16 con un relé térmico regulado en 12 A,

-Contactor Tubío S12,

-Contactor Siemens Sirius 10E

-Contactor Tubío S8

-Pirómetro Gaynor

Se concluyó que el contactor con el relé térmico era el encargado de accionar y proteger ante sobrecargas el motor. Los otros tres contactores estaban accionados por el pirómetro

ubicado en la puerta, que era el encargado de controlar la temperatura. Para la protección de las resistencias se tenían 6 fusibles de vidrio en portafusibles tipo tabaqueras.

En la puerta se ubicaban cuatro amperímetros de hierro móvil (uno para cada carga), y un termómetro indicador de temperatura de las resistencias. Se incluía una llave tipo switch para operar el tablero, accionando el contactor Tubío S16.



Figura 5-39: Tablero General de Control y Potencia. Imagen Propia

Tablero 3: Caja de pase

El último gabinete no era un tablero, sino que era la caja de pase donde se ubicaban las borneras de ingreso a la extrusora propiamente dicha. Tenía borneras para el motor y para las resistencias eléctricas.

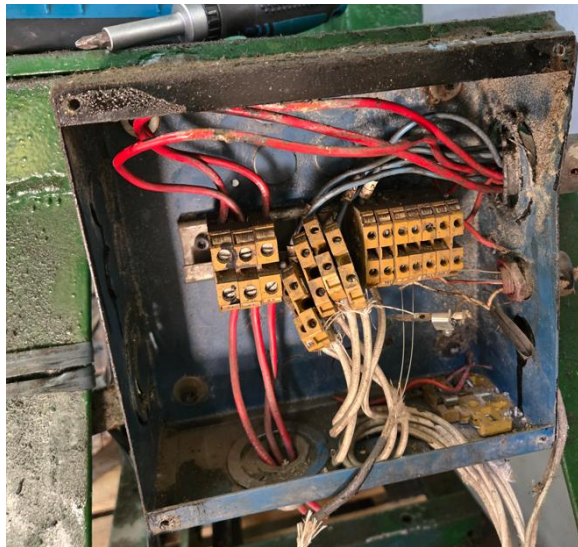


Figura 5-40: Caja de pase de la extrusora. Imagen propia

Se decide por el estado de los elementos presentes realizar de cero la instalación eléctrica.

6. Relevamiento de otras plantas

Durante la elaboración de este trabajo, se visitaron tres instalaciones industriales donde se trabaja con extrusoras.

- Tenaris SIDERCA, Campana - marzo 2025
- Tenaris SIAT, Valentín Alsina - marzo 2025
- Plásticos del Mar, Mar del Plata – julio 2025

También se realizó una visita al INTEMA, donde se conversó con el Ingeniero Federico Morales, quien está realizando su tesis doctoral en dicha institución.

En todas estas visitas se incorporaron conocimientos prácticos sobre el manejo del polímero, operaciones de las extrusoras, y recomendaciones de seguridad. La información obtenida fue fundamental para corroborar que los cálculos teóricos realizados se correspondían con el funcionamiento real del equipo. A su vez, sirvió como referencia para elaborar manuales de operación y mantenimiento, junto con la información obtenida de la bibliografía analizada.



Figura 6-1: Repuestos Extrusora SIAT.

En SIAT se realizó una visita al sector de recubrimientos de tubos con costura. La extrusora utilizada producía films bicapa con un gran volumen de producción.



Figura 6-2: Extrusora recuperadora. Tenaris SIDERCA.

En SIDERCA se producían protectores para los tubos con polímero reciclado. Esta máquina reprocessaba el plástico para producir nuevos pellets a partir del material usado. Mediante una inyectora se producían los nuevos componentes. Se observa que la máquina presenta venteo, y refrigeración mediante sopladores.



Figura 6-3: Extrusora de film. Plásticos del Mar.

Plásticos del Mar produce films de polietileno. En la planta se utilizaban múltiples extrusoras, específicas para ese proceso.



Figura 6-4: Cabezal y cambiador manual de filtros. Plásticos del mar.

Se observa en la imagen superior el cabezal de una extrusora de filamentos. La máquina contaba con un cambiador de filtros manual, muy similar en principio al utilizado en la extrusora de Necochea.

6.1. Relevamiento instalación eléctrica

En visitas posteriores a diferentes plantas se observó que los tableros eléctricos de extrusoras poseen una configuración compacta. Para el comando y protección del motor se utiliza un guardamotor junto con un variador de frecuencia, el cual se comanda desde la puerta con un potenciómetro para regular su velocidad. El mismo tiene incluidas funciones para detenerse por sobrecarga, las cuales se programan en el propio variador.



Figura 6-5: Tablero de Extrusora de Film de PE. Fuente: Plásticos del Mar.

Para el comando de las resistencias se utilizan pirómetros, uno por cada zona de temperatura que se desea controlar. Los pirómetros accionan contactores que energizan las resistencias. Para la protección de estas se utiliza una protección termomagnética tetrapolar general. Los sistemas cuentan con botoneras para accionar el sistema desde la puerta. Se utilizan para las máquinas más grandes amperímetros analógicos para tener un seguimiento visual sencillo de la corriente consumida por cada carga.



Figura 6-6: Control para extrusora recuperadora. Fuente: INTEMA.

En la Figura 6-6 se muestra un tablero para una extrusora de dimensiones similares a las de la máquina a reacondicionar. Se observan los cinco controladores de los pirómetros, uno por cada zona de control de temperatura, la llave magnetotérmica para proteger las resistencias, una llave de dos posiciones para habilitar el funcionamiento de la máquina, un accionamiento de marcha/parada para comandar el motor, un potenciómetro para variar la velocidad del motor, y un LED rojo para indicar el estado del equipo. El variador en sí estaba ubicado en la parte trasera del tablero.

7. Periferia – Equipamiento

En la extrusión no se utiliza exclusivamente una sola máquina. La extrusora es parte de una línea de producción que requiere de varias etapas. La limpieza, separación, y triturado ya se han observado y son partes de la línea actual de producción presente en el Taller Protegido. Para completar la línea de producción, además de la extrusora es necesario el uso de una secadora de escamas y de una pelletizadora. Se presenta un breve resumen de las posibles máquinas a utilizar.

7.1. Secadora

7.1.1. Secado por calentamiento en horno

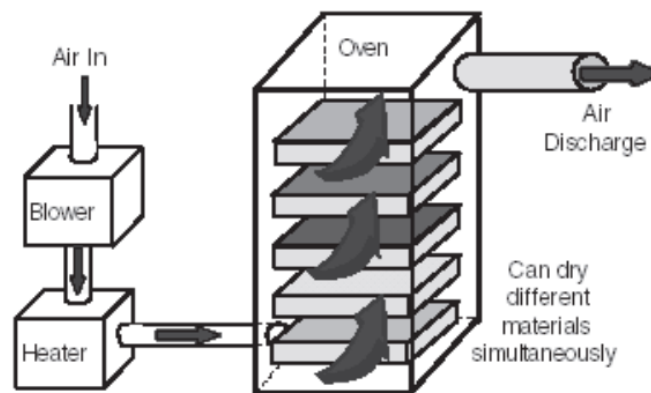


Figura 7-1: Esquema de un horno de secado. [16]

Es el sistema más simple y el que permite un menor caudal de material. Se fuerza mediante un soplador aire a través de resistencias calefactoras. El aire caliente atraviesa el sector donde se aloja el material, calentándolo y sale por un escape. La gran limitante es la humedad relativa del aire: para una cierta temperatura, el aire puede absorber humedad solamente mientras la humedad de los pellets sea mayor a la del aire. Si la humedad ambiente es alta, deben utilizarse camas disecadoras para mejorar la eficiencia. Para mejorar la eficiencia del secado puede reducirse la presión con bombas de vacío, lo que reduce la eficiencia global del sistema. Los pellets deben estar ubicados en una capa muy fina para aprovechar toda la superficie de intercambio posible, lo que limita por una cuestión de espacio el flujo de material que se produce por hora. Para el PET, si no se utilizan camas disecantes o bombas de vacío, el PET puede pasar a absorber humedad del ambiente al ser

excesivamente higroscópico. Debe reducirse de alguna manera el punto de rocío del aire. [16]

7.1.2. Secadoras de aire centrales

Se utilizan en plantas donde se requiere una gran provisión de material seco. El material se seca en grandes cantidades en hornos especiales. Luego se envía mediante cintas transportadoras a las respectivas extrusoras. [16]

7.1.3. Secado en tolva

El secado en tolva permite enviar directamente los pellets o escamas secos en la condición ideal a la entrada de la alimentación de la tolva. Se hace circular aire en un flujo cerrado en la tolva, como se muestra en la Figura 7-2.

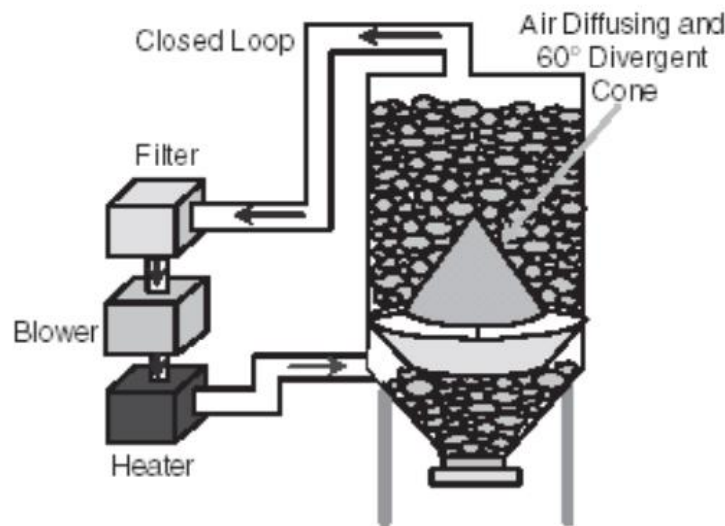


Figura 7-2: Diagrama de un Calentamiento en Tolva. [16]

El material que ingresa a la máquina es compensado por la alimentación de la tolva, que deposita material en la parte superior. La temperatura debe ser lo más uniforme posible en el interior de la tolva. El aire caliente ingresa por debajo y sube hacia arriba. Las paredes deben estar aisladas térmicamente para mejorar la eficiencia del sistema. Se utiliza un cono de 60° para asegurar un “Flujo de pistón” (*Plug Flow*) donde el tiempo de residencia de las partículas es igual para cada una.

Debe dimensionarse la tolva para lograr que el tiempo de residencia de una escama sea suficiente para asegurar baja humedad. Para el PET, se requieren de 4 a 6 horas. Esto representa una gran limitación para la producción de PET a pequeña escala, dado que se requiere una tolva de gran altura que mantenga una temperatura uniforme por muchas horas para lograr caudales aceptables.

Para el PET además debe utilizarse un sistema abierto distinto a la Figura 7-2, dado que en un sistema cerrado el aire del sistema absorberá humedad solamente hasta un punto de equilibrio donde la humedad de los pellets y del aire se iguale. Pueden añadirse filtros con elementos disecantes para mejorar la eficiencia, logrando un aire más seco.

7.1.4. Secado en Horno de Luz Infrarroja

El sistema más tradicional es el horno de secado, que consiste en un soplador de aire, resistencias calefactoras y elementos desecantes. Este sistema implica mantener durante varias horas el material dentro del horno, lo que consume energía y vuelve lenta toda la producción, generando un cuello de botella.

Como alternativa se propone el uso de hornos de luz infrarroja de secado. Consisten en un recinto cerrado donde se aloja el PET en escamas, bajo la luz de una lámpara de emisión IR. En un efecto similar al del agua en el microondas, las moléculas de PET comienzan a vibrar, aumentando la temperatura y eliminando la humedad desde dentro hacia fuera.

Es una tecnología en desarrollo. Un proyecto llevado a cabo en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata en conjunto con el INTEMA (Instituto de Investigaciones en Ciencia Y Tecnología de Materiales) consistió en el desarrollo y construcción de un horno a escala con una lámpara de luz IR [27].



Figura 7-3: Horno de secado de escamas de PET. INTEMA

El estudio determinó que la utilización de luz infrarroja para el secado acelera considerablemente los tiempos, logrando en 40 minutos niveles de humedad previamente alcanzados con cuatro horas de secado. El consumo energético asimismo resultó ser mucho

menor, debido a tener menos componentes que consumen potencia. Si bien el proyecto se trata de un equipo a escala de laboratorio, los resultados son interesantes para contemplar una aplicación a una escala de producción mayor en el futuro.

7.2. Pileta de enfriado

Se trata del baño de agua donde se sumerge el filamento extruido para disminuir su temperatura previo el pelletizado. La pileta original de la extrusora del Taller Protegido se hallaba completa y en buen estado.

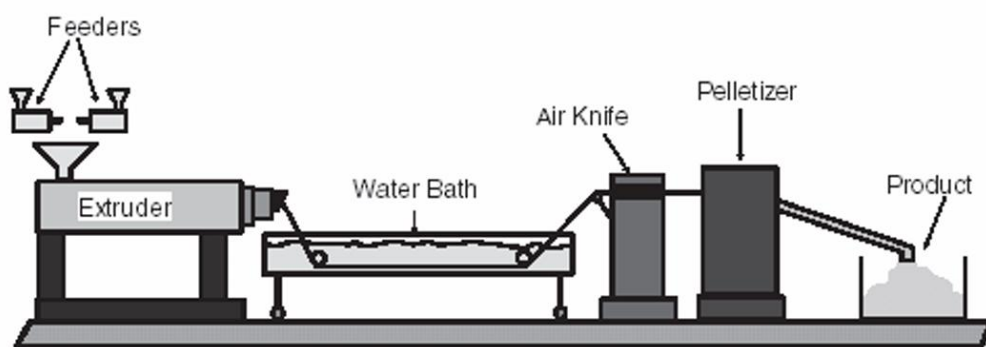


Figura 7-4: Esquema con equipamiento para pelletizado.

7.3. Cortina de aire

Luego de pasar por el baño de agua, se puede colocar una cortina de aire, que permite retirar el agua que pueda quedar en la superficie del filamento. En la práctica no se suele utilizar esta máquina, ya que, aunque se retire el agua rápidamente, el PET al ser altamente higroscópico absorbe agua del ambiente. Por lo tanto, los pellets de PET deben pasar nuevamente por una deshumidificadora previamente a ser utilizados en otro proceso para obtener el producto final.

7.4. Peletizadora

En la peletizadora se lleva a cabo la última etapa del proceso de recuperado. Ingresar el filamento extruido, y se obtienen los pellets de PET, producto final que será comercializado.

Existen distintos tipos de peletizadoras, entre los que se pueden destacar las peletizadoras en caliente y en frío.

La extrusora original estaba diseñada para utilizar una peletizadora en frío. Una peletizadora de corte en frío consiste en un equipo compuesto de rodillos que traccionan e ingresan el filamento al equipo, y cuchillas que cortan el extruido para conseguir los pellets.



Figura 7-5 Pelletizadora original de la extrusora.

8. Análisis de desafíos en el reciclado

La máquina estudiada se desea utilizar para recuperar PET. De acuerdo con lo mostrado en las secciones previas, el tereftalato de polietileno es un polímero particularmente complejo para trabajar debido a sus características químicas y físicas. Se listan algunas consideraciones importantes a la hora de utilizar la máquina.

8.1.1. Uso de material recuperado y virgen

El PET ingresa en forma de escamas, las cuales no pueden ser fácilmente movidas y mezcladas dentro del canal. Debe asegurarse que el material ingrese con la mayor uniformidad posible al tornillo. [19]. Por la estructura cristalina del PET es difícil lograr mezclas con aditivos a comparación de otros polímeros amorfos, dado que la estructura molecular no permite fácilmente que ingresen aditivos al compuesto. Se debe buscar utilizar siempre un mismo material de entrada para asegurar buena calidad de recuperado.

Al utilizar material recuperado es importante monitorear el caudal en la tolva. Si la escama es muy irregular, la densidad aparente de la mezcla baja y esto ocasiona que se formen puentes o cavernas en la tolva. Esto no permite un flujo continuo de material hacia la entrada del extrusor, por lo que genera variaciones en el producto de salida. Se debe vigilar que no haya entrada de aire húmedo dentro de la tolva de secado.

También existe la posibilidad de que haya aire atrapado durante la extrusión y esto produzca burbujas o variaciones importantes en el torque del tornillo que originen variaciones de espesor.

Si se desea utilizar una máquina de tornillo simple, deben tenerse en cuenta diseños específicos para PET (ver sección 4.1), como tornillos de barrera y camisas estriadas.

Un proceso ideal involucra el uso parcial de material recuperado con material virgen, si se desea la mejor calidad de plástico obtenido. En un proceso controlado puede medirse la viscosidad intrínseca con el instrumental adecuado. Si la caída de viscosidad en el proceso es menor a $0,02 \left[\frac{dl}{g} \right]$ puede utilizarse un nivel de recuperable hasta de un 50%, el cual también deberá ser secado con el material virgen previamente mezclado. Para lograr esos bajos niveles de degradación es preciso utilizar máquinas que no generen un aumento excesivo de temperatura en el material. Muchos fabricantes recomiendan utilizar extrusoras de doble tornillo corrotante para este proceso. La inversión necesaria para este tipo de máquinas implica manejar un volumen de producción de pellets grande.

Para el caso estudiado, se decide no analizar directamente la viscosidad, pero sí monitorear de manera constante la calidad del filamento extruido durante el proceso.

8.1.2. Limpieza

La etapa previa al procesado del material implica una limpieza extensa del material. Al ser productos recuperados, incluyen restos de comidas, etiquetas, adhesivos o suciedad. Es vital lograr separar al material útil de los residuos indeseados, ya que los contaminantes que ingresan a la máquina pueden empeorar la calidad y uniformidad del material. Si no son fundidos en el tornillo, pueden tapar los filtros y provocar que la máquina se bloquee, con aumentos de presión que sobrecargan la camisa y los componentes mecánicos, junto con una sobrecarga en el motor.

Si bien los sistemas de lavado por centrifugado con químicos permiten obtener un material casi totalmente limpio, las etiquetas de las botellas son un elemento difícil de remover que con frecuencia termina ingresando en la línea de procesamiento. Suelen estar compuestas de LDPE, PS, PVC, o PETG [6]. La presencia de las mismas tiende a reducir la calidad del PET extruido, dado que empeora la homogeneidad del material o puede provocar obstrucciones en la extrusora, si se degradan.

8.1.3. Humedad y secado

El PET se caracteriza por su alto grado higroscópico, es decir, absorbe humedad del medio ambiente. En particular en este polímero la humedad no sólo se encuentra en la superficie, sino que también se transporta hacia el interior del material por difusión. A la temperatura de fusión la humedad causa la degradación hidrolítica del polímero. Esto reduce la dureza y la resistencia del producto final. [12] Además, el vapor de agua incrementa las chances de corrosión en la máquina, ya que se genera en una zona caliente con fricción en

la camisa y el tornillo. Si esas superficies presentan algún tipo de desgaste por el uso, lo cual tiende a aparecer con el tiempo, los tratamientos superficiales del metal dejan de ser efectivos y el vapor de agua acelera los procesos corrosivos. [15]

La etapa de secado es vital para asegurar una buena calidad del material, dado que las propiedades mecánicas del polímero se ven afectadas por la humedad almacenada:

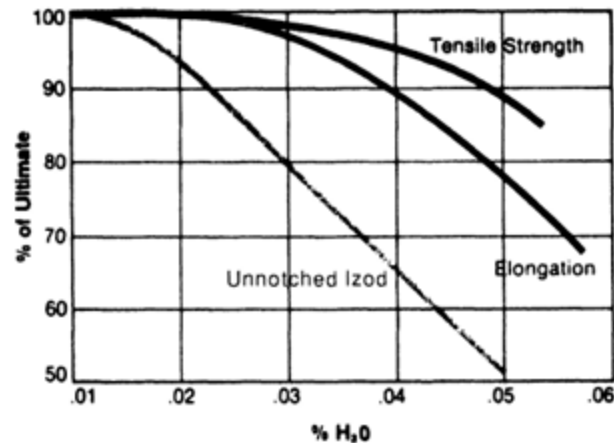


Figura 8-1: Influencia de la humedad en las propiedades mecánicas del PET [2]

Se verifica en la Figura 8-1 como se reduce la resistencia a la tracción del PET en función de los porcentajes de humedad.

El material debe ser almacenado de manera que no esté en contacto con el aire exterior. Dada las características de la planta de procesamiento, es muy importante controlar este punto. La planta está ubicada en una ciudad costera y a la vera del Río Quequén, con lo que la humedad ambiente relativa tiende a ser alta.

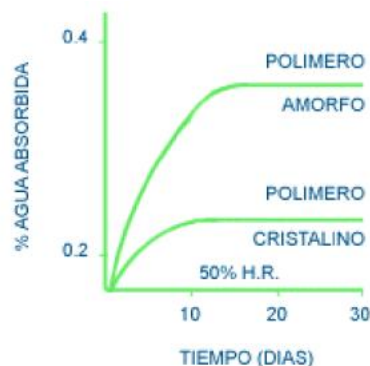


Figura 8-2: Absorción de humedad del PET. [12]

En la Figura 8-2 se observa que el polímero cristalino almacena más de un 0,2% de su propio peso en forma de agua si está en contacto con aire de humedad relativa de 50%.

Es preferible contar con un sistema de secado continuo aguas arriba de la máquina. Se requieren tiempos relativamente largos y altas temperaturas de operación para eliminar la

humedad absorbida [20]. Debe calentarse el material a 150-175°C [16] de 4 a 6 horas y que el aire de secado tenga un punto de rocío de -40°C. Con esas condiciones puede lograrse un material con un contenido de humedad mucho más bajo que el indicado en la Figura 8-2, del orden del 0,004% o 40 ppm. Además de reducir el contenido de humedad, los procesos de secado reducen la humedad superficial y precalientan el material antes de la extrusora, lo que incrementa el caudal de material producido [16]

Resin	Moisture Content, %	Drying Temperature, °F (°C)	Typical Drying Time hours ¹
ABS	<0.02	185 (85)	4
Nylon 6,6	0.2 – 0.08	170 (77)	4 – 6
Nylon 6	0.08 – 0.02	180 (82)	4 – 6
Polymethyl methacrylate	>0.05	175 (79)	2 – 3
Polycarbonate	0.02	250 (121)	4
Polybutylene terephthalate	0.02	275 (135)	2 – 4
Polyethylene terephthalate	0.01	300(150)	2 – 6
Polyphenylene sulfide	0.02	300 (150)	4
Acetal	0.02	210 (99)	2
Styrene acrylonitrile	0.02	190 (88)	3

¹. Depends on moisture content when drying is started. High moisture contents take longer time to dry to processing levels.

Tabla 8-1: Tiempos de secado recomendados para diferentes polímeros. [16]

El secado es fundamental para el PET. Es un proceso que implica un alto consumo energético y largos tiempos de residencia del material en la línea de producción, lo que incrementa el costo final de producto si se desea buena calidad del material.

Una alternativa para evitarlo es el uso de máquinas de doble tornillo corrotante de alta velocidad con venteo (ver sección 0), para lo cual se requiere un elevado costo de inversión inicial, pero da la posibilidad de omitir la etapa de secado.

8.1.4. Formación de volátiles – acetaldehído

La formación de gases volátiles durante la extrusión es un punto importante para tener en cuenta para el diseño de la máquina. Si la generación de gases se produce en volúmenes considerables, debe tenerse en cuenta la posibilidad de diseñar una extrusora con venteo, lo que implica un diseño de camisa y tornillo particular.

El acetaldehído (CH₃CHO) se genera en pequeñas cantidades durante el proceso de fusión de PET; la cantidad de agua presente no influye en la generación de acetaldehído.

Durante la fabricación del polímero el nivel de acetaldehído se controla perfectamente, entregando un producto al mercado con un contenido de 2ppm como máximo.

El acetaldehído es un líquido volátil incoloro (punto de ebullición 20.8°C) y que se distingue por su olor a frutas. Precisamente por su olor característico, el acetaldehído ha sido empleado con mucha frecuencia en la industria alimenticia como un saborizante.

El acetaldehído se genera por la degradación térmica de las moléculas de PET mientras se encuentra en estado de fusión.

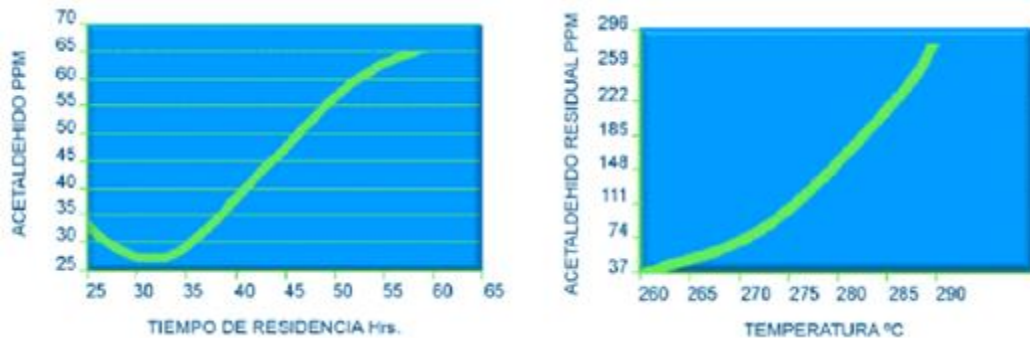


Figura 8-3: Generación de Acetaldehído en función de diferentes variables [12]

Se puede observar el efecto de la velocidad del husillo (RPM) y la contrapresión en la generación de acetaldehído.

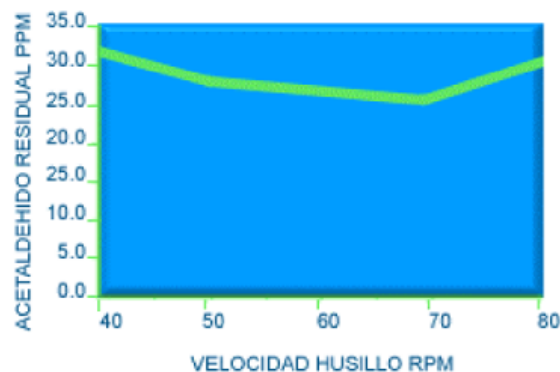


Figura 8-4: Formación de acetaldehído en función de la velocidad del husillo

Para grandes volúmenes de producción se vuelve un problema. Muchos fabricantes recomiendan utilizar sistemas de tornillo simple o doble con venteo. Se observa que para velocidades de extrusión habituales en el procesado de PET (de 70 rpm en adelante) la generación de acetaldehído se vuelve un factor importante.

La manera más directa de solucionar la formación de volátiles es entonces lograr un buen secado del material de entrada.

8.1.5. Atrapamiento del aire

El material ingresa a la extrusora en forma de escamas. Por la morfología irregular que poseen siempre suele ingresar aire entre los resquicios entre cada partícula. En la compresión de las escamas en la primera sección del tornillo normalmente sucede que el aire es expulsado por la vía de menor resistencia. Puede suceder que esto no ocurra, y queden atrapadas burbujas de aire en el fundido. Esto afecta la calidad del extruido.

Al no purgarse, el aire avanza con la masa fundida hasta que sale por el cabezal, lo que provoca burbujas o imperfecciones superficiales en el filamento, también pudiendo provocar cortes del extruido.

Existen soluciones para este problema. La alternativa más utilizada en la industria y la más simple consiste en modificar la temperatura en la zona de alimentación para lograr una compactación más positiva. A menudo, un incremento en la temperatura en la zona de alimentación reduce el atrapamiento, aunque a veces una temperatura más baja también produce una mejora. Incrementando la presión de la cabeza de extrusión se puede modificar el perfil de presión del husillo y lograr una compactación más rápida. Otra posible solución es alimentar el extrusor con menor cantidad de polímero, aunque esto probablemente reduzca la producción. [2]

9. Análisis teórico – Funcionamiento

A partir del relevamiento realizado en la sección 5 se realizó un estudio sobre el proceso de la extrusión. Puesto que no se tenía ningún tipo de dato sobre el funcionamiento original de la máquina, se decidió analizar el flujo del sistema para determinar el volumen de material que podría llegar a manejar.

9.1. Sólidos - Caudal

El material se halla en estado sólido desde que ingresa a la tolva hasta que termina de fundirse en la zona de dosificación. Es interesante estudiar el comportamiento de las partículas en estas secciones.

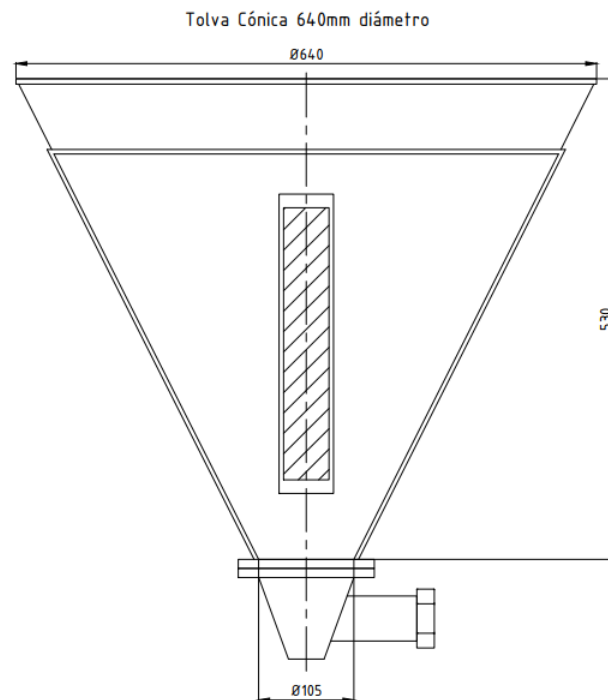


Figura 9-1: Diseño de la tolva existente en la extrusora

El flujo de material en la tolva es complejo y sigue siendo estudiado. El transporte de sólidos en la tolva tiene como fuerza impulsora la gravedad, basándose en las propiedades de las escamas, y en la geometría de la tolva se puede calcular la presión en la tolva, con ello la velocidad y posteriormente la tasa de descarga.

$$P_{base} = \left(\frac{h}{h_0}\right)^a \cdot P_0 + \frac{\rho_b \cdot g \cdot h}{a - 1} \cdot \left[1 - \left(\frac{h}{h_0}\right)^{a-1}\right]$$

Donde:

$$a = \frac{2 \cdot B' \cdot D^*}{\tan(\alpha)}$$

$$B' = \frac{\sin(\delta) \cdot \sin(\alpha + \kappa_0)}{1 - \sin(\delta) \cdot \cos(2\alpha + \kappa_0)}$$

$$\kappa_0 = \beta_w \cdot \arcsen\left(\frac{\sin(\beta_w)}{\sin(\delta)}\right)$$

P_0 =Presión atmosférica ([Pa])

α = Parámetro dependiente de la fricción y la geometría de la tolva

δ =Ángulo de fricción entre partículas del material

β_w =Ángulo de fricción entre partículas del material y la pared de la tolva.

Durante la descarga del material de la tolva se pueden dar distintas situaciones:

- Flujo en masa, cuando no hay obstrucciones y todo el material presente en la tolva desciende continuamente hacia la zona de alimentación del tornillo
- Generación de arcos, caso en el cual se obstruye el flujo de material por completo
- Flujo de embudo, cuando solamente una parte del material presente en el centro de la tolva fluye, mientras que en las paredes se mantiene quieto.

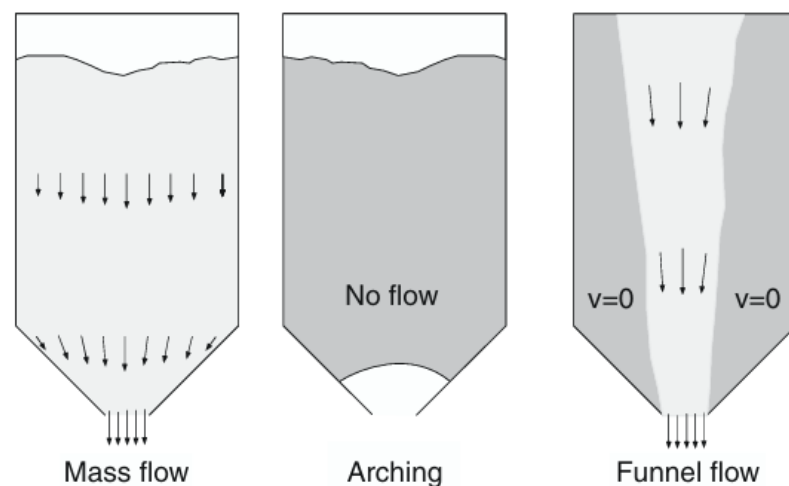


Figura 9-2: Tipos de flujo que pueden ocurrir en una tolva

De los problemas de flujo que pueden existir, el más común es la formación de arcos. Una solución recurrente consiste en instalar un elemento vibrador que permita la eliminación de cualquier bóveda que se forme.

Al analizar la bibliografía, se menciona que las fórmulas teóricas existentes para el cálculo del flujo masico de material presentan limitaciones en su aplicación y en su capacidad de predecir con exactitud el caudal. Además, las características del material que ingresa a la tolva resultan determinantes para estos cálculos y, en el caso particular de las escamas de

PET, no se dispone de parámetros que las describan adecuadamente. Por este motivo, se decidió no continuar con el cálculo de caudal de sólido en la tolva.

Como se mencionó previamente, las escamas de PET deben pasar por un proceso de secado previo a ingresar a la extrusora. En la industria para la escala y capacidad del equipo que se está diseñando se suele utilizar un equipo de deshumidificación 3 en 1. El mismo no solo asegura que se llegue a los valores de humedad requeridos para seguir con el proceso, sino que también proporciona un suministro constante de material a la extrusora.

Una vez en el tornillo, el transporte de sólidos ocurre en la zona de alimentación. Allí, el transporte pasa a darse por fricción. Sobre las partículas sólidas de polímero aparecen dos esfuerzos de fricción, uno sobre la superficie en contacto con la camisa y otro en contacto con el tornillo. El movimiento hacia delante del sólido se produce por la fricción de las partículas **con la camisa** y no con el tornillo. Al desenrollar el canal, puede verificarse que la camisa se mueve con velocidad relativa sobre el tornillo de manera que arrastra las partículas canal abajo.

9.2. Fusión del material

En todos los procesos de extrusión se debe cumplir con la primera ley de la termodinámica, es decir, se debe conservar la energía. Durante el proceso de extrusión la energía requerida para fundir y comprimir el PET proviene solamente de dos fuentes, el motor y las resistencias calefactoras.

La fusión se produce principalmente gracias al calentamiento generado por el cizallamiento del polímero. Esto sucede por varios factores. En primer lugar, el polímero es un muy mal conductor del calor. A su vez, hay poca diferencia de temperatura entre el polímero y el barril, por lo que la transferencia de calor por conducción se verá afectada. Es decir que se requiere un tiempo elevado para transferir la energía requerida y llevar la totalidad del polímero a la temperatura de fusión. El polímero que ingresa tiene poco tiempo para absorber o emitir calor. [13]

En la práctica la relación entre calor proveniente del cizallamiento y el calor proveniente de las resistencias está directamente relacionada con la profundidad de los filetes del tornillo. Cuando se tiene mayor filete, el efecto del calor proveniente de las resistencias será menor ya que la capa de polímero que debe atravesar el calor es mayor. Entonces, en tornillos más grandes la mayor parte de la energía para la fusión proviene del motor a través de la disipación viscosa o cizallamiento del polímero [15] [19].

En tornillos de diámetro menor a $1,5[in]$ donde la profundidad del canal es reducida puede lograrse un buen fundido con el aporte de calor de las resistencias. Esto puede permitir reducir

la potencia del motor. Sin embargo, es difícil tener calidad y uniformidad del material, ya que no tener fundido por fricción no asegura que el calor de la superficie del material pueda fundirlo en su totalidad [19].

El desarrollo del fundido puede verse a continuación:

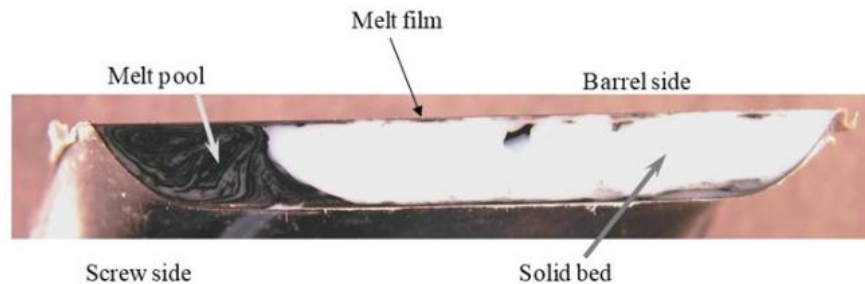


Figura 9-3: Vista en corte del detalle del canal de una extrusora. [19]

La tasa de corte es mayor en la pared de la camisa y, en consecuencia, ahí es donde se inicia la fusión. Se observa en la Figura 9-3 la capa de “Melt Film” en la parte superior del canal. Por el movimiento del tornillo, el fundido es arrastrado hacia el filete “trasero” donde se aloja el fundido. En la figura se denomina “Melt Pool”. Luego, la película crece a lo largo de la longitud del tornillo y finalmente llena el canal.

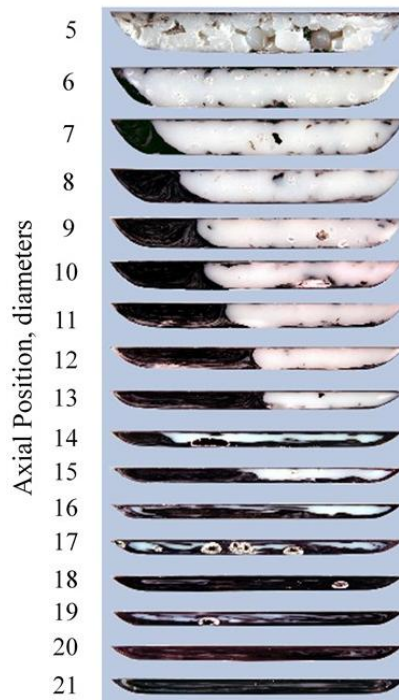


Figura 9-4: Fusión del material en una extrusora. [19]

En la Figura 9-4 se observa el fundido de ABS con resina negra coloreada. A medida que el polímero avanza en el tornillo aumenta la proporción de fundido versus sólido. En los últimos dos filetes el material está totalmente fundido.

Se observa que la fusión depende de la superficie de fricción entre la camisa y el material. A mayor área, mayor tasa de corte y mayor energía del polímero disipada en calor. Se estima que el 80% de la fusión se da en la pared de la camisa. [19]

9.3. Mezclado

Se analiza un corte del canal del tornillo en la zona de fundido. Durante la operación los sólidos particulados son desplazados hacia el flanco posterior del filete por las partículas fundidas que provienen de aguas arriba, formando así un “caudal de contrapresión”. [2] El caudal de pérdidas se da más pronunciadamente en tornillos gastados donde la luz entre la camisa y la parte superior del filete es mayor.

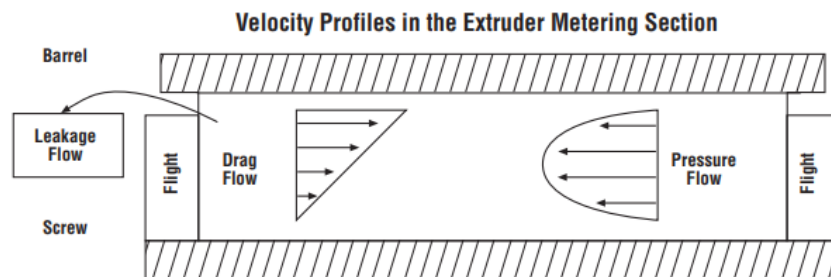


Figura 9-5: Caudales en el canal del tornillo. [10]

El movimiento del tornillo genera que el fundido ubicado sobre la camisa sea empujado hacia abajo por el flanco de avance del filete siguiente. Luego, dicho filete empuja el fundido hacia delante, lo que genera un flujo rotante en la “pileta fundida”. Esto conforma lo que se denomina “caudal de arrastre”.

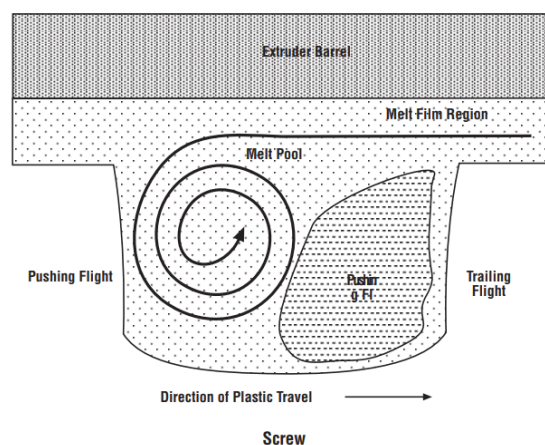


Figura 9-6: Comportamiento del fundido y el sólido en el canal del tornillo. [10]

A medida que el material avanza la cantidad de fundido se agranda, debido a la generación de calor y a que idealmente las partículas de fundido arrastran y rodean a las sólidas, acelerando la transferencia de calor.

Este proceso genera un fundido teóricamente uniforme, ya que se observa que ocurre un flujo en varias direcciones además de la axial (por el avance del material debido al tornillo).

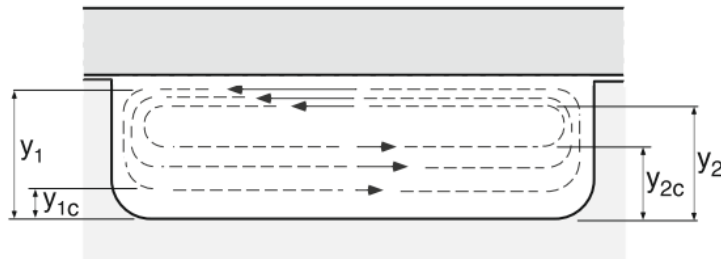


Figura 9-7: Perfil de velocidades en una sección del canal. [15]

En la práctica no es así: el material a 2/3 de altura del canal puede no poseer componentes de velocidad en el sentido del ancho del canal. Sin embargo, el fluido ubicado a 1/3 del canal posee mucha velocidad en ese sentido y muy poca en el sentido de “aguas abajo” del canal. Esto modifica los tiempos de residencia y por lo tanto el momento en el que se funden las partículas. **El resultado es una mezcla heterogénea** [10].

Resulta importante entonces estudiar los procesos de mezclado en el material. Puesto que se trata de fluidos de alta viscosidad, se puede afirmar que el fluido es laminar dentro del canal [15]. El mezclado en este caso se da por los diferentes componentes de velocidad relativa que tienen las partículas. En la extrusión se da a través de dos procesos fundamentales:

Mezclado dispersivo: En el canal conviven sólidos, líquidos, y aglomerados o aditivos. Para lograr una buena mezcla se busca que cualquier agrupación de partículas se separe. Este proceso se denomina mezclado dispersivo [10].

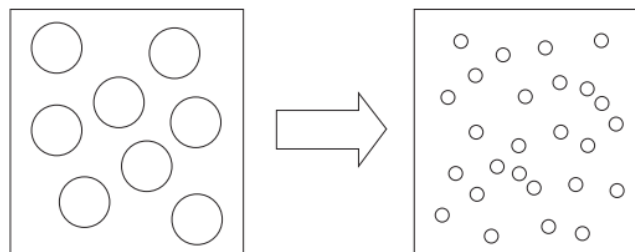


Figura 9-8: Mezclado dispersivo.

Mezclado distributivo: Una vez que las partículas sólidas se han separado en componentes más pequeños, se requiere que la distribución espacial de dichas partículas sea uniforme.

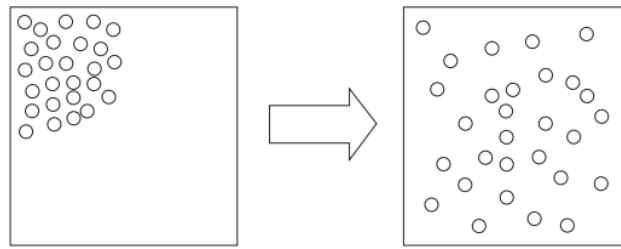


Figura 9-9: Mezclado distributivo.

Es importante remarcar que ambos procesos se dan a la vez durante el fundido y la extrusión. El mezclado dispersivo implica distribuir las partículas, pero el caso recíproco no siempre se cumple. Pueden distribuirse las partículas sin antes separarlas, si el diseño del tornillo no es eficiente. [15] Los diseños más importantes para mejorar el mezclado se han explicado en la sección 4.1.

9.4. Transporte del fundido

Teniendo en consideración que la extrusora analizada podría haberse utilizado con otra materia prima, y que la potencia del motor podría no ser adecuada para el polímero que se quiere extruir, se realizan cálculos para estimar el caudal másico que puede manejar la máquina y la potencia necesaria para lograrlo. Se modeliza al sistema para obtener expresiones simples que permitan cuantificar el sistema.

9.4.1. Caudal

El cálculo del flujo óptimo de material es de vital importancia para la estimación de la potencia de la máquina. Para realizarlo se parte de conceptos fundamentales y se desarrolla un modelo que permita aproximar un modelo teórico a un tornillo real.

Se partirá de un flujo ideal de material, en el cual dos placas paralelas separadas por una distancia H se mueven con velocidad relativa V_0 entre sí, con un fluido alojado entre ellas. Esto representa al polímero viajando dentro del canal formado entre los filetes del tornillo y la camisa.

Luego se dimensiona la velocidad y la presión de acuerdo con los parámetros geométricos del tornillo.

Se coloca una restricción al final, lo que modifica el caudal y convierte al sistema en una bomba que aumenta la presión hasta llegar a la restricción. Esto modela a la restricción que impone el cabezal.

Por último, se introducen factores de corrección por tratarse de un canal de un ancho **no infinito** y de altura **variable** para reflejar los cambios en la presión y el caudal que se dan en un tornillo de una extrusora. [11]

Este modelo no tiene en cuenta las siguientes consideraciones:

- Considera a todo el caudal del polímero a lo largo del tornillo como un fundido, cuando en realidad el polímero se funde a lo largo del mismo y presenta una combinación de sólidos y fundidos a lo largo del desarrollo del canal.
- Se desprecia el flujo que se pierde en el huelgo entre los filetes del tornillo y la camisa, debido a lo complejo de su análisis y que depende del desgaste de la camisa.
- Utiliza para la aproximación una viscosidad fija, cuando en realidad la viscosidad cambia punto a punto en el seno del material

Para analizar el caudal, se comienza por “desenrollar” el canal helicoidal formado entre la camisa y el tornillo y convertirlo en un canal recto de ancho W y altura H , con un largo total Z .

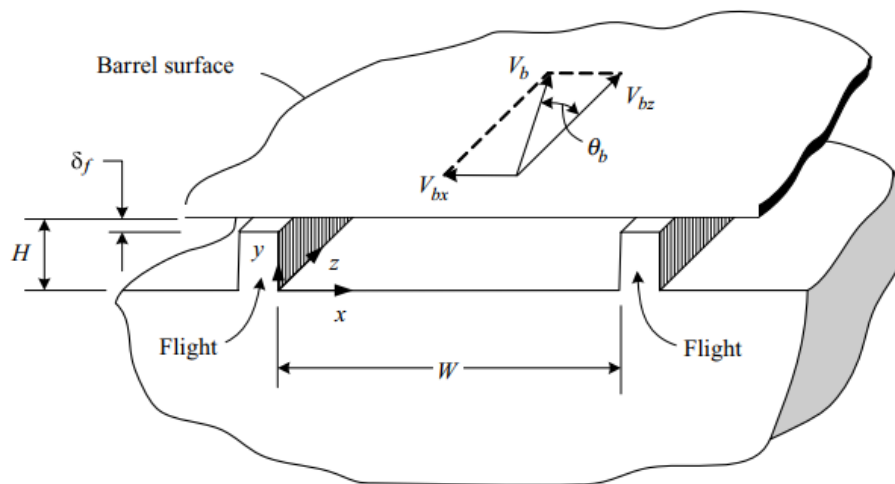


Figura 9-10: Análisis del canal del tornillo. [11]

La superficie interna de la camisa se vuelve una placa plana moviéndose a una velocidad $V_b = \pi N D_b$ con un ángulo θ_b respecto de la dirección Z del canal.

Dicha velocidad puede descomponerse en dos componentes:

$$V_{bz} = \pi N D_b \cos(\theta_b) \quad [Ec. 4.1]$$

$$V_{bx} = \pi N D_b \sin(\theta_b) \quad [Ec. 4.2]$$

Un componente lleva el fundido hacia la salida mientras que otro genera un mezclado de un lado a otro del canal. Se modela al sistema como un flujo de Couette:

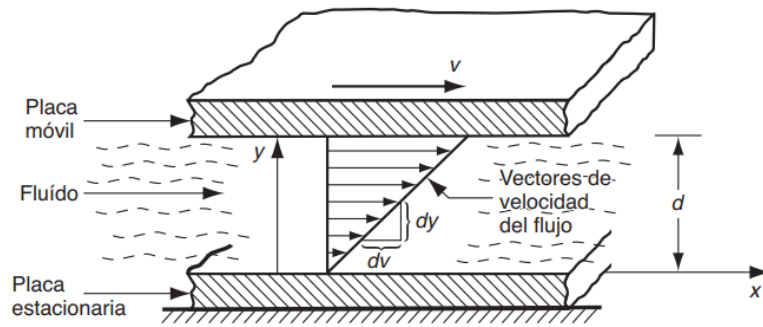


Figura 9-11: Movimiento de un fluido entre placas paralelas. [1]

En esa situación se supone que las partículas de fluido pegadas a la placa móvil copian su velocidad $v = V_{bz}$ y las partículas ubicadas sobre la placa inmóvil tienen $v = 0$.

Para determinar el comportamiento del material se aplican las ecuaciones de Navier-Stokes, para el caso de un fluido incompresible, isotérmico, con flujo desarrollado. Pese a ser una aproximación, la suposición resulta adecuada para dimensionar el caudal del sistema.

En este caso resultan:

$$\rho \left(v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \eta \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} \right) \quad [Ec. 4.3]$$

$$\rho \left(v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \eta \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} \right) \quad [Ec. 4.4]$$

$$\rho \left(v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \eta \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} \right) \quad [Ec. 4.5]$$

P es la presión del fluido y ρ es la densidad del fluido. Es de interés determinar el perfil de velocidades en la dirección del canal Z . Aplicando las suposiciones vistas, se extrae:

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \eta \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} \right) \quad [Ec. 4.6]$$

Resolviendo la ecuación diferencial se obtiene el perfil de velocidades v_z completo. No se lo desarrolla aquí dado que el detalle matemático queda fuera del alcance del proyecto. Dicho perfil se integra a lo largo del ancho y alto del canal y se obtiene el caudal volumétrico:

$$Q = \int_0^W \int_0^H v_z \, dx \, dy$$

$$Q = \frac{V_{bz}WH}{2} F_d + \frac{WH^3}{12\eta} \left(-\frac{\partial P}{\partial z} \right) F_p \quad [Ec. 4.7]$$

Esta ecuación es muy útil para caracterizar el funcionamiento de la extrusora. El primer término representa al caudal “de arrastre” Q_D que produce el movimiento del tornillo respecto de la camisa. Puede ser reescrito como:

$$Q_D = 0,5V_{bz}WHF_d = (0,5\pi ND_b \cos(\theta_b) WH)F_d$$

Se toma a la velocidad promedio del fluido como $V_{bz}/2$ dado que pasa de copiar a la camisa ($v_z = 0$) a tener la velocidad relativa del tornillo respecto de la camisa ($v_z = V_{bz}$) [1], multiplicada por el área transversal del canal.

De la resolución de la ecuación diferencial surgen términos que se resumen en un factor de forma $F_d < 1$, que representa la influencia de los filetes del tornillo al caudal ideal entre placas paralelas.

El segundo término de la ecuación es el caudal de “contrapresión” Q_P que representa a la disminución del caudal “ideal” de placas paralelas por la restricción que impone el cabezal. Depende del gradiente de presión a lo largo del canal y de la viscosidad del fluido.

El gradiente de presión depende de la forma geométrica del tornillo. Para simplificar el análisis se puede considerar lineal sin apartarse excesivamente de la realidad. [1]

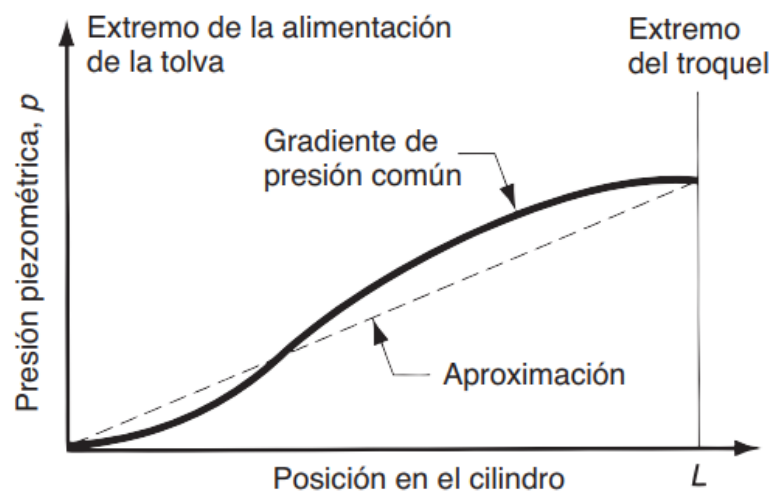


Figura 9-12: Gradiente de presión a lo largo de una extrusora. [1]

El caudal por contrapresión entonces se puede reescribir como:

$$Q_P = -\frac{WH^3}{12\eta} \frac{p}{L} F_p \frac{1}{\sin(\theta_b)}$$

Nuevamente surge el factor de forma F_p que representa la influencia de los filetes al desarrollo del flujo. Debe remarcarse que cuanto menor es la relación profundidad/ancho, es decir, el canal es más ancho que largo, el efecto se reduce. Se observa que se mantiene la presión p como parámetro.

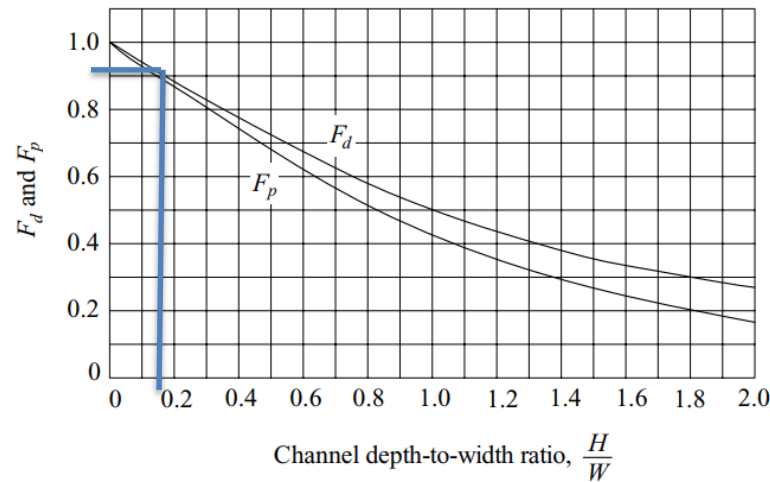


Figura 9-13: Factores de forma para los caudales. [11]

La última consideración al caudal viene por tomar la altura variable del canal a lo largo del tornillo. Se recuerda que en la zona de compresión y la zona de dosificación la profundidad del canal se reduce considerablemente. El efecto de este cambio en el caudal puede representarse con los siguientes factores, los cuales se aplican al caudal de arrastre y para el caudal de contrapresión respectivamente:

$$F_{\xi D} = \frac{2}{1 + \xi_0}$$

$$F_{\xi P} = \frac{2}{\xi_0(1 + \xi_0)}$$

$\xi_0 = H_0/H_1$ es la relación entre la profundidad del canal a la entrada con la profundidad del canal a la salida.

Con todos estos factores, puede plantearse una ecuación para el caudal como función de la presión:

$$Q(p) = 0,5\pi ND_b \cos(\theta_b) WHF_d\left(\frac{2}{1 + \xi_0}\right) - \frac{WH^3}{12\eta} \frac{p}{\frac{L}{\sin(\theta)}} F_p\left(\frac{2}{\xi_0(1 + \xi_0)}\right) \quad [Ec. 4.9]$$

Esto se puede representar como una recta con pendiente $-\frac{WH^3}{12\eta \frac{L}{\sin(\theta)}} F_p\left(\frac{2}{\xi_0(1 + \xi_0)}\right)$ en un gráfico caudal versus presión, denominada **característica del tornillo**. El caudal máximo es el caudal de arrastre $Q_{max} = Q_D$, y representa la intersección con el eje de ordenadas.

La intersección con el eje de abscisas es la presión máxima, que ocurre cuando hay una restricción de flujo, $Q_D = Q_P$.

$$p_{max} = \frac{6\pi\eta D_b L \cotg(\theta_b) F_D F_{\xi D}}{H^2 F_P F_{\xi P}} \quad [Ec. 4.10]$$

El punto de operación real de la extrusora se ubica en la intersección de dicha recta con la característica del cabezal, que puede ser descrita por la siguiente ecuación:

$$Q_{die} = \frac{K_d}{\eta} \Delta P_{die}$$

K_d es la constante del cabezal, que depende solamente de la geometría:

$$K_{die} = \frac{\pi R^4}{8L_0}$$

R_0 es el radio del orificio de la matriz del cabezal, y L_0 es el largo de dicho orificio.

Finalmente, igualando $Q(p) = Q_{die}$ se obtiene el punto de operación óptimo de nuestra extrusora.

$$Q_x = \frac{0,5\pi N D_b \cos(\theta_b) W H F_d \left(\frac{2}{1+\xi_0}\right)}{1 + \frac{W H^3 \sin(\theta_b)}{12 L K} F_p \left(\frac{2}{\xi_0(1+\xi_0)}\right)} [m^3/s] \quad [Ec. 4.11]$$

$$p_x = \frac{0,5\eta\pi N D_b \cos(\theta_b) W H F_d \left(\frac{2}{1+\xi_0}\right)}{K + \frac{W H^3 \sin(\theta_b)}{12 L} F_p \left(\frac{2}{\xi_0(1+\xi_0)}\right)} [Pa] \quad [Ec. 4.12]$$

9.4.2. Punto de operación máximo – Tornillo original

Al darle valores a las ecuaciones vistas, resulta:

$$N = 114 [rpm] = 1,902 [revs/s]$$

$$D_b = 39 [mm] = 0,039 [m]$$

$$\theta_b = 20 [^\circ]$$

$$W = 41,9 [mm] = 0,0419 [m]$$

$$H_0 = 5,75 [mm] = 0,00575 [m]$$

$$L = 0,75 [m]$$

$$H_1 = 1,5 [mm] = 0,0015 [m]$$

Se calcula la característica del cabezal, estimándola a partir del tamaño de los orificios de salida.

$$K = 2,642 \times 10^{-10}$$

Sabiendo que el cabezal tiene 10 orificios el caudal se multiplicaría por 10. Resulta:

$$K = 2,642 \times 10^{-9}$$

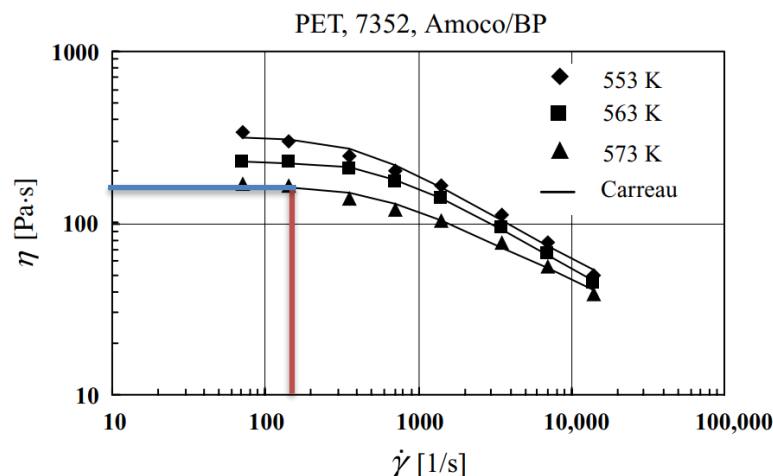
Con respecto a la viscosidad, se ha encontrado en la bibliografía que para su determinación puede tomarse un valor medio de la tasa de corte del fluido en el seno del fluido. [16] [11]

$$\dot{\gamma} = \frac{\pi DN}{H}$$

Depende de la altura del canal, con lo que se decide tomar el valor de la zona de dosificación, ya que se espera que sea donde la tasa de corte y la presión sea mayor, y el material presente la menor cantidad de material sólido remanente. Resulta:

$$\dot{\gamma}_{H1} = 155,35 [1/s]$$

Volvemos a la Figura 3-8 para determinar la viscosidad a una temperatura de $T = 300 [^{\circ}C]$.



Se extrae que la viscosidad es:

$$\eta = 150 [Pa \cdot s]$$

Inicialmente se grafica el funcionamiento de un tornillo "ideal" para representar las curvas características que lo gobiernan:

$$Q_d = 0,5V_{bz}WHF_d = 0,5\pi ND_b \cos(\theta_b) WH$$

$$Q_{d \text{ ideal}} = 0.5 \cdot \pi \cdot 0,039 [m] \cdot 1,9 \left[\frac{1}{s} \right] \cdot \cos(20^{\circ}) \cdot 0,0419[m] \cdot 0,00575[m]$$

$$Q_{d \text{ ideal}} = Q_{\max \text{ ideal}} = 2,63 \times 10^{-5} [m^3/s]$$

El caudal de contrapresión se calcula como:

$$Q_b = \frac{WH^3 \sin(\theta_b)}{12\eta L} \cdot P$$

$$Q_{b \text{ ideal}} = \frac{0,0352[m] \cdot 0,00575[m]^3 \cdot \sin(20^\circ)}{12 \cdot 150 [Pa \cdot s] \cdot 0,75[m]} \cdot P = 2,018 \times 10^{-12} \cdot P \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

El caudal por el cabezal se puede escribir como:

$$Q_{die \text{ ideal}} = n_{orificios} \cdot \frac{\pi R_d^4}{8\eta L_0} \cdot P_{die} = 1,76 \times 10^{-11} \cdot P \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

El punto de operación queda dado por

$$p_x = \frac{0,5\eta\pi ND_b \cos(\theta_b) WH}{K + \frac{WH^3 \sin(\theta_b)}{12L}}$$

$$P_{x \text{ ideal}} = 1340897,484 [Pa] = 1,34 [MPa] = 194,48 [PSI]$$

$$Q_{x \text{ ideal}} = 2,37 \times 10^{-5} \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

La presión máxima resulta:

$$P_{max \text{ ideal}} = 12,6 [MPa] = 1749,5 [PSI]$$

Con la densidad, se puede calcular el caudal másico. Según lo visto en la sección 3.1.1 la densidad del PET es:

$$\rho_{PET (0 \text{ PSI})} = 1,211 \left[\frac{g}{cm^3} \right]$$

$$\rho_{PET (1000 \text{ PSI})} = 1,298 \left[\frac{g}{cm^3} \right]$$

Se sabe que la presión de operación es 194,48 [PSI]. Se decide tomar un promedio entre los dos valores vistos:

$$\rho_{PET (x)} = \frac{\rho_{PET (0 \text{ PSI})} + \rho_{PET (1000 \text{ PSI})}}{2} = 1,245 \left[\frac{g}{cm^3} \right]$$

$$G_{x \text{ ideal}} = 106,92 [Kg/h]$$

Con todos los datos, se construye la característica de la extrusora: En naranja la característica del cabezal, en azul la del tornillo.

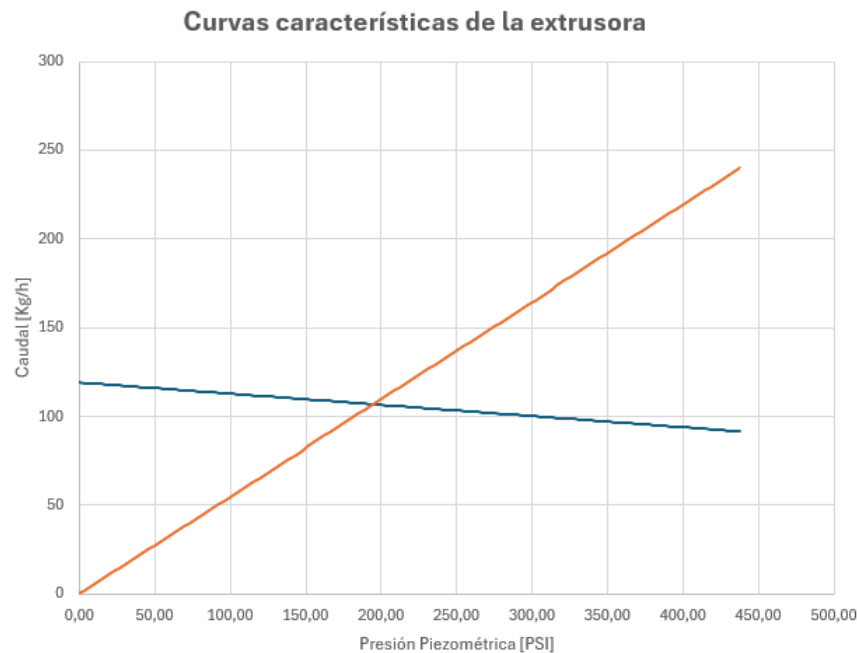


Figura 9-14: Curva característica de la extrusora.

Para conocer mejor el funcionamiento de la máquina, se decide incluir los factores de corrección F_D , F_P , $F_{D\xi}$ y $F_{E\xi}$

Se determinan los factores de forma que introducen los filetes del tornillo, con la Figura 9-13.

$$\frac{H}{W} = 0,137$$

$$F_P = 0,9$$

$$F_D = 0,9$$

Se determinan los factores de corrección por tener un canal de sección no constante.

$$\xi_0 = H_0/H_1 = 3,833 \text{ (Relación de compresión)}$$

$$F_{D\xi} = 0,4137$$

$$F_{P\xi} = 0,107$$

Resulta:

$$P_{x \text{ ideal}} = 1340897,484 \text{ [Pa]} = 1,34 \text{ [MPa]}$$

$$P_{x \text{ ideal}} = 194,48 \text{ [PSI]}$$

$$Q_{x \text{ ideal}} = 2,37 \times 10^{-5} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$$

$$Q_{\max} = Q_{d \text{ ideal}} \cdot F_d \cdot F_{D\xi} = 9,82498 \times 10^6 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$$

$$G_x = Q_x \cdot \rho_{PET(x)} = 43,88 [Kg/h]$$

El caudal másico máximo resulta:

$$G_{max} = 44,37 \left[\frac{Kg}{h} \right]$$

La presión máxima resulta:

$$P_{max} = 26,34 [MPa] = 3821 [PSI]$$

Se observa que la presión máxima que puede desarrollar la extrusora pasó de 1749 [PSI] a 8321 [PSI], es decir, casi se cuadruplicó al tener en cuenta la relación de compresión del tornillo.

El caudal máximo se reduce a un 41% de su valor original y el caudal de contrapresión se reduce al 10,7% del valor inicial. Esto implica una curva característica del tornillo mucho más “plana” (*curva azul*) donde el valor del caudal decae poco respecto del caudal máximo, en función de la presión.

Se grafica el comportamiento de la máquina:

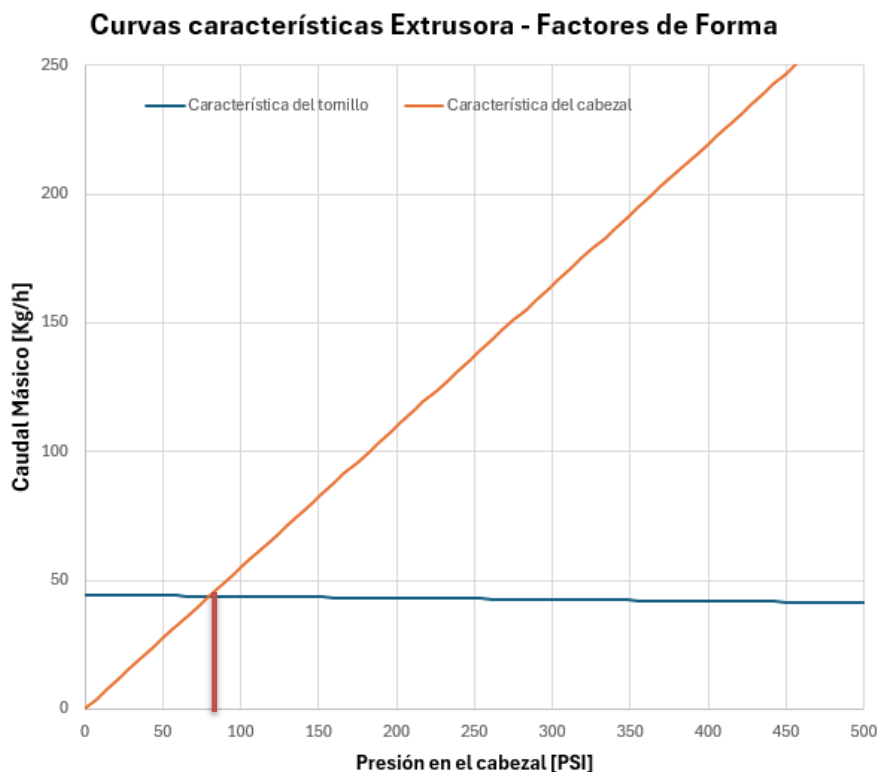


Figura 9-15: Característica del Tornillo

Se observa que la **presión de operación** lograda en el **cabezal** es mucho menor a la presión de operación con un canal constante. Esto puede suceder debido a que la caída de presión del sistema además de darse en el cabezal se da **luego de la sección de compresión** (en la sección de dosificación) del tornillo, que funciona como una reducción de

área al igual que el cabezal. Es decir que el pico de presión se da al final de la zona de compresión [15]. Por lo tanto, no es menor la presión del sistema, sino que el punto de operación de la máquina no caracteriza por sí solo al sistema.

Otra conclusión muy importante es que la presión es altamente sensible a los cambios de caudal: un cambio en el flujo másico de entrada repercute en cambios muy grandes de presión. Es importante lograr un flujo másico constante que no sobrepase al caudal máximo del sistema.

9.5. Potencia del sistema

Al estudiar el consumo y las pérdidas de energía de una extrusora mono husillo, es necesario considerar no solo la energía utilizada por el equipamiento sino también la requerida para el movimiento, compresión y fusión del polímero.

Todas las extrusoras se pueden analizar termodinámicamente como sistemas abiertos con un proceso interno complejo. En el proceso interno se dan la transición de fase de polímero sólido a fundido, su compresión y mezclado.

El ingreso de energía al material se da principalmente mediante el trabajo aportado por el motor y el calor cedido por las resistencias calefactoras. La mayor parte de la potencia mecánica del motor, que se utiliza para rotar el tornillo, es convertida en calor por la fricción surgida por los esfuerzos viscosos de corte del material. Una fracción menor de la potencia se utiliza para mover el material, desarrollar la presión en la camisa y hacerlo pasar por el cabezal. [28]

Mientras que las pérdidas de potencia son varias:

- Pérdidas en el motor,
- Pérdidas en la caja reductora,
- Pérdidas en la transmisión,
- Pérdidas de calor en la camisa y el troquel,
- Potencia requerida para comprimir las escamas de PET hasta quitar el aire y espacio entre ellas,
- Pérdidas de calor de la extrusora

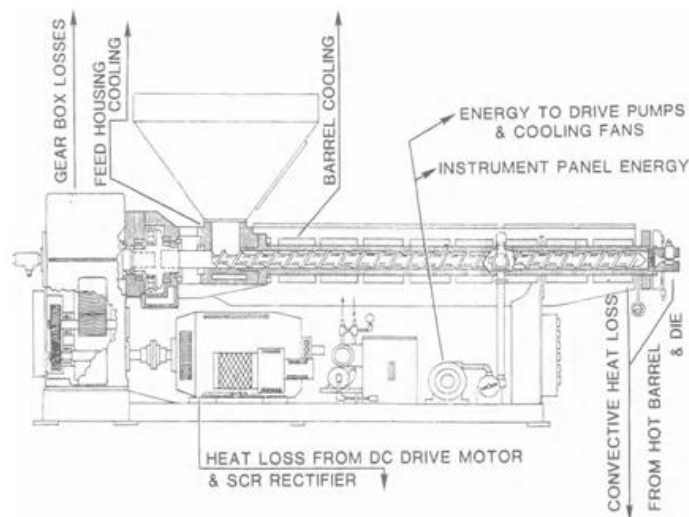


Figura 9-16: Ejemplos de pérdida de energía en una extrusora refrigerada [2]

Como se mencionó previamente esta extrusora no contará con enfriamiento de la zona de alimentación ni de la camisa. Por lo tanto, no se pierde calor mediante el enfriamiento y las pérdidas de calor en camisa y troquel vienen dadas solamente por la convección natural.

Tipo de máquina	Husillo			Producción kg/h	Potencia, kw	
	Diámetro	L:D	Velocidad de giro r.p.m.		de la calefacción	del motor
Inglaterra						
Bone Brothers						
$\frac{3}{4}$	20	20:1	70	2,7	2	0,7
$1\frac{1}{2}$	40	20:1	125	18	7,5	4,5—12
$2\frac{1}{2}$	60	20:1	125	68	24	15—22
$3\frac{1}{2}$	90	20:1	125	160	40	25—55
$4\frac{1}{2}$	115	20:1	125	270	54	55—125
6	150	20:1	125	450	84	80—220
8	200	20:1	125	900	—	120—360

Tabla 9-1: Potencias eléctricas aproximadas. [25]

Como referencia, se [25] indica que para extrusoras de $1\frac{1}{2}$ " (40 mm) con una producción de 18 Kg/h es necesario un motor eléctrico de entre 4,5 y 12 kW, junto con resistencias calefactoras de 7,5 kW [25].

Para determinar la potencia del motor puede analizarse el balance energético del sistema. Aplicando la primera ley de la termodinámica puede expresarse:

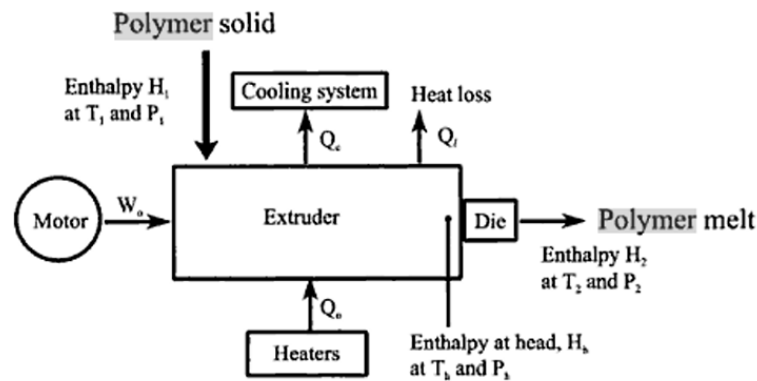


Figura 9-17: Balance energético [28]

$$\Delta H + \Delta E_k + \Delta E_p = \Delta Q - \Delta W$$

$\Delta H = H_2 - H_1$ Cambio de entalpía del sistema

ΔE_k Cambio de energía cinética del sistema

ΔE_p Cambio de energía potencial del sistema

$\Delta Q = (Q_{resistencias} - Q_{disipado})G$ Calor neto ingresado al sistema

$\Delta W = -Q_{motor}/G$ Trabajo neto realizado por el sistema. Se debe notar el signo negativo utilizado, para marcar que el trabajo del motor se refleja en un aumento de energía interna, es decir, es absorbido como calor.

Se puede despreciar la variación de energía potencial y cinética para simplificar el análisis. El balance de energía resulta:

$$G \cdot \Delta H = Q_{resistencias} + Q_{motor}$$

Tomando como referencia el flujo másico calculado en la sección 9.4.2 se realiza un cálculo aproximado de la potencia requerida para llevar el PET a la temperatura de fusión a 300 [°C].

Para realizar los cálculos, se deben recordar algunas propiedades del PET:

- $C_{p1} = \text{Calor específico del sólido} = 1,3 \left[\frac{J}{g \cdot K} \right]$
- $C_{p2} = \text{Calor específico del fundido} = 2,3 \left[\frac{J}{g \cdot K} \right]$
- $L = \text{Calor latente específico} = 42 \left[\frac{J}{g} \right]$
- $\text{Punto de fusión} = 255 [^{\circ}C] = 528 [K]$

En partículas para el proceso que se analiza, se tienen las siguientes características:

- $T_i = \text{Temperatura de ingreso escamas PET} = 25 [^{\circ}C] = 298 [K]$

- $T_f = \text{Temperatura del extruido} = 300 [^{\circ}\text{C}] = 573 [K]$
- $\rho = \text{densidad del PET promedio} = 1,2545 \left[\frac{g}{cm^3} \right] = 1254500 \left[\frac{g}{m^3} \right]$
- $Q = \text{Caudal calculado} = 2,394 \times 10^{-5} \left[\frac{m^3}{s} \right]$

$$\dot{m} = Q \cdot \rho = 9,717 \times 10^6 \left[\frac{m^3}{s} \right] \cdot 1254500 \left[\frac{g}{m^3} \right] = 12,19 \left[\frac{g}{s} \right]$$

Con el flujo másico se calcula el calor sensible requerido tanto para llevar al PET sólido al punto de fusión, como para llevar al PET fundido a la temperatura final:

$$\text{Calor sensible 1} = \dot{m} \cdot C_{p1} \cdot (T_{PF} - T_i)$$

$$\text{Calor sensible 1} = 12,19 \left[\frac{g}{s} \right] \cdot 1,3 \left[\frac{J}{g \cdot K} \right] \cdot (528 [K] - 298 [K]) = 3644,74 [W]$$

$$\text{Calor sensible 2} = \dot{m} \cdot C_{p2} \cdot (T_f - T_{PF})$$

$$\text{Calor sensible 2} = 12,19 \left[\frac{g}{s} \right] \cdot 2,3 \left[\frac{J}{g \cdot K} \right] \cdot (573 [K] - 528 [K]) = 1261,7 [W]$$

En cuando al calor latente:

$$\text{Calor latente} = \dot{m} \cdot L$$

$$\text{Calor latente} = 12,19 \left[\frac{g}{s} \right] \cdot 42 \left[\frac{J}{g} \right] = 511,97 [W]$$

Para finalizar se suman los calores calculados, obteniendo el calor total que se debe entregar al PET para llevarlo a 300 [°C].

$$\Delta H = \text{Calor} = \text{Calor sensible 1} + \text{Calor latente} + \text{Calor sensible 2}$$

$$\Delta H = \text{Calor} = 3644,74 [W] + 1261,7 [W] + 511,97 [W]$$

$$\text{Calor requerido} = \Delta H = 5418,3 [W]$$

Este calor calculado es el requerido para fundir el PET y llevarlo a la temperatura de trabajo. También se lo denomina potencia teórica del motor en estado adiabático [28] dado que es la potencia mecánica que debería tener el motor si el sistema no tuviera pérdidas y no intercambiara calor con resistencias o sistemas de refrigeración.

El tornillo calienta al material por la fricción generada por el esfuerzo de corte que aparece por la diferencia de velocidad entre las partículas pegadas a la pared del tornillo y las ubicadas en capas externas, es decir, debido a su viscosidad.

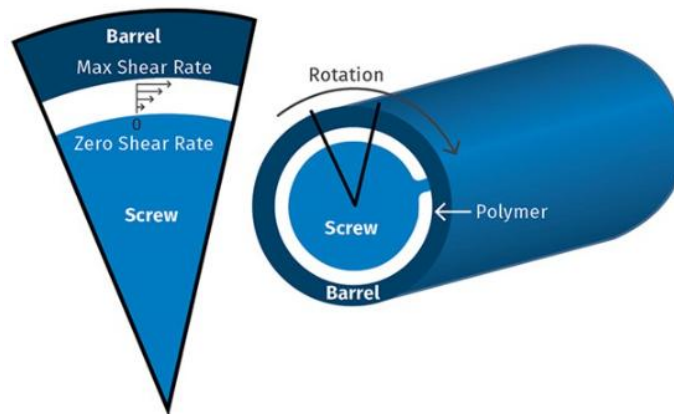


Figura 9-18: Tasa de corte en el polímero. [19]

Las resistencias tienen la función de fundir la capa superficial de polímero y así asegurar una temperatura de trabajo adecuada. Por lo tanto, un enfoque conservador a tomar es dimensionar al motor previendo que el aporte de calor al material es provisto por la potencia entregada al motor.

De la energía ingresada al sistema aproximadamente el 61% es utilizado para convertir el polímero sólido en la resina fundida [2]. El resto se utiliza para mover el polímero y disiparse como pérdidas en la máquina. Otras fuentes indican que la potencia del motor se convierte en calor con una efectividad del 70 a 80% [11] [28].

Si bien la energía térmica puede ser provista tanto por el tornillo como por las resistencias, se debe tener en cuenta que las resistencias calefactoras se utilizan para calentar la máquina hasta llevarla a un punto de operación óptimo, y lograr una capa de fundido inicial del material. Durante el proceso, el calor es provisto por el tornillo. [19]. Por lo tanto, se dimensiona al motor para tener la capacidad de proveer la energía térmica necesaria para fundir al material.

$$P_{requerida} = \frac{5418,3[W]}{0,61} = 8882,53 [W]$$

$$P_{requerida} = 11,9 [HP]$$

Se decide seleccionar un motor de potencia nominal de $P_n = 15 [HP] = 11 [KW]$.

Tomar las consideraciones vistas provoca un aumento de la potencia nominal del sistema. Si bien puede parecer un sobredimensionamiento excesivo, debe recordarse que es un sistema mecánico que debe ser capaz de funcionar con confiabilidad. Debe ser capaz (junto con la instalación eléctrica) de soportar eventuales bloqueos por exceso de material o suciedad, que tiendan a frenar el tornillo. Más aún para extrusoras de recuperado, donde el

material puede tapar las placas rompedoras y generar una presión grande. Se verifica que la potencia del motor cae dentro de los intervalos estimados en la Tabla 9-1.

Se observa que se aumenta considerablemente el valor de potencia con respecto a la potencia del motor original. Si la máquina original sufrió algún tipo de bloqueo del tornillo, el conjunto de motor y resistencias podría no haber sido suficiente y haber sufrido una sobrecarga. Esto explica su estado al momento del relevamiento: se hallaba con problemas de aislamiento entre sus bobinas.

9.6. Requerimiento de refrigeración del extruido

El filamento extruido debe pasar por un baño de agua para disminuir su temperatura y solidificarse previamente al pelletizado. A continuación, analizaremos el requerimiento de refrigeración del agua en base a la capacidad de producción estimada.

Tomando como referencia el flujo másico calculado en la sección 9.4.2, se realiza un cálculo aproximado de la potencia requerida para llevar el PET a la temperatura de fusión a 300 [°C].

Para realizar los cálculos, se deben recordar algunas propiedades del PET:

- $C_{p1} = \text{Calor específico del sólido} = 1,3 \left[\frac{J}{g \cdot K} \right]$
- $C_{p2} = \text{Calor específico del fundido} = 2,3 \left[\frac{J}{g \cdot K} \right]$
- $L = \text{Calor latente específico} = 42 \left[\frac{J}{g} \right]$
- $\text{Punto de fusión} = 255 [^{\circ}C] = 528 [K]$

En partículas para el proceso que se analiza, se tienen las siguientes características:

- $T_i = \text{Temperatura de ingreso filamento PET} = 300 [^{\circ}C] = 573 [K]$
- $T_f = \text{Temperatura final requerida} = 40 [^{\circ}C] = 313 [K]$
- $\rho = \text{densidad del PET promedio} = 1,2545 \left[\frac{g}{cm^3} \right] = 1254500 \left[\frac{g}{m^3} \right]$
- $Q = \text{Caudal calculado} = 2,394 \times 10^{-5} \left[\frac{m^3}{s} \right]$

$$\dot{m} = Q \cdot \rho = 9,717 \times 10^6 \left[\frac{m^3}{s} \right] \cdot 1254500 \left[\frac{g}{m^3} \right] = 12,19 \left[\frac{g}{s} \right]$$

Con el flujo másico se calcula el calor sensible requerido tanto para llevar filamento de PET extruido al punto de solidificación, como para llevar el filamento de PET sólido a la temperatura final:

$$\text{Calor sensible 1} = \dot{m} \cdot C_{p1} \cdot (T_i - T_{ps})$$

$$\text{Calor sensible 1} = 12,19 \left[\frac{g}{s} \right] \cdot 2,3 \left[\frac{J}{g \cdot K} \right] \cdot (573 [K] - 528 [K]) = 1261,67 [W]$$

$$\text{Calor sensible 2} = \dot{m} \cdot C_{p2} \cdot (T_{ps} - T_f)$$

$$\text{Calor sensible 2} = 12,19 \left[\frac{g}{s} \right] \cdot 1,3 \left[\frac{J}{g \cdot K} \right] \cdot (528 [K] - 313 [K]) = 3407,11 [W]$$

En cuando al calor latente:

$$\text{Calor latente} = \dot{m} \cdot L$$

$$\text{Calor latente} = 12,19 \left[\frac{g}{s} \right] \cdot 42 \left[\frac{J}{g} \right] = 511,97 [W]$$

Para finalizar se suman los calores calculados, obteniendo el calor total que aporta el PET al agua presente en el recipiente.

$$\Delta H = \text{Calor} = \text{Calor sensible 1} + \text{Calor latente} + \text{Calor sensible 2}$$

$$\Delta H = \text{Calor} = 1261,67 [W] + 3407,11 [W] + 511,97 [W]$$

$$\text{Calor entregado} = \Delta H = 5180,75 [W]$$

Mas adelante se analizará la cantidad de horas que se producirá en el taller. Se ha observado en muchos casos prácticos que la temperatura ambiente y la baja producción de una extrusora pequeña vuelve poco justificable la inversión de incorporar refrigeración del agua de servicio al sistema. Es importante tener en cuenta que la asociación cuenta con una torre de enfriamiento por instalar, la cual puede ser aprovechada para refrigerar de manera económica el agua.

10. Aplicación para PET

10.1. Utilidad para el PET del Tornillo

El mayor problema de diseño que presenta el tornillo actual es la falta de elementos de mezclado como barreras y mezcladores, que son de gran importancia para procesar PET. La humedad por remover del material puede extraerse en una etapa previa a la extrusión, para no utilizar extrusoras venteadas. Puede hacerse igualmente un análisis sobre las características del tornillo original para relevar su rendimiento en comparación de la geometría recomendada.

El PET es un polímero semi-cristalino. Por lo tanto, presenta un salto importante de calor latente para pasar del estado sólido al fundido. Para eso, es conveniente tener un salto brusco de diámetro interno del tornillo en la zona de compresión, para asegurar que el calor generado por los esfuerzos viscosos en la compresión y el calor aportado por las resistencias funda el plástico. En el tornillo existente, la zona de compresión es abrupta y pasa del diámetro mínimo al máximo rápidamente, lo cual coincide con lo requerido.

La relación de compresión ideal para el PET es de 3:1, y el tornillo relevado tiene una relación de 3,83:1, la cual resulta un poco elevada.

En cuanto a la relación L/D ideal, se indica que las extrusoras de PET tienen una relación L/D ideal de 24:1 a 32:1. La extrusora relevada tiene una relación L/D de 19,28:1. Es algo menor a lo requerido, que resulta en un tiempo de residencia del plástico menor dentro de la extrusora.

10.2. Conclusiones de la primera etapa. Viabilidad

Hasta este punto del proyecto se realizó un relevamiento íntegro de la extrusora. Se estudió en profundidad el estado del arte del reciclaje de PET. Se practicó un análisis teórico sobre el desempeño del tornillo para transportar material. Se realizaron además muchas visitas y conversaciones con actores involucrados en extrusión de polímeros y reciclaje de PET. A partir de esos puntos, se definieron los principales puntos para reacondicionar la extrusora:

1. Se deberá reemplazar el motor original por uno de mayor potencia. No solo porque el mismo presenta problemas de aislamiento, sino también porque se encuentra subdimensionado para el proceso a desarrollar.

2. Si se desea optimizar el proceso para el reciclaje de PET se debe reemplazar el tornillo por un tornillo de barrera con mezclador. El reemplazo del tornillo por uno adecuado para el proceso favorece la transferencia de calor y el mezclado del material, aunque reduce (por el aumento de la caída de presión) el caudal máximo a obtener.
3. Se deberá adquirir una camisa nueva con tratamiento de endurecimiento por nitrurado, y dimensiones acordes al tornillo y al juego requerido. Para mejorar el rendimiento con extrusión de escamas la camisa debe ser estriada en la sección de alimentación. Según lo analizado en la sección 10.1 la relación L/D recomendada debe ser de 24:1 a 32:1. Se decide buscar un sistema con una relación L/D de 24:1.
4. Se debe reemplazar el sistema de control por un sistema más moderno, con control de velocidad del motor mediante variador de frecuencia y múltiples controles de temperatura por zona, por medio de pirómetros digitales. El aparataje eléctrico de protección debe reemplazarse íntegramente para asegurar el buen funcionamiento del equipo.

Sobre estos puntos se proyectaba el reacondicionamiento de la extrusora. No obstante, al finalizar esta primera etapa surgieron nuevas condiciones que modificaron el rumbo el trabajo, en particular la posibilidad de acceder a un financiamiento para el proyecto. Este cambio de contexto será detallado a continuación.

10.3. Cambio de condiciones: contexto de cierre

Durante principios de agosto de 2025 surgió la posibilidad de que la ONG “Todo para Ellos” accediera a un financiamiento parcial a través del Fondo de Innovación Tecnológica de Buenos Aires (FITBA).

Ante esta oportunidad, fue necesario avanzar con el proyecto rápidamente para conseguir los presupuestos de todos los elementos y equipos requeridos para poner en funcionamiento el nuevo proceso. Se definió el reacondicionamiento eléctrico y mecánico y se obtuvieron presupuestos de equipos, aparataje y partes faltantes o a reemplazar. Luego, a partir de los costos de equipos y partes sin instalar, y utilizando el método de los factores se estimó la inversión total necesaria para poner en funcionamiento la línea.

A su vez, se contactó a distintos actores del mercado del reciclado en la argentina y se investigó sobre el estado actual de esta industria. Tanto recuperadores como la propia Cámara Argentina de la Industria del plástico (CAIRPLAST) comentaron que la situación actual del reciclaje es particular, como se detalló en la sección 2.3.4.



Figura 10-1: Extracto de comunicación con CAIRPLAST

Se obtuvieron los precios en el mercado argentino (Agosto 2025) de escamas de PET, de pellets de PET reciclado, pellets de PET reciclado de grado alimenticio y pellets de PET virgen. En base a esta información, a las características de los equipos (requerimientos temporales, capacidad, potencia, etc.) y a las condiciones particulares del taller protegido, se realizó un análisis económico para determinar el costo final del kilogramo de pellet de PET a producir (ver sección 12). **Allí se concluyó que el proyecto es económicamente inviable**, dado que el costo estimado de producción es superior tanto al precio de mercado del pellet reciclado como al precio del pellet virgen.

En este contexto, se realizó un segundo viaje a Necochea para realizar un segundo relevamiento, presentar a la ONG el avance del proyecto y las conclusiones parciales. Durante la presentación se convalidaron los valores de mercado en base al conocimiento de los miembros de la organización. A su vez, se analizó en detalle el contexto particular en el que se realiza el proyecto y las condiciones en las que se inscribe, corroborando que lo planteado tanto en el análisis económico, como en el resto del proyecto es correcto (horario de trabajo, costo de energía eléctrica, costo mano de obra, entre otros).

En este contexto, se continuó con el trabajo con el objetivo de dejar por sentado lo planteado sobre el reacondicionamiento eléctrico y mecánico, y el análisis económico realizado. Tanto anexos, como manuales de operación, mantenimiento y recomendaciones de seguridad ya se encontraban con un alto grado de avance, y por lo que se decidió finalizarlos con la información disponible.

11. Reacondicionamiento

11.1. Reacondicionamiento mecánico

11.1.1. Tornillo

El tornillo original se hallaba en un estado poco apropiado para su reutilización. Se conversó con diferentes fabricantes y se observó que el precio de reacondicionar el tornillo resultaba más de un 60% del precio de un tornillo nuevo [17]. Además, no era conveniente realizar esa inversión dado que el diseño base del tornillo no se puede modificar con un rellenado, torneado y rectificado. Un diseño adecuado para PET requiere un tornillo nuevo. Por lo tanto, se concluyó que el tornillo debía comprarse de cero. Según lo visto con los fabricantes, el diseño de detalle del tornillo se debe realizar teniendo en cuenta el flujo de material deseado, las condiciones de la planta y el material a utilizar. Si bien se tenían los datos disponibles, al no avanzar con el proceso de compra del tornillo no se terminó de dimensionar el equipo. Se presenta por lo tanto un croquis esquemático indicando las secciones más importantes del tornillo.

Se decide mantener el acople al reductor original, y el diámetro original de 39 mm. Se decide utilizar un tornillo de mayor largo, para tener una relación L/D más similar a la recomendada en la teoría, de $L/D=24$. Para mejorar el mezclado se incluye una sección de barrera y mezclador tipo Maddock, para asegurar un flujo uniforme.

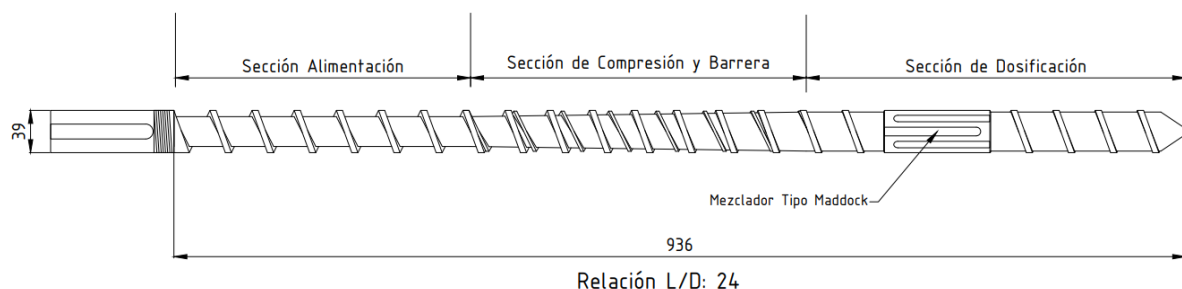


Figura 11-1: Croquis tornillo nuevo.

Se debe remarcar que el añadido de todas las zonas de mezclado genera una caída de presión grande en el tornillo. El análisis detallado del caudal se vuelve difícil de lograr. Sin embargo, se recabó información con distintos fabricantes de camisas y tornillos, que indicaron que este tipo de máquinas suele entregar un caudal de $G_{Pr\acute{a}ctico} = 25 [Kg/H]$. Se decide utilizar ese valor como referencia para los análisis próximos.

11.1.2. Camisa

Debe comprarse una nueva camisa dado que la original se encuentra extraviada. Según lo analizado, el conjunto tornillo-camisa nuevo debe diseñarse en conjunto. La camisa se recomienda que tenga una zona de estriado en la alimentación. Debe tener un tratamiento de nitruración o cementado en su sección interior y debe ser de un acero aleado de alta dureza y resistencia a la temperatura. Golche [17] indicó que para extrusión y recuperado de PET se debe utilizar acero aleado Böhler V-820 (cromo-níquel-aluminio), con un nitrurado superficial.

Se decide incluir la zona de roscado para el acople con la brida del reductor. También se incluye la brida para la fijación del cabezal. Se incluyen tres orificios para alojar las termocupas, y se incluye una garganta de alimentación circular del mismo diámetro que la tolva.

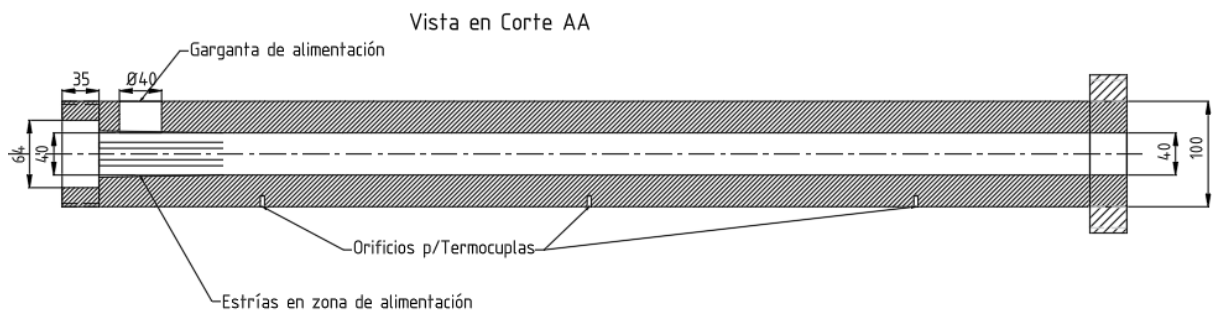


Figura 11-2: Croquis camisa nueva.

11.1.3. Estructura

La estructura de soporte original dejaba a la camisa en voladizo. Una camisa de mayor largo generaría una mayor solicitación sobre todo el conjunto. Se decide diseñar una estructura de soporte nueva, con una chapa plana que soporte a todo el sistema y una serie de perfiles en L para la estructura propiamente dicha. Se presenta un croquis de las dimensiones del conjunto en el Anexo VI – Reacondicionamiento mecánico – Esquemas de armado.

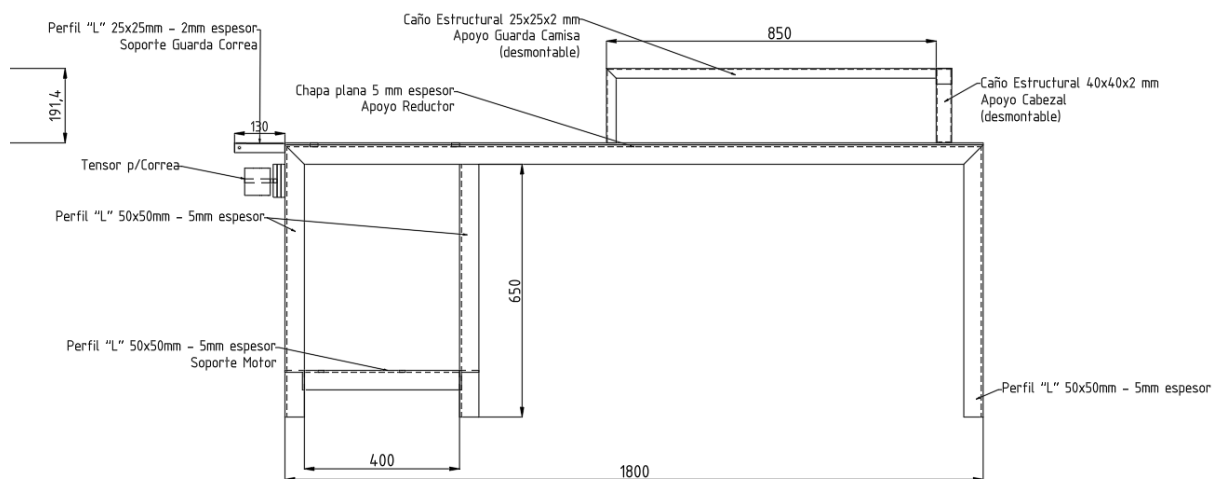


Figura 11-3: Croquis estructura.

Se incluye con la estructura un apoyo para el cabezal, para que el conjunto de la camisa no esté en voladizo. Se debe construir un soporte para alojar al motor. Se debe incluir un tensor para la correa, y soportes para alojar a las guardas, tanto de la correa como de la camisa. Se detallan los materiales requeridos en la **Hoja 8 - Estructura de Soporte**.

11.1.4. Transmisión

La transmisión está compuesta por el conjunto de poleas, el juego de correas y el reductor. El primer paso para tener una velocidad adecuada es colocar las poleas en el reductor y el motor de manera correcta. Se desea que la correa reduzca la velocidad de giro, por lo que la polea de menor diámetro debe ubicarse en el eje del motor y la polea mayor debe ubicarse en el reductor. Debe revisarse el estado de las poleas, si presentan un desgaste elevado deben reemplazarse.

El sistema original admitía dos correas. Para asegurar el funcionamiento correcto deben comprarse nuevamente.

El reductor debe desarmarse y limpiarse de cero para su utilización. Se observó durante el relevamiento que funcionaba correctamente. Se decide no reemplazarlo dado que se asume que su diseño original contemplaba un sobredimensionamiento suficiente como para

soportar la nueva potencia del motor. Si se compara con reductores actuales de potencia similar se observa que el reductor original posee ejes de gran tamaño y un peso que indican buena capacidad de transmisión de potencia.

Debe realizarse un lijado, remoción de óxido, y reacondicionado de toda la sección de acople del tornillo, dado que presenta un grado de corrosión y desgaste relativamente alto.



Figura 11-4: Corrosión en el acople del tornillo

11.1.5. Periferia

Para poder utilizar la máquina en su totalidad deben procurarse los componentes que faltan. La pileta de enfriamiento está completa, por lo que puede reutilizarse. Debe comprarse una pelletizadora para convertir los hilos en pellets procesables. Debe comprarse un horno para el secado del material previo a su extrusión. La pelletizadora y el horno usualmente cuentan con su propia instalación eléctrica, con lo que el análisis en detalle del reacondicionamiento queda por fuera del alcance del proyecto.

11.1.6. Elementos de seguridad

Se reutilizará el resguardo mecánico fijo que cubre las poleas de la extrusora.

Se incorporará un nuevo resguardo mecánico sobre la camisa y resistencias. Este resguardo será removible, de tal manera de que se pueda acceder a las resistencias y termocuplas. Se decide alojar un sensor de final de carrera sobre la estructura de soporte de la guarda. Si se remueve la guarda, el contacto se abre e impide el funcionamiento del equipo.

11.2. Reacondicionamiento eléctrico

Se decide realizar la instalación eléctrica del sistema de cero. Se decide diseñar un tablero eléctrico con las protecciones y accionamientos necesarios para todo el control del sistema.

11.2.1. Estándares y normativas

Para el diseño del equipo se tomaron en cuenta las siguientes normas y estándares a nivel nacional e internacional para la construcción del equipo.

- IEC-61439 - Low Voltage Switchgear and control gear assemblies.
- AEA 90364 – Normas y Criterios básicos para el diseño, instalación y verificación de instalaciones eléctricas seguras.
- IEC 60529 - Degrees of Protection Provided by Enclosures
- IEC 62262 - Degrees of Protection provided by Enclosures for Electrical Equipment against External Mechanical Impacts.

11.2.2. Cargas eléctricas

Se propone reemplazar al motor por uno nuevo de mayor potencia. Debe tener la misma velocidad nominal que el motor original, de $n_s = 1500 [rpm]$. Por lo tanto, debe ser de 4 polos. Debe tener una potencia nominal de 15 [HP]. Se decide seleccionar a modo de referencia un motor WEG de 15 [HP]. Se resumen sus características eléctricas en la Tabla 11-1.



Figura 11-5: Motor WEG.

Parámetros eléctricos	
Potencia	11 kW (15 HP)
Tensión	380/660 V
Frecuencia	50 Hz
Número de polos	4
Velocidad síncrona	1500 rpm
Velocidad nominal	1470 rpm
Resbalamiento	2.00 %
Corriente nominal	21.9/12.6 A
Corriente de arranque	131/75.7 A
I_p/I_n	6.0
Corriente en vacío	9.10/5.24 A
Torque nominal	52.7 ft.lb
Torque de arranque	200%
Torque máximo	250%
Tiempo de rotor bloqueado	21 s (frío), 12 s (caliente)
Momento de inercia (J)	2.49 ft.lb ²
Eficiencia (50/75/100%)	89.5 / 90.2 / 89.8
Factor de potencia (50/75/100%)	0.69 / 0.79 / 0.85

Tabla 11-1: Características eléctricas motor.

En cuanto a las resistencias eléctricas, se decide reutilizar todas las resistencias halladas en el relevamiento en el taller. De ser necesario, pueden comprarse más resistencias debido al mayor largo de la camisa, que puede requerir una mayor cantidad de elementos calefactores.

Se observó que cada resistencia de la zona de la camisa tiene un valor medido de 107 $[\Omega]$. Puede calcularse la corriente que consume cada una, a tensión de fase:

$$I_{res} = 220 [V] / 107 [\Omega] = 2,05 [A]$$

$$P_{res} = U \cdot I = 220 [V] \cdot 2,05 [A] = 451 [W]$$

Si se colocan en grupos de tres, para cada zona de la camisa, resulta que la corriente total es $I_{grupo} = 6,15 [A]$. Se decide montarlas en configuración monofásica. Si bien aumentará el desbalance entre fases, reduce las posibilidades de cortocircuitos entre fases si ocurre una falla. Se tendrán cuatro grupos de cargas resistivas, que aportarán un total de $I_r = 24,6 [A]$. Se instalarán en configuración monofásica.

La potencia total consumida por el equipo es por lo tanto de:

$$P_{Motor} = 11 [kW]$$

$$P_{calefactora} = 5,4 [kW]$$

$$P_{equipo} = 16,4 [kW]$$

Se observa que debido a las características de funcionamiento el factor de simultaneidad a considerar es $f_s = 1$, dado que puede darse el caso donde esté entregando plena potencia el motor y las resistencias estén calentando en su conjunto.

11.2.3. Aparataje del tablero

Para las protecciones se diseñó con aparataje Siemens para tener como referencia y estándar. **Los materiales indicados son referenciales**, dado que no se prosiguió con la construcción práctica del proyecto, y la disponibilidad de cada componente puede variar en el futuro.

En base a los elementos utilizados se seleccionó un gabinete de chapa metálica de grado de protección IP-65 Gabexel GECL 15060-400, de $1500 \times 600 \times 400$ [mm]. Este grado de IP asegura estanqueidad contra polvo, y chorros de agua de baja presión. Se remarca que debido a la alta cantidad de aparataje y mandos colocados en puerta el grado de estanqueidad se reducirá.

A la entrada del tablero se seleccionó un interruptor automático tetrapolar (-QP) Siemens 3VA1110-3EF32-0AA0. Tiene corriente nominal $I_n = 100$ [A], y presenta la posibilidad de regularse hasta $I_r = 70$ [A]. Se seleccionó entre los disponibles dado que presenta la opción de regular el disparo térmico, de corta y larga duración e instantáneo. Presenta un poder de corte último de $I_{cu} = 25$ [kA], igual al poder de corte en servicio $I_{cs} = 25$ [kA]. Se colocó un mando en puerta con enclavamiento mecánico, para permitir el seccionamiento del equipo desde la puerta.

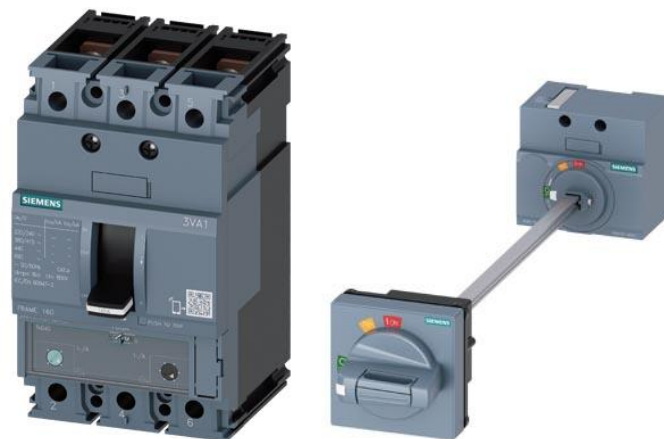


Figura 11-6: Interruptor automático con mando en puerta

Luego del interruptor se decidió incluir un contactor de línea (-KM1) Siemens 3RT2036-1AP00, cuya bobina se energiza a través de la botonera de golpe de puño de parada de emergencia (-S1), el cual tiene un contacto normal cerrado. Ante una falla, puede presionarse el golpe de puño, al tener retención mecánica abre el contactor, y mantiene desenergizadas las cargas hasta desactivarlo. La bobina toma la tensión monofásica de 220 [V] inmediatamente después del interruptor automático.



Figura 11-7: Contactor trifásico con bobina en 220 VCA

Se colocan aguas arriba del interruptor tres indicadores LED de presencia de tensión del tablero. Indican si a los bornes del interruptor llega la tensión de la red.

Luego del contactor se coloca un distribuidor de cuatro barras Elent 4 7 125 (-G1) para poder realizar los debidos conexiones para cada carga. Cada barra admite una corriente nominal de $I_n = 125 [A]$, tiene $82,55 [mm^2]$ de sección. El distribuidor puede montarse sobre un riel din sobre su propia carcasa.



Figura 11-8: Distribuidor de corriente.

Para el motor, se colocó un guardamotor (-Q1) Siemens 3RV2021-4EA10, de corriente nominal $I_n = 32 [A]$. Se decidió regular en $I_n = 27 [A]$. El guardamotor protege a los componentes aguas abajo ante un corto y una sobrecarga, por su curva de actuación. Además, es el aparato que permite el seccionamiento del conjunto.

Se colocó un Variador de Frecuencia Siemens G120C 11 kW (-A1) para la operación y control del motor. Su ficha técnica indica que admite alto torque durante breves períodos de

tiempo, apropiado para un sistema de engranajes reductores que puede presentar alta fricción.



Figura 11-9: Variador de frecuencia Siemens para motores de 11 kW.

Para la protección de las personas contra eventuales fallas a tierra del motor se colocó un disyuntor diferencial trifásico (-QD2) de 40 A de corriente nominal, 30 mA de sensibilidad diferencial, de Tipo B. Este tipo de disyuntores permite detectar fugas de corriente directa y fugas de corrientes de alta frecuencia, que no son detectadas por los disyuntores tipo A (sólo para corriente alterna). Se debe remarcar que los disyuntores trifásicos son de cuatro polos, mientras que al variador solamente le llegan las tres fases. El fabricante indica que el dispositivo funciona normalmente sin conectar el polo neutro a la red.

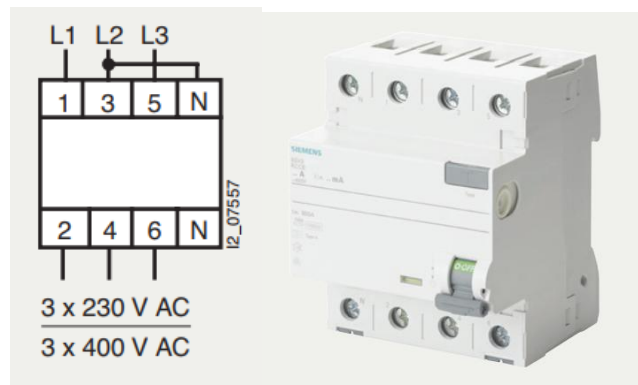


Figura 11-10: Disyuntor trifásico en redes sin neutro.

Para la alimentación de las resistencias se colocó un PIA (-**QC1**) (pequeño interruptor automático) termomagnético de dos polos, de 10 A de corriente nominal y curva C de accionamiento. Se lo colocó tomando potencia entre la fase R y el neutro.



Figura 11-11: PIA Siemens. Curva C

Se colocó luego un disyuntor diferencial (-**QD1**) de 30 mA de sensibilidad. Esta línea monofásica alimenta a todas las resistencias, las cuales están divididas en cuatro grupos. Cada grupo está protegido por una termomagnética de $I_n = 6 [A]$ (-**Q2**, -**Q3**, -**Q4**, -**Q5**), y es accionado por un relé de estado sólido (-**KM2**, -**KM3**, -**KM4**, -**KM5**) de $I_n = 10 [A]$ de corriente máxima.



Figura 11-12: Relé de estado sólido.

Estos relés de estado sólido permiten el manejo de cargas resistivas al igual que un contactor, pero al no tener contactos sólidos no presentan el desgaste por los ciclos elevados de maniobras.

Sobre la línea monofásica se colocaron fusibles (-F220/...) (montados sobre borneras portafusible de tipo tabaquera) para la protección de los controladores de temperatura.



Figura 11-13: Bornera portafusible.

Se colocó además un transformador (-T1) de pequeña potencia, de 220V/24V para la alimentación de los pilotos y alarmas de temperatura del control.

11.2.4. Control

Se decide utilizar un control de la temperatura mediante cuatro controladores digitales de temperatura (-PIR1, -PIR2, -PIR3, -PIR4), que controlen cuatro grupos de resistencias calefactoras para cuatro zonas distintas:

- Zona 1: Alimentación
- Zona 2: Compresión
- Zona 3: Dosificación
- Zona 4: Cabezal

La temperatura de cada zona podrá ser configurada individualmente desde la puerta del tablero de control, con las interfaces propias de cada pirómetro.



Figura 11-14: Pirómetros digitales de control de temperatura. Novus 1030

Cada pirómetro es alimentado en 220 [VCA], aguas abajo del disyuntor diferencial. Tiene un consumo de $S = 5$ [VA]. A cada uno se le conecta una termocupla NTC (-TC1, -TC2, -TC3, -TC4) ubicada sobre la camisa. La salida de pulsos se conecta a los bornes de control de los relés de estado sólido. La salida a relé acciona un zumbador con luz ubicado en la puerta frontal del tablero (-H7, -H8, -H9, -H10) que alerta sobre una sobretemperatura seteada previamente.

El accionamiento del motor se realizará mediante un variador de frecuencia. La velocidad podrá ser controlada mediante un potenciómetro, el cual se alimenta desde una tensión auxiliar del propio variador. Se incluye un selector de dos posiciones con llave, que incluye un contacto normal abierto. Si se lo alimenta con la tensión auxiliar del variador, permite configurarse para que funcione como una habilitación del propio variador.

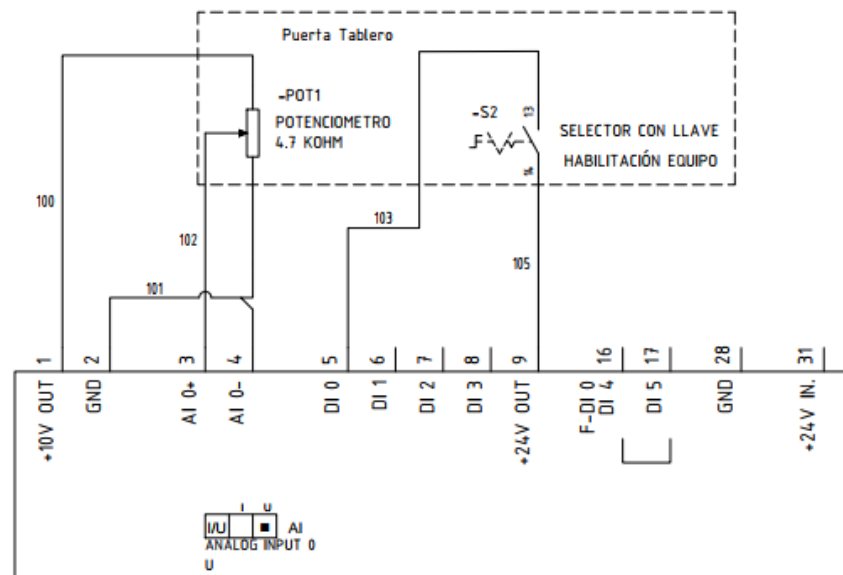


Figura 11-15: Control del variador.

El variador además incluye un panel de operación con botones de marcha y parada, y una pantalla que permite visualizar la velocidad y programar todas las configuraciones necesarias para su puesta en marcha y funcionamiento.



Figura 11-16: Panel de operación del variador.

Sobre las salidas digitales del variador se colocan relés de 24 VCA (**-KA1**, **-KA2**), los cuales encienden luces indicativas (**-H4**, **-H6**) sobre el estado del motor (funcionando, parado). Se coloca una tercera luz piloto (**-H5**) conectada a los contactos auxiliares del guardamotor. Si éste abre por una falla, se enciende la luz. Estos pilotos están todos alimentados a 24 [VCA] por un transformador (**-T1**) de control.

En cuanto a los enclavamientos, se decide incluir un sensor de final de carrera (**-SW1**) que en caso de levantar la guarda desenergiza la bobina del contactor de línea **-KM1**, abriendo el contactor y seccionando el equipo.

Se presentan los planos eléctricos Unifilares, Funcional de Control y Potencia, Topográficos y Diagramas de bornera en el Anexo V – Esquemas Eléctricos.

12. Evaluación Económica

12.1. Contexto económico

Al mes de agosto de 2025 la producción de pellets de PET reciclado está en un momento delicado. El precio de venta final es poco competitivo en comparación al material virgen importado, el cual es de mejor calidad. Por lo tanto, los fabricantes se vuelcan a utilizar el material más conveniente y dejan de lado el reciclado, perjudicando a los recuperadores y a la economía circular establecida en torno al manejo de residuos. En este contexto es de interés analizar la viabilidad económica del proyecto además de la técnica, para confirmar que el uso de la máquina genere utilidad en la ONG.

12.2. Productos similares

En Argentina existen diferentes recuperadoras en las ciudades de mayor importancia. Se recabó información de plantas ubicadas en la zona del Gran Buenos Aires y la zona de Córdoba Capital. Se listan los precios relevados en agosto de 2025. Debe remarcarse que por la fluctuación del mercado

- Pellet PET reciclado de Grado Alimenticio - Reciclar S.A. (Córdoba Capital): 1750 USD/Tonelada
- Pellet PET reciclado de Grado Alimenticio – Ecopek (General Pacheco): 1400-1500 USD/Tonelada
- Pellet PET reciclado – Rapet S.A. (Mercedes): 1400 Pesos/kg
- Escama de PET reciclado – Samantha: 1000 Pesos/kg

12.3. Ingeniería de la Producción

12.3.1. Determinación de la capacidad de producción

A partir de las características de la extrusora analizadas previamente, se sabe que la capacidad de diseño puede aproximarse a los $25 \left[\frac{kg}{h} \right]$ en condiciones ideales. Se decide utilizar el valor ideal para estudiar el mejor caso posible.

$$Capacidad\ de\ diseño = 25 \left[\frac{kg}{h} \right]$$

Se plantea un esquema de trabajo en el cual por día se opera la máquina 4 horas. Contando que se tienen 240 días hábiles por año, se obtiene:

$$\text{Capacidad de diseño} = 25 \left[\frac{kg}{h} \right] \cdot 4 \left[\frac{h}{día} \right] = 100 \left[\frac{kg}{día} \right]$$

$$\text{Capacidad de diseño} = 100 \left[\frac{kg}{día} \right] \cdot 240 \left[\frac{días}{año} \right] = 24.000 \left[\frac{kg}{año} \right]$$

Se considera que el tiempo de operación continuo de la máquina es de 4 horas debido a que el proceso de precalentamiento dura aproximadamente una hora, durante el cual el caudal de material se haya totalmente detenido. Considerando un turno de trabajo de 8 horas, se deshumidifica las primeras 4 horas, luego se precalentará durante la última hora de secado, y finalmente se extruye las restantes 4 horas.

Este valor no es ideal, dado que puede optimizarse el proceso para que la extrusión sea continua, omitiendo todos los ciclos de arranque y parada de la máquina. No se plantea dado que el esquema de trabajo del Taller Protegido no involucra jornadas laborales continuas.

12.3.2. Especificación de los equipos

A continuación, se resumen los equipos y partes principales a adquirir:

Deshumidificador 3 en 1	
Fabricante	Haichen
Importador	CABB Plastics
Modelo	XD-120U/90H
Potencia	13 [kW]
Capacidad	25 [Kg/h]
Dimensiones	1200 × 100 × 1870 [mm]
Peso	376 [Kg]

Tabla 12-1: Características deshumidificador.



Figura 12-1: Deshumidificador CABB. Imagen ilustrativa.

原料 Raw Material	干燥温度 Drying Temperature (°C)	干燥时间 Drying Time (hr)	比热 Specific Heat (J/kg.°C)	Material Proportion (kg/dm³)	水率 (%) Water Ratio Before Dehumidifying	水率 (%) Water Ratio After Dehumidifying	Drying Capacity (kg/hr)								
							XD-90H	XD-120H	XD-150H	XD-200H	XD-300H	XD-400H	XD-500H	XD-700H	XD-1000H
ABS	80	2-3	0.34	0.6	0.3	0.02	27	35	71	105	180	210	285	355	425
CA	75	2-3	0.5	0.5	1	0.02	22	30	60	90	150	180	235	295	355
CAB	75	2-3	0.5	0.5	0.8	0.02	22	30	60	90	150	180	235	295	355
CP	75	2-3	0.6	0.6	1	0.02	27	35	71	106	180	210	285	355	425
LCP	150	4	0.6	0.6	0.04	0.02	20	27	55	80	135	160	210	265	320
POM	100	2	0.35	0.6	0.2	0.02	40	53	105	160	265	320	425	530	640
PMMA	80	3	0.35	0.65	0.5	0.02	29	38	77	115	192	230	307	383	460
ILNOMER	90	3-4	0.55	0.5	0.1	0.04	17	22	44	66	111	133	177	220	265
PA6/6.6/6.10	75	4-6	0.4	0.65	1	0.05	14	19	38	58	96	115	153	192	239
PA11	75	4-5	0.58	0.65	1	0.05	17	23	46	69	115	138	184	230	275
PA12	75	4-5	0.28	0.65	1	0.05	17	23	46	69	115	138	184	230	275
PC	120	2-3	0.28	0.7	0.3	0.01	31	41	83	124	206	250	330	413	495
PU	90	2-3	0.45	0.65	0.3	0.02	29	38	77	115	190	230	307	383	460
PBT	130	3-4	0.3-0.5	0.7	0.2	0.02	23	31	62	93	155	186	248	310	372
PE	90	1	0.55	0.6	0.01	< 0.01	8	106	212	318	531	637	850	1062	1275
PEI	150	3-4	0.6	0.6	0.25	0.02	20	27	53	80	133	160	212	265	320
PET	160	4-6	0.3-0.5	0.85	0.2	0.02	19	25	50	75	125	150	200	250	300
PETG	70	3-4	0.6	0.6	0.5	0.02	20	27	53	80	133	160	212	265	320
PEN	170	5	0.85	0.85	0.1	0.05	23	30	60	90	150	180	240	300	360
PES	150	4	0.7	0.7	0.8	0.02	23	30	60	90	150	180	240	300	360
PMMA	80	3	0.65	0.65	0.5	0.02	29	38	77	115	190	230	310	385	460
PPO	110	1-2	0.4	0.5	0.1	0.04	33	44	88	133	220	265	355	440	530
PPS	150	3-4	0.6	0.6	0.1	0.02	20	27	53	80	133	160	212	265	320
PI	120	2	0.27	0.6	0.4	0.02	40	53	105	160	265	320	425	530	640
PP	90	1	0.46	0.5	0.1	0.02	66	88	180	265	442	530	710	885	1060
PS (GP)	80	1	0.28	0.5	0.1	0.02	66	88	180	265	442	531	708	885	1062
345PSU	120	3-4	0.31	0.65	0.3	0.02	22	29	60	85	145	173	230	290	345
PVC	70	1-2	0.2	0.5	0.1	0.02	33	44	90	135	220	265	355	442	530
SAN (AS)	80	1-2	0.32	0.5	0.1	0.05	33	44	90	135	220	265	355	442	530
TPE	110	3	0.7	0.7	0.1	0.02	30	40	85	125	205	250	330	413	495

Tabla 12-2: Características deshumidificador.

Se selecciona del catálogo del fabricante un deshumidificador preparado para procesar 25 Kg/H. Esto permite alimentar a la máquina con un caudal continuo de 25 Kg/H.

Camisa	
<i>Fabricante</i>	<i>Metalúrgica GOLCHE S.R.L</i>
<i>Diámetro</i>	39 [mm]
<i>Longitud</i>	936 [mm]
<i>Material</i>	V-820 aceros Böhler
<i>Tratamiento térmico</i>	Nitrurado gaseoso en 72 hrs, obteniendo dureza 66/68 HRC
<i>Comentario:</i>	No incluye bridas

Tornillo	
<i>Fabricante</i>	<i>Metalúrgica GOLCHE S.R.L</i>
<i>Diámetro</i>	39 [mm]
<i>Longitud</i>	936 [mm]
<i>Material</i>	V-820 aceros Böhler
<i>Tratamiento térmico</i>	Nitrurado gaseoso en 72 hrs, obteniendo dureza 66/68 HRC
<i>Comentario:</i>	Con paso variable y zona de mezclado

Pirómetros	
<i>Modelo</i>	<i>N1030</i>
<i>Fabricante</i>	<i>NOVUS</i>
<i>Código</i>	<i>8103000002</i>
<i>Salidas</i>	<i>Dos canales de salida, con opción para salida de control o salida de alarma.</i>
<i>Resolución</i>	<i>0,1 [°C] (rango)</i>
<i>Tensión nominal</i>	<i>220 [V]</i>
<i>Sensor compatible</i>	<i>Termocupla J, Termocupla K, Termocupla T, Termoresistencia Pt100</i>
Termocupla - Pt100	
<i>Fabricante</i>	<i>Tecnousa</i>
<i>Tensión</i>	<i>5 [V]</i>
<i>Dimensiones sonda</i>	<i>5mm x 30 mm</i>
<i>Rango</i>	<i>−50 [°C] a 400 [°C]</i>

Variador de frecuencia	
<i>Fabricante</i>	<i>Siemens</i>
<i>Código</i>	<i>6SL3210-1KE22-6AB1</i>
<i>Potencia Nominal</i>	<i>11 [kW] = 15 [HP]</i>
<i>Tensión nominal</i>	<i>3 × 380 [V]</i>
<i>Corriente nominal</i>	<i>25 [A]</i>
<i>Salidas analógicas</i>	<i>1</i>
<i>Entradas analógicas</i>	<i>2</i>
<i>Salidas digitales</i>	<i>2</i>
<i>Entradas digitales</i>	<i>4</i>
<i>Protocolos de comunicación</i>	<i>Modbus RTU, USS</i>
<i>Puertos</i>	<i>1xRS232/485</i>
<i>Comentario:</i>	<i>Se utilizará el panel de operaciones BOP-2</i>

Panel de operación BOP-2 ETH RJ45 P/PUERTA	
<i>Fabricante</i>	SIEMENS
<i>Código</i>	6SL3255-0AA00-4CA1
<i>Dimensiones</i>	103x106x81 (mm)
<i>Comentario:</i>	Incluye botón de marcha/parada y display



Figura 12-2: Panel de operación.

Motor	
<i>Fabricante</i>	WEG
<i>Código</i>	E01118EP3Y160MF3-W22
<i>Potencia Nominal</i>	11[kW] = 15 [HP]
<i>Revoluciones</i>	1500 [rpm]
<i>Polos</i>	4 [polos]
<i>Tensión nominal</i>	380/660 [V]

Pelletizadora	
<i>Fabricante</i>	<i>CABB Plastics</i>
<i>Potencia</i>	2,2 [kW] = 3 [HP]
<i>Cantidad de cuchillas rotantes</i>	9 [cuchillas]
<i>Cantidad de cuchillas fijas</i>	2 [cuchillas]
<i>Revoluciones</i>	520 [rpm]
<i>Tamaño de filtro (Sieve size)</i>	520 [mm]
<i>Peso</i>	144 [kg]
<i>Máxima capacidad de pelletizado</i>	100 – 150 [kg/h]
<i>Dimensiones</i>	730 × 440 × 900 [mm]

12.4. Cálculo de los factores variables

12.4.1. Materia prima

Escamas de PET: Teniendo en cuenta que la producción de escamas de PET en el Taller Protegido es de $1000 \left[\frac{kg}{día} \right]$ se tendrá un exceso de materia prima. Conversando con los miembros de la ONG, se corroboró que desde un principio la intención no fue procesar todo el material producido en el taller.

Considerando que el taller opera durante 8 horas por día, que se requieren 4 horas para secar el material y 1 hora para precalentar la extrusora, quedan disponibles aproximadamente 4 horas para extruir y pelletizar.

$$25 \left[\frac{kg}{h} \right] \cdot 4 \left[\frac{h}{día} \right] = 100 \left[\frac{kg}{día} \right] \text{ de escamas de PET reciclado}$$

Considerando que en el proceso de extrusión se pierde un 2% del peso de escamas del polímero, **la cantidad de pelletizado que se obtendrá por día es 98 [kg].**

12.4.2. Envases del producto

Bolsones: los pellets se depositarán en bolsones BIG-BAG. Las dimensiones de un bolsón son $900 \times 1200 \times 900 [mm]$, con lo que se puede estimar un volumen útil (90% del total) de $0,875 [m^3]$ [29]. La densidad aparente de los pellets de PET es de $800 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$. Por lo que la capacidad de cada bolsón se estima en: $700 \left[\frac{kg}{bolsón} \right]$.

La capacidad máxima de carga de los bolsones es de 1200 kg, por lo que no habría problemas de carga.

12.4.3. Horas-Hombre

Dadas las características del proceso se puede llevar a cabo la operación continua con la presencia de un solo operario. Se aconseja además la supervisión de un segundo operario. Como se trabajará dentro del Taller Protegido, un entorno donde se encuentra más de una persona realizando tareas, no es necesaria la exclusividad de dos operarios. Por lo tanto, si la máquina se sitúa en un área transitada y cercana a otros procesos, se requiere solamente un operario exclusivo.

12.4.4. Servicios Auxiliares

Secado: En base a que se requiere un bajo valor de humedad en las escamas de PET que entran en el proceso de extrusión se debe realizar un secado del material. Para ello se utilizará un deshumidificador que inmediatamente luego de secar el material, lo carga a la tolva de la extrusora.

Pelletizado: El extruido se enfriará y posteriormente será pelletizado, obteniéndose finalmente los pellets del PET reciclado.

12.4.5. Consumo energético

El consumo energético aproximado se calculó en base al consumo de los equipos y tiempo estimado de su uso. En la tabla 11 se presentan los valores obtenidos:

Equipo	Potencia (KW)	Tiempo por día (h)	Consumo diario (KWh)	Consumo por kg pellet (KWh)
<i>Deshumidificador 3 en 1</i>	13	8	104	-
<i>Extrusora Precalentamiento</i>	6	1	6	-
<i>Extrusora Proceso</i>	11	4	44	-
<i>Pelletizado</i>	2,2	4	8,8	-
Total			162,8 $\left[\frac{KWh}{día}\right]$	1,66 $\left[\frac{KWh}{kg\ pellet}\right]$

Tabla 12-2: Consumo energético a capacidad de diseño.

Se presenta como se calculó el consumo energético por kilogramo de pellet de PET reciclado.

$$Consumo_{dependiente} = \text{Deshumidificador} + \text{Precalentamiento extrusora} + \text{Extrusión} + \text{Pelletizado}$$

$$Consumo_{dependiente} = 162,8 \left[\frac{KWh}{día}\right]$$

Luego:

$$Consumo_{dependiente} = \frac{162,8 \left[\frac{kWh}{día}\right]}{98 \left[\frac{kg}{día}\right]} = 1,66 \left[\frac{kWh}{kg}\right]$$

12.5. Evaluación Económica del Proyecto

12.5.1. Relevamiento de precios de equipos principales

Todos los equipos que se utilicen en la planta serán comprados en lo posible a empresas ubicadas en la Provincia de Buenos Aires. A continuación, en la Tabla 12-3 se muestran los presupuestos para los equipos puestos en fábrica y sin instalación.

Equipo/repuesto	Capacidad	Empresa	Presupuesto (\$USD/unidad)
Deshumidificadora 3 en 1	25 kg/h	CABB PLASTICS	12.265
Camisa	25 kg/h	GOLCHE S.R.L	2.650
Tornillo		GOLCHE S.R.L	2.100
Motor		SIEMENS	1.918
Variador de frecuencia		SIEMENS	4.085
Panel de operación variador		SIEMENS	84
Cambia filtro		BATTLE	750
Pirómetros		NOVUS	90
Sensor de temperatura NTC		NOVUS	35
Elementos constructivos		Varios	415
Repuestos eléctricos		Varios	1.550
Pelletizadora	100 kg/h	CABB PLASTICS	1.700

Tabla 12-3: Presupuestos de los equipos principales

Los equipos fueron presupuestados para la capacidad requerida a principios de agosto de 2025. En la Tabla 12-4 se presentan los precios de los equipos y la cantidad necesaria de los mismos, con el presupuesto total en cada maquinaria/elemento:

Equipo/repuesto	Presupuesto (\$USD/unidad)	Cantidad requerida	Presupuesto total
Deshumidificadora 3 en 1	12265	1	12265
Camisa	2.650	1	2.650
Tornillo	2.100	1	2.100
Motor	1918	1	1918
Variador de frecuencia	4085	1	4085
Panel de operación variador	84	1	84
Cambia filtro	750	1	750
Pirómetros	90	4	360
Sensor de temperatura	35	4	140
Elementos constructivos	415	-	415
Repuestos eléctricos	1550	-	1550
Pelletizadora	1700	1	1700
Inversión total en equipos sin instalar			28017 \$USD

Tabla 12-4: Precios de los componentes en base a la capacidad de diseño.

12.5.2. Cálculo inversión fija e inversión fija total

El cálculo de la inversión fija y de la inversión fija total se hace a través del método de los factores. La instalación de los equipos se estima como el 5% del costo de los propios equipos, ya que será realizada por la Escuela Técnica N°2 “General Mariano Necochea” de Necochea y puede requerirse algún material extra. De esta manera:

$$I_{\text{Equipos Instalados}} = 1,05 \cdot 28.017 [\text{\$USD}] \cong 29418 [\text{\$USD}]$$

En cuanto a las plantas de servicios, se requieren escasas adiciones y las conexiones a realizar son entre unidades de servicios ya existentes.

En la Tabla 12-5, se muestra el cálculo de la inversión fija e inversión fija total y los valores asignados a cada factor involucrado

	Factor	\\$USD
<i>Equipos + instalación</i>		29.418
Inversión directa	f_i	
<i>Proceso mixto</i>	0,1	
<i>Control parcialmente automatizado</i>	0,05	
<i>Escasa adición a las plantas de servicio existentes</i>	0	
<i>Conexión entre unidades de proceso separadas</i>	0,05	
$\Sigma f_i = 0,2$		
Inversión indirecta	f_{ii}	
<i>Ingeniería inmediata</i>	0.05	
<i>Unidad comercial experimental</i>	0,15	
<i>Variaciones imprevistas</i>	0,2	
$\Sigma f_{ii} = 0,4$		
<i>Inversión fija</i> = $[I_E \cdot (1 + \Sigma f_i)] \cdot (1 + \Sigma f_{ii}) = 49.422 \\USD		
<i>Inversión fija total</i> = 49.422\\$USD		

Tabla 12-5: Cálculo de la inversión fija total.

12.5.3. Relevamiento de precios

Materia prima y envase

Escama de PET reciclado: Se toma como costo de escamas de PET al valor de venta que ofrece la misma ONG. Esto permite analizar la diferencia real que se logra obtener entre comercializar escamas de PET o pellets de PET. **Precio de 1000** $\left[\frac{\$}{kg}\right]$.

Bolsones: Los bolsones se compran a una empresa marplatense. Son bolsones Big Bag. **El costo unitario de los bolsones es 15.600** $\left[\frac{\$}{bolsón}\right]$. Considerando que cada bolsón se cargara con 700 kg de pellets aproximadamente, **se tiene un costo de envase por kilogramo de pellet de: 22,3** $\frac{\$}{kg}$.

La tabla 12-6 muestra un resumen de los precios de los insumos puestos en fábrica:

Insumo	Precio
Escama de PET	1000 $[\$/Kg]$
Bolsones	22,3 $[\$/Kg]$

Tabla 12-6: Precio insumos puestos en fábrica

Mano de obra directa

El costo de la mano de obra en el caso de un Taller Protegido de Producción (TPP), encuadrada en la Ley N° 26.816 – Régimen Federal de Empleo Protegido para Personas con Discapacidad, y no se calcula según el Convenio Colectivo de Trabajo de la UOYEP (Unión Obreros y Empleados Plásticos), dado que los participantes de este régimen no mantienen una relación laboral convencional.

Conforme lo establecido en el Artículo 26 de la Ley 26.816, los Talleres Protegidos de Producción reciben una serie de estímulos económicos a cargo del Estado nacional por un período inicial de veinticuatro (24) meses. Entre ellos se encuentran:

El pago del 100% de las contribuciones patronales respecto de los beneficiarios del TPP.

El pago del 100% de los honorarios del equipo multidisciplinario de apoyo.

El pago del 100% de la cotización del seguro de riesgos del trabajo.

Una asignación estímulo equivalente al 50% del sueldo básico mensual de la categoría 5ta. (Maestría y Servicios) del CCT 462/06, imputable a cuenta del sueldo que corresponda a cada beneficiario. El organismo responsable debe abonar la diferencia restante.

Tomando como referencia que el sueldo básico mensual de dicha categoría asciende actualmente a 1.125.144 \$/mes, la asignación estímulo cubierta por el Estado es del 50%, es decir, 562.572 \$/mes. Por lo tanto, la ONG como organismo responsable solo debe cubrir la diferencia restante: 562.572 \$/mes por trabajador.

En consecuencia, para contar con un operario asignado exclusivamente a la extrusora en una jornada laboral habitual de 8 horas diarias (lunes a viernes), el costo real para la ONG asciende a **562.572 \$/mes**, quedando el resto cubierto por el Estado a través del régimen de empleo protegido.

Servicios auxiliares

Electricidad: La ONG es un usuario de mediana demanda en baja tensión (T2BT). Se considera que la máquina funcionará en las horas pico. El precio del kWh para este tipo de instalaciones, según el cuadro tarifario de la Usina Popular Cooperativa (UPC) [30] es:

- Cargo variable por energía demandada en pico: $92,0905 \left[\frac{\$}{kWh} \right]$
- Cargo fijo: $32.060,7 \left[\frac{\$}{mes} \right]$
- Potencia demandada: $10.365,62 \left[\frac{\$}{kW \cdot mes} \right]$

Es importante aclarar que se conversó con miembros de la asociación, y solicitaron que para el análisis económico no se consideren posibles beneficios relacionados con el carácter de la organización. Es decir, que se aplique lo indicado en el cuadro tarifario de la UPC.

Gas: Ninguno de los equipos involucrados en el proceso de producción requieren de gas para su funcionamiento.

12.5.4. Estimación de costos de producción

A partir del relevamiento de precios se puede llegar a calcular los costos de los insumos y llevarlos a costos unitarios (costo del insumo por kilogramo producido) a partir de su rendimiento en el proceso productivo:

Escamas de PET: Ya se calculó que se necesitan $100 [kg/día]$ de escamas de PET para producir $98 [Kg/día]$, por lo que el costo unitario del kilogramo de escama de PET resulta $1020,4 \left[\frac{\$}{kg\ pellet} \right]$ -

Bolsones: el costo de los bolsones es de $22,3 \left[\frac{\$}{kg\ pellet} \right]$.

Consumo eléctrico: En base al costo del KWh y al consumo eléctrico por la capacidad de producción, se calculó el costo de la energía eléctrica por kilogramo de pellet de PET.

Considerando que se deberá solicitar un incremento en la potencia entregada por la UPC de 25 kW consecuentemente se tendrá un incremento en el costo fijo de potencia demandada de:

$$\text{Costo}_{\text{fijo potencia demandada}} = 33 \text{ kW} \cdot 10.365,62 \left[\frac{\$}{\text{kW} \cdot \text{mes}} \right]$$

$$\text{Costo}_{\text{fijo potencia demandada}} = 342.065,5 \left[\frac{\$}{\text{mes}} \right]$$

Los costos fijos del servicio resultan:

$$\text{Costo}_{\text{fijo total}} = 374.126,16 \left[\frac{\$}{\text{mes}} \right]$$

El costo variable se estima a partir de la cantidad de horas que se utiliza cada máquina, Tabla 12-2.

$$\text{Costo}_{\text{variable}} = E_{\text{diaria}} \cdot \text{Costo}_{\text{energía}}$$

$$\text{Costo}_{\text{variable}} = 162,8 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{día}} \right] \cdot 92,0905 \left[\frac{\$}{\text{kWh}} \right] = 14.992,33 \left[\frac{\$}{\text{día}} \right]$$

Produciendo 21 días al mes, se tiene:

$$\text{Costo}_{\text{variable}} = 14.992,33 \left[\frac{\$}{\text{día}} \right] \cdot 21 \left[\frac{\text{días}}{\text{mes}} \right] = 314.839 \left[\frac{\$}{\text{mes}} \right]$$

Por lo que se estima que una factura del servicio eléctrico mensual sea de:

$$\text{Costo}_{\text{fijo total}} + \text{Costo}_{\text{variable}} = 374.126,16 \left[\frac{\$}{\text{mes}} \right] + 314.839 \left[\frac{\$}{\text{mes}} \right]$$

$$\text{Costo}_{\text{fijo total}} + \text{Costo}_{\text{variable}} = 688.965,16 \left[\frac{\$}{\text{mes}} \right]$$

Para estimar los costos fijos mensuales, se realizaron los cálculos para la capacidad de diseño, cuando la extrusora opera al 100%. En ese caso, la producción de pellets de PET será de $98 \left[\frac{\text{kg pellets}}{\text{día}} \right]$ o $2058 \left[\frac{\text{kg pellets}}{\text{mes}} \right]$.

Con todos los datos, se calcula el costo del consumo eléctrico por kilogramo de producto:

$$\text{Costo}_{\text{electricidad}} = 688.965 \left[\frac{\$}{\text{mes}} \right] \cdot \frac{1}{2058 \left[\frac{\text{kg pellets}}{\text{mes}} \right]}$$

$$\text{Costo}_{\text{electricidad}} = 334,77 \left[\frac{\$}{\text{kg extruido}} \right]$$

En la Tabla 12-7 se muestra cómo se estimó cada uno de los costos fijos.

Costos fijos	USD/año
<i>Depreciación (*)</i>	$(1/n) * (IF-L)$
<i>Impuestos</i>	1,5% IF (este valor se estima entre el 1 y 2% de la IF. En este caso se tomó un valor medio).
<i>Seguros</i>	0,75% IF (este valor se estima entre el 0,5 y 1% de la IF. En este caso se tomó un valor medio).
<i>Financiación</i>	-
<i>Venta y distribución</i>	5% de ventas totales
<i>Dirección y administración</i>	-
<i>Investigación y Desarrollo</i>	0 (la empresa no desarrolla dichas tareas)

Tabla 12-7: Estimación de costos fijos.

Se utilizará el método de **depreciación por línea recta** para el cual los parámetros son:

$$Vida\ útil\ (n) = 10\ años$$

$$Inversión\ fija = 49.422\$USD$$

$$Valor\ residual\ al\ final\ de\ la\ vida\ útil\ (L) = 10\% \text{ de la inversión fija}$$

De esta forma, en la Tabla 12-8 se adjuntan cada uno de los costos fijos y el costo fijo total anual:

Costos fijos	USD/año
<i>Depreciación</i>	4.448
<i>Impuestos</i>	741,33
<i>Seguros</i>	370,66
<i>Financiación</i>	0
<i>Venta y distribución</i>	823,20
<i>Dirección y administración</i>	0
<i>Investigación y Desarrollo</i>	0
CFT	6.383,17

Tabla 12-8: Valores costos fijos.

Los costos variables dependen del nivel de producción. A continuación, se explicitan los métodos utilizados para el cálculo de cada uno de ellos:

Costos variables	Método de cálculo
<i>Materia prima</i>	Calculado en base al % de utilización
<i>Envases</i>	Calculado en base al % de utilización
<i>Mano de obra</i>	$\$HH \cdot \text{Horas de trabajo} \cdot \text{Cantidad de operarios}$
<i>Supervisión</i>	-
<i>Servicios, EE</i>	Determinado a partir del consumo de cada equipo y del precio unitario del servicio
<i>Mantenimiento</i>	$2\% I_f$, debido a que es un proceso simple
<i>Suministros</i>	$1\% I_f$
<i>Regalías y patentes</i>	-

Tabla 12-9: Método de cálculo de costos variables.

Con todos los valores calculados se presentan los costos totales anuales, en la Tabla 12-10.

	Operando a 100% de capacidad de diseño
Producción [kg/año]	23.520 kg/año
Materia Prima [\$USD/año]	18.461,54
Envases [\$USD/año]	403,29
Mano de Obra [\$USD/año]	5.192,97
Supervisión [\$USD/año]	-
Servicios, EE [\$USD/año]	6.056,84
Servicios, agua [\$USD/año]	-
Mantenimiento [\$USD/año]	987,24
Suministros [\$USD/año]	493,62
CVT [\$USD/año]	31.597,3
CFT [\$USD/año]	6.383,2
CT [\$USD/año]	37.980,5

Tabla 12-10: Costos anuales

La estructura de costos a la capacidad de diseño se visualiza en la Figura 12-3. Se observa que el mayor contribuyente al costo de producción es la materia prima, con un 49% del costo total. Si bien resulta llamativo a primera vista, ya que se trabaja con material recuperado.

Sin embargo, para realizar un análisis coherente se debe tener en cuenta que se está incorporando un nuevo proceso productivo sobre un producto que se comercializa actualmente en el mercado; las escamas. Se consensuó con la ONG que, para realizar un análisis certero sobre la rentabilidad del proyecto, debe estudiarse la ganancia sobre el proceso actual. Por lo tanto, se debe tener en cuenta el precio de venta actual de las escamas como un costo de materia prima.



Figura 12-3: Estructura de costos de producción a la capacidad de diseño.

12.5.5. Cálculo de capital de trabajo

Para determinar el capital de trabajo, se estimó como el equivalente a dos meses de costos de producción sin considerar la depreciación.

$$I_W = (\text{Costo de producción del año 1} - \text{depreciación}) \cdot \frac{2 \text{ meses}}{12 \text{ meses}} = 5.588,75 \text{ USD}$$

12.5.6. Cálculo inversión total

La inversión total se calculó sumando el capital de trabajo previamente calculado a la inversión fija.

$$I_T = I_{FT} + I_W = 49.422 \text{ USD} + 5.588 \text{ USD} = 55.010 \text{ USD}$$

12.5.7. Costo por kilogramo de pellet producido

El costo final del pellet producido resulta aproximadamente:

$$\text{Costo}_{\text{pellet reciclado}} = \frac{\left(37.971,93 \frac{\text{USD}}{\text{año}}\right)}{\left(23.520 \frac{\text{kg}}{\text{año}}\right)} = 1,61 \frac{\text{USD}}{\text{kg}} = 2.098,45 \left[\frac{\$}{\text{kg}}\right]$$

Comparando con el valor de mercado mencionado en la sección 12.2 (1.400 \$/kg), se puede apreciar el costo de producción es mayor al costo de venta de un producto similar. Esta diferencia de precios se vuelve incluso más notable si se compara con el precio del pellet de PET virgen que en el mercado actual ronda los 600 $\left[\frac{\$}{\text{kg}}\right]$, lo que justifica en gran medida que en la actualidad la industria del reciclado se encuentre en crisis.

12.5.8. Conclusión análisis económico

A partir del relevamiento de precios y estimación de costos asociados al reacondicionamiento y operación de la extrusora, se concluye que el proyecto de producción de pellets de PET reciclado resulta económicamente inviable. A continuación, se muestra un punteo de las causas principales que contribuyen con esta situación:

- Precios de productos similares:
 - El precio del pellet virgen es significativamente menor al costo de producción para la ONG (600\$/kg).
 - El pellet reciclado disponible actualmente en el mercado también se ofrece a un precio menor que el costo de producción estimado (1.400\$/kg).
- Escala de producción limitada:

- La extrusora relevada presenta una capacidad limitada, insuficiente para alcanzar la escala de producción necesaria que podría hacer económicamente sustentable el proceso.
- Sumado a que la pequeña producción implicaría ventas de un bolsón cada 7 días hábiles, una frecuencia de ventas insuficiente para resultar de interés para los posibles compradores.
- Restricciones operativas y horarias:
 - El hecho de que se trabaje en un taller protegido que funciona durante 8 horas los días hábiles, resulta insuficiente para la elaboración de pellets, ya que se requieren de 4 a 6 horas de secado previo comenzar con la extrusión. La posibilidad de automatizar parte del proceso, en particular el secado fue analizada y descartada, dado que la supervisión constante por parte del personal es condición necesaria en el taller.

Consecuentemente, por las condiciones operativas, y de mercado actual, aunque es técnicamente factible reacondicionar la extrusora y producir pellets, no es económicamente recomendable en el contexto en el que se plantea.

13. Posibles usos para las escamas de PET reciclado

Considerando que desde la ONG surgió la idea de reparar la extrusora y elaborar pellets de PET reciclado con el fin de agregar valor a lo producido, se buscaran alternativas al proyecto original.

13.1. Ladrillos ecológicos

Las escamas de PET reciclado pueden ser utilizadas para elaborar ladrillos ecológicos. Los ladrillos con plástico PET reciclado son un componente para muros exteriores e interiores elaborados con una mezcla de escamas de plástico PET, ligadas con cemento Portland y aditivos, que se moldea con una prensa manual.

Son ladrillos que en su fabricación resultan amigables con el ambiente, ya no solo por están constituidos por residuos plásticos reciclados, sino también porque su producción es diferente a la de los ladrillos tradicionales. El ladrillo macizo de tierra cocida, utilizado habitualmente en mamposterías, se elabora a partir de la extracción de la capa de tierra superficial fértil (humus), y su posterior cocción en grandes hornos a cielo abierto, produce

desertificación del suelo, contaminación atmosférica (por el humo generado), y tala de árboles para obtener la leña necesaria para el funcionamiento del horno [31].

Desde el punto de vista técnico el ladrillo de PET se destaca también en lo que respecta a su liviandad, capacidad de aislamiento térmico y buenas propiedades mecánicas. [31, 32] Sumado a los beneficios mencionados, un reciente estudio de la **Universidad Nacional del Nordeste (UNNE)** señala que el reúso o reciclado de un residuo sólido muy abundante como el PET, para la conformación de elementos constructivos modulares para la construcción de viviendas, representaría una opción tecnológica factible y ventajosa desde el punto de vista ambiental, por posibilitar una alternativa de destino final del material de residuo, en lugar de su vertido al ambiente. [32]

Beneficios de los bloques ecológicos de plástico

- Reducción de la contaminación ambiental: al utilizar residuos de plástico en la fabricación de los bloques, se reduce la cantidad de plástico que termina en los vertederos y se evita la producción de nuevos materiales.
- Ahorro de energía: la fabricación de los bloques ecológicos de plástico requiere menos energía que la producción de bloques de concreto convencionales.
- Mayor durabilidad: los bloques ecológicos de plástico son más resistentes y duraderos que los bloques tradicionales, lo que aumenta la vida útil de las construcciones.
- Mejor eficiencia térmica: los bloques ecológicos de plástico tienen una mejor capacidad de aislamiento térmico, lo que ayuda a reducir el consumo de energía para la climatización de los edificios.
- Contribución al desarrollo sostenible: al utilizar materiales reciclados y reducir el impacto ambiental de la construcción, los bloques ecológicos de plástico contribuyen al desarrollo sostenible y a la protección del medio ambiente. [22]



Figura 13-1: Ladrillo fabricado con adición de escamas de PET.

14. Conclusiones

El Proyecto Final de Grado tuvo como objetivo inicial estudiar el proceso de extrusión y pelletizado de tereftalato de polietileno (PET), para elaborar un plan de reacondicionamiento de la extrusora presente en el Taller Protegido Productivo de la ONG “Todo para Ellos”. A lo largo del trabajo se realizó un relevamiento íntegro del equipo, junto con un análisis del estado del arte de la extrusión de plásticos y las características particulares del proceso de PET reciclado.

Cuando se encontraba avanzado el estudio del estado del arte y el relevamiento del equipo, surgió la posibilidad de financiar el reacondicionamiento a través del Fondo de Innovación Tecnológica de Buenos Aires (FITBA). Este momento fue clave en el desarrollo del proyecto, ya que motivó la realización de un análisis económico exhaustivo que incluyó presupuesto de repuestos, componentes eléctricos, equipos periféricos, así como estimación de costos de producción por kilogramo de pellet de PET. Dicho análisis se complementó con consultas a actores importantes del sector del reciclado argentino, como la Cámara Argentina de la Industria del Reciclado de Plásticos (CAIRPLAST) y diversas empresas. A su vez, se validaron los datos estudiados con la propia ONG durante presentaciones de avances del trabajo.

Los resultados del estudio económico mostraron que, bajo las condiciones actuales de operación del Taller Protegido, en la escala proyectada y con la situación actual del mercado, el proyecto resulta económicamente inviable. El costo estimado de producción (1,62 \$USD/kg) supera ampliamente los precios de mercado tanto de los pellets reciclados como de los pellets vírgenes, imposibilitando la inserción del producto en el mercado, y la recuperación de la inversión inicial requerida (55.010 \$USD). Esta conclusión es análoga al estado actual del mercado e industria de reciclaje del plástico, relevada al momento de la cotización de los componentes.

A pesar de estos resultados, el trabajo permitió definir con precisión las acciones necesarias para el reacondicionamiento íntegro de la extrusora, incluyendo sustitución de motor, adquisición de una nueva camisa y tornillo apropiados para el proceso, la modernización del sistema de control y renovación del aparataje eléctrico. Toda la documentación técnica, planos esquemáticos, anexos con manuales de operación, mantenimiento y montaje y los presupuestos obtenidos quedan como base de referencia para una eventual reactivación del proyecto o para futuros desarrollos similares.

El proyecto permitió poner en práctica conceptos y conocimientos técnicos de mecánica, electricidad, automatización y análisis económicos adquiridos durante la carrera.

A su vez, contribuyó a fortalecer la vinculación entre la Universidad Nacional de Mar del Plata y una institución con impacto social.

Como cierre, se concluye que el reacondicionamiento de la extrusora es técnicamente factible, pero económicamente no recomendable en el contexto actual. El trabajo deja como principal aporte la recolección de información técnica específica para la extrusión de PET. Además, los planos mecánicos, eléctricos, instructivos de montaje, operación y seguridad pueden ser tomados como base para la elaboración de documentación concreta si se lleva a cabo el proyecto.

15. Trabajos a futuro

A partir de las conclusiones obtenidas en el presente trabajo, y considerando que en un futuro puede ser económicamente viable reacondicionar la extrusora, se plantean nuevos puntos a abordar si se quiere seguir con el proyecto:

En primer lugar, se debe realizar un nuevo análisis de viabilidad económica previo a comenzar con el proyecto. Esto incluye contactarse nuevamente con los distintos actores de la industria del reciclado, solicitar presupuestos y precios de los productos. También, analizar costos de energía, mano de obra, entre otros. Sobre esa base, se debe verificar si el proyecto es viable.

15.1. Alternativa 1 – Modificación de la extrusora original

Si el estudio de viabilidad indica que es rentable modificar la máquina actual, deben tenerse en cuenta los siguientes puntos a estudiar.

- Estudiar la viabilidad técnica y económica de utilización de secadora por luz infrarroja. Aplicar esta tecnología permitiría el ahorro de tiempo y energía en el secado de las escamas, el cual resulta uno de los principales factores que dificultan la implementación del proyecto.
- En caso de querer continuar con el reacondicionamiento de la extrusora presente en el taller, se debe:
 - Realizar el relevamiento integro de la instalación eléctrica presente en el Taller Protegido, para poder incorporar la nueva línea de producción. Y verificar que se cumpla con las normativas aplicables.
 - Completar el relevamiento y verificación mecánica del reductor, así como de cualquier parte que sea necesario modificar. Verificar los rodamientos, su vida

útil, las solicitaciones en función de la presión y las cargas del sistema, y si es necesario el reemplazo de estos.

- Realizar limpieza integral del cabezal y verificar su estado. Si se desea realizar un estudio detallado del punto de operación característico de la máquina, es importante determinar su construcción geométrica para mejorar el cálculo de la característica de caudal del sistema.
- Al momento de construir el tablero de control y potencia, realizar un estudio de selectividad de las protecciones utilizadas. Las protecciones colocadas en el plano están a modo referencial.
- Detallar la programación del variador de velocidad, incluyendo el control por potenciómetro de velocidad y la salida de alarmas.
- Realizar un análisis del filamento extruido. Estudiar propiedades mecánicas, y características físicas, para poder comercializarlo correctamente.

15.2. Alternativa 2 – Renovación total de la extrusora

Al día de la fecha reparar la máquina para procesar el flujo original de material resulta inviable, dado que el costo de producción resulta muy poco competitivo contra los productos ya comercializados en el mercado. Se decidió realizar a modo exploratorio un análisis de costos en función de máquinas con diferentes capacidades de producción, para determinar qué tamaño de maquinaria es necesario implementar para volver rentable el proyecto.

Aumentar la capacidad de producción exige reemplazar la extrusora, la deshumidificadora y la pelletizadora por equipos de mayor potencia. Estos cambios alteran de manera significativa el análisis de la inversión inicial y los costos realizado a lo largo del proyecto. En particular, las mayores potencias analizadas desplazarían al establecimiento desde la categoría tarifaria T2 a T3, lo que modifica tanto los costos de operación como el diseño eléctrico general. De ser necesario, debe tenerse en cuenta además una revisión de la instalación eléctrica del establecimiento para soportar el aumento de potencia.

Con el fin de ilustrar la tendencia general del costo de producción en función de la escala, se realizó un análisis exploratorio considerando combinaciones de maquinaria comercialmente disponibles para capacidades crecientes.

Dado que existen muchas variables involucradas se decidió simplificar el análisis con las siguientes consideraciones: Se mantuvieron constantes la jornada operativa, los costos laborales y los precios de la energía. Para cada configuración se seleccionaron equipos presentes en el mercado y se recalculó el costo de producción según la potencia instalada y el nuevo caudal de procesamiento. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

1. Producción diaria de 45 kg/h

- Extrusora mono husillo con tornillo de 55 mm de diámetro, 21 kW, 45 kg/h
- Deshumidificadora XD 160 U/120H, 14 kW, 50 kg/h
- Se conserva la pelletizadora que se analizó en el caso base, 2,2 kW, 100kg/h.

Recalculando los costos en base al cambio de consumo energético, y al incremento de la producción, se obtiene un costo final de \$1662/kg.

2. Producción diaria de 60 kg/h

- Extrusora mono husillo con tornillo de 65 mm de diámetro, 30 kW, 60 kg/h
- Deshumidificadora XD 200U/150H, 16 kW, 75 kg/h
- Se conserva la pelletizadora que se analizó en el caso base, 2,2 kW, 100 kg/h.

3. Producción diaria de 90 kg/h

- Extrusora mono husillo con tornillo de 75 mm de diámetro, 38 kW, 90 kg/h
- Deshumidificadora XD 300U/200H, 23 kW, 125 kg/h
- Se conserva la pelletizadora que se analizó en el caso base, 2,2 kW, 100 kg/h.

4. Producción diaria de 150 kg/h

- Extrusora mono husillo con tornillo de 85 mm de diámetro, 47 kW, 150 kg/h
- Deshumidificadora XD 400U/200H, 28 kW, 150 kg/h
- Pelletizadora 3 kW, 180 kg/h

A partir de estos valores se construyó la curva que relaciona el costo/kg con la capacidad de producción. Se observa que si bien el costo por kilogramo disminuye con el incremento de la producción, incluso las configuraciones de mayor capacidad continúan teniendo un costo mayor al del pellet reciclado disponible en el mercado (aproximadamente 1400 \$/kg). Para alcanzar valores competitivos sería necesario utilizar equipos que ya no guardan relación con la extrusora original del proyecto, que invalidan el análisis realizado hasta el momento.

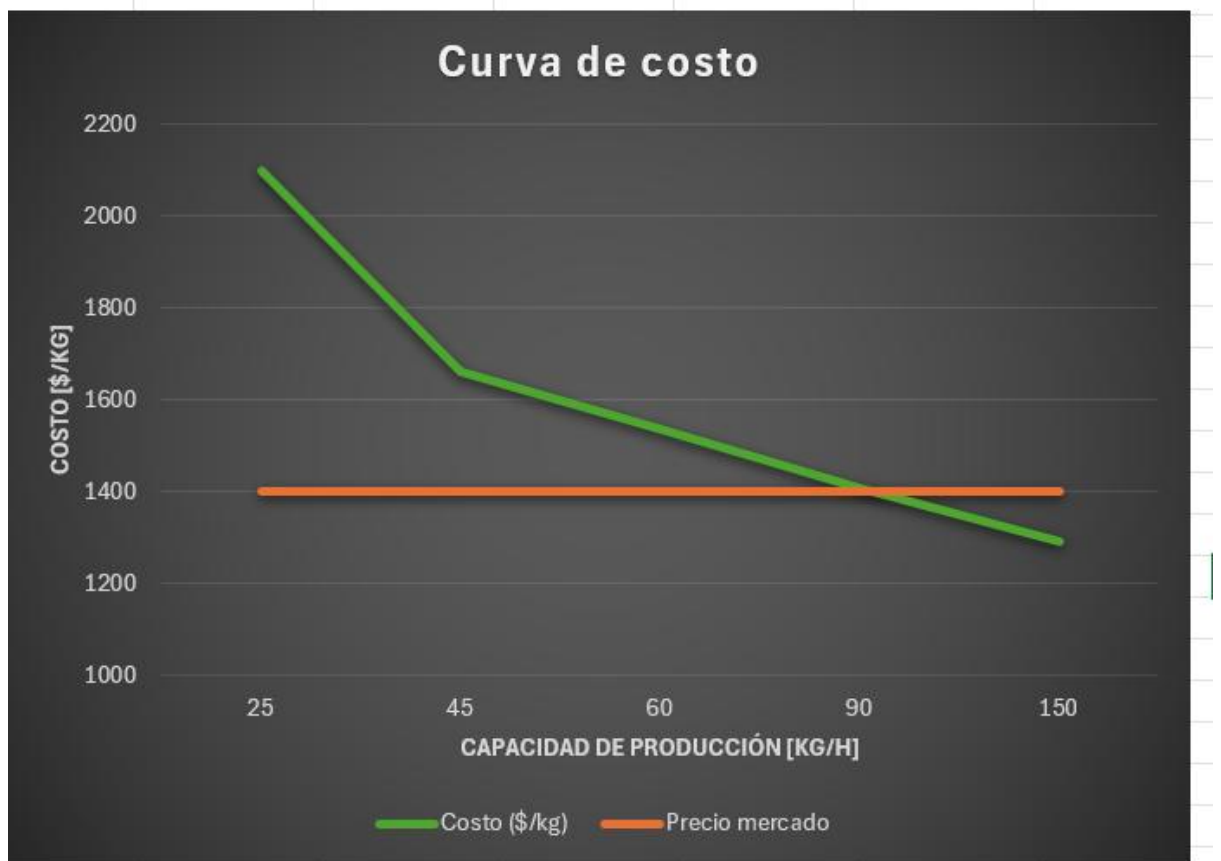


Figura 15-1: Curva de costos de producción según capacidad.

En conclusión, si bien el análisis exploratorio permite visualizar la tendencia general, el estudio detallado y la optimización de configuraciones alternativas quedan fuera del alcance de este trabajo. Podrían abordarse en un proyecto futuro que contemple explícitamente la adquisición o rediseño integral de la máquina.

16. Bibliografía

- [1] M. P. Groover, Fundamentos de manufactura moderna, México, D.F.: McGraw-Hill Interamericana, 2007.
- [2] D. Rosato, Extruding Plastics. A practical processing handbook, Chatham, Massachusetts: Springe-Science+Business Media, B.V., 1998.
- [3] K. Houssini, J. Li and Q. Tan, "Complexities of the global plastics supply chain revealed in a trade-linked material flow analysis," *Nature*, vol. Communications Earth & Environment, 2025.
- [4] T. M. Joseph, S. Azat, Z. Ahmadi, O. M. Jazani, A. Esmaeili, E. Kianfar, J. Haponiuk y S. Thomas, «Polyethylene terephthalate (PET) recycling: A review,» *Science Direct*, vol. Case Studies in Enviromental Engineering, nº 9, 2024.
- [5] M. Parzanese, «PET reciclado postconsumo grado alimentario,» Alimentos Argentinos - Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca.
- [6] E. Bezeraj, S. Debrie, F. J. Arraez, P. Reyes, P. H. M. Van Steenberge, D. R. D'hooge y M. Edeleva, «State-of-the-art of industrial PET mechanical recycling: technologies, impact of contamination and guidelines for decision-making,» *RSC Sustainability*, vol. 3, nº 5, pp. 1996-2047, 2025.
- [7] Cámara de la Industria de Plásticos Reciclados, «Economía Circular. Se desplomaron los precios de los materiales y el reciclaje entró en una grave crisis.,» *Reciclado y Economía Circular*, vol. Julio, nº 147, 2025.
- [8] *Decreto 1/2025. Residuos no peligrosos valorizados*, 2 de enero de 2025..
- [9] ECOPLAS, «ECOPLAS - Página Principal,» ECOPLAS, 2024. [En línea]. Available: <https://ecoplas.org.ar/>. [Último acceso: 24 05 2025].
- [10] J. Goff y T. Whelan, The Dynisco Extrusion Process Handbook. 2nd Edition, Dynisco,] 1988.
- [11] Z. Tadmor and C. Gogos, Principles of Polymer Processing, Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [12] ST Automatismo Industrial, «Información Técnica PET,» ST, Buenos Aires, 2016.
-]

-
- [13 J. Frankland, «Plastics Technology,» 01 04 2019. [En línea]. Available:] <https://www.ptonline.com/articles/why-barrel-temperatures-have-a-small-effect-on-melt-temperature->. [Último acceso: 08 06 2025].
- [14 «USEON - PET Recycling,» USEON - Plastic Extrusion Machine Manufacturer, 2024. [En] línea]. Available: <https://www.useon.com/pet-recycling/>. [Último acceso: 8 9 2025].
- [15 C. Rauwendaal, Polymer Extrusion. 5th Edition, Auburn, California: Hansen Publications,] 2013.
- [16 H. Giles, J. Wagner y E. Mount, Extrusion: The Definitive Processing Guide and] Handbook., Norwich, NY: William Andrew Publishing, 2005.
- [17 «Metalúrgica Golche S.R.L.,» 2025. [En línea]. Available: <https://golche.com.ar/>.]
- [18 Cowell Extrusion, «PET Recycling Line: Enhancing Sustainability with Advanced] Extrusion Technology,» Cowell Extrusion, 30 December 2024. [En línea]. Available: <https://www.cowellextrusion.com/pet-recycling-line-enhancing-sustainability-with-advanced-extrusion-technology/>. [Último acceso: 3 September 2025].
- [19 M. Spalding y J. Frankland, «How Polymer Melts in Single-Screw Extruders,» Plastics] Technology, 23 February 2024. [En línea]. Available: <https://www.ptonline.com/articles/how-polymer-melts-in-single-screw-extruders>. [Último acceso: 10 July 2025].
- [20 I. R. C. G. L. M. C. MC. Adrián Méndez Prieto, «Plastics Technology MÉXICO,» 11 04] 2023. [En línea]. Available: <https://www.pt-mexico.com/articulos/parmetros-clave-a-considerar-durante-el-procesamiento-del-pet>. [Último acceso: 08 06 2025].
- [21 A. Hannemann, «PET Recycling - MRS Extruder,» Gneuss, 10 2011. [En línea].] Available: https://gneuss.com/wp-content/uploads/2019/01/MRS_B2B_Recycling_Kunststoffe_10.11_eng.pdf. [Último acceso: 9 9 2025].
- [22 Poli Santafe, «Bloques ecológicos de plástico: una solución sostenible para la] construcción,» Poli Santafe, [En línea]. Available: <https://polisantafe.com.ar/bloque-ecologico-de-plastico/>. [Último acceso: 31 08 2025].
- [23 M. Bustos Seibert, G. A. Mazzei Capote, M. Gruber, W. Volk y T. A. Osswald,] «Manufacturing of a PET Filament from Recycled Material for for Material Extrusion (MEX),» *Recycling - MDPI*, vol. 7, nº 69, 2022.
-

-
- [24 «Todo para ellos. Asociación de padres y amigos del discapacitado,» 2025. [En línea].
] Available: <https://www.todoparaellos.org/>.
- [25 V. Savgorodny, G. Gili y L. Uralde, Transformación de Plásticos, Barcelona: Editorial
] Gustavo Gili, S.A., 1978.
- [26 D. G. Baird y D. I. Collias, Polymer Processing. Principles and Design, Hoboken: John
] Wiley & Sons, 2014.
- [27 J. P. Cruces y G. C. Campos Marego, «Optimización del proceso de reciclado de PET a
] partir del uso de un método de secado no convencional,» Facultad de Ingeniería,
Universidad Nacional de Mar del Plata, Mar del Plata, 2022.
- [28 N. N. Njobet, Energy Analysis of The Extrusion of Plastics, Arcada, 2012.
]
- [29 Agromarc, «Agromarc,» [En línea]. Available:
] <https://www.agromarc.com.ar/producto/bolson-u-panel/>. [Último acceso: 19 08 2025].
- [30 OCEBA, «OCEBA,» 08 2025. [En línea]. Available:
] https://oceba.gba.gov.ar/nueva_web/s.php?i=17. [Último acceso: 20 08 2025].
- [31 C. E. d. I. V. Económica, «CEVE-Ladrillos y bloques de botellas plasticas,» Centro
] Experimental de la Vivienda Económica, [En línea]. Available:
<https://ceve.org.ar/ladrillos-bloques/>. [Último acceso: 30 Agosto 2022].
- [32 Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad Nacional del Nordeste (UNNE),
] «Ladrillos resistentes a partir de residuos plasticos,» Universidad Nacional del Nordeste
(UNNE), 25 08 2025. [En línea]. Available: <https://www.arq.unne.edu.ar/ladrillos-resistentes-a-partir-de-residuos-plasticos/>. [Último acceso: 30 08 2025].
- [33 SRT, «InfoLeg,» SRT, 07 03 2006. [En línea]. Available:
] <https://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/110000-114999/114554/norma.htm>. [Último acceso: 08 06 2025].
- [34 H. Brito, C. Flores y K. Salazar Llangari, Diseño y construcción de un extrusor tipo tornillo
] para la obtención de pellets plástico a partir de botellas recicladas, Guayaquil, Ecuador:
XXXVI Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 2018.
- [35 I. R. C. G. L. M. C. MC. Adrián Méndez Prieto, «Procesamiento de PET: inyección
] soplado, extrusión de película y fibra,» *Plastics Technology Mexico*, 2023.
- [36 UNION OBREROS Y EMPLEADOS PLASTICOS, «ESCALA SALARIAL - CONVENIO
] COLECTIVO DE TRABAJO N°797/22,» UOYEP, [En línea]. Available:
<https://uoyepweb.org.ar/escala-salarial/>. [Último acceso: 31 08 2025].
-

[37 M. Forrest, Recycling of Polyethylene Thereftalate, Shawbury: Smithers Rapr, 2016.

]

[38 «Acero Böhler V-820,» Voestalpine, 8 2024. [En línea]. Available:

] <https://www.voestalpine.com/highperformancemetals/argentina/app/uploads/sites/264/2024/08/V820.pdf>. [Último acceso: 11 9 2025].

Anexos

Anexo I – Propiedades termofísicas de los polímeros [11]

TABLE A.2 Thermophysical Properties of Semi-crystalline Thermoplastic Polymers

	Specific Heat [cal/g/°C]		Heat of Fusion [J/g]	Glass Transition [°C]	Melting Point [°C]	Crystalli- zation Temp. [°C]	Solid Density at 25°C [g/cm ³]	Melt Density Temp [°C]	Melt Density [g/cm ³]		Thermal Conductivity [W/m/ K]		Thermal Diffusivity 10 ⁻⁴ [cm ² /s]	
	Solid at 25°C	Melt (average)							at 0 psi	at 10 ⁴ psi	Solid	Melt	Solid	Melt
LCP (Xydar)	0.221	0.405	0.39		421–432	357–330	1.68	340	1.590	1.680	0.167	0.233	10.8	8.7
LCP (Vectra)	0.252	0.446	0.48	110	276–286	236	1.408	288	1.320	1.378	0.190	0.260	12.8	10.6
Nylon 6	0.649	0.919	11.6	70	220	182	1.130	240	0.958	1.010	0.317	0.341	10.3	9.3
Nylon 66	0.339	0.638	10.6	48	265	231	1.192	280	1.023	1.090	0.215	0.268	12.7	9.8
PBT	0.286	0.489	10	50	224–236	175	1.292	260	1.147	1.218	0.196	0.240	12.7	10.2
PB-1	0.398	0.628	7.5		118–128	79–58	0.915	160	0.813	0.877				
HDPE	0.453	0.631	39	–120	135	115	0.941–0.968	200	0.767	0.816	0.373	0.324	20.7	16.0
LDPE	0.540	0.600	18.7–23.7	–25	112–114	90–88	0.91–0.92	200	0.763	0.830	0.272	0.220	13.1	11.5
LLDPE	0.450	0.479	23.7		135	86	0.922–0.94	150	0.792	0.866	0.368	0.243	20.8	15.3
PEEK	0.241	0.503	8.5	150	350	310	1.453	370	1.228	1.389	0.251	0.197	17.1	7.6
PET	0.284	0.492	13.7	70	243–248	159	1.308	270	1.211	1.298	0.146	0.289	9.4	11.6
PMP	0.432	0.731	11.8	29	240	164	0.835	285	0.710	0.823	0.285	0.310	18.8	14.2
POM	0.337	0.526	32.6	–80	168	142	1.385	180	1.195	1.277	0.308	0.291	15.7	11.0
copolymer														
PP	0.421	0.669	21.6	–10	167	101	0.910	210	0.764	0.833	0.298	0.234	18.6	10.9
PPS (40% Filled)	0.227	0.420	10.8	91	285	232	1.653	300	1.550	1.627	0.215	0.289	13.7	10.6

Anexo II – Seguridad

La **Resolución 97/2006** [33] de la Superintendencia de Riesgos del Trabajo establece que solo podrán usarse en el país máquinas de moldeo por inyección de plásticos y caucho que cumplan con los criterios mínimos de seguridad e higiene. Aunque no se trata de una resolución que aplique a extrusoras, las similitudes con las máquinas de moldeo por inyección permiten aplicar los requisitos de seguridad e higiene.

Como se menciona en la resolución, el equipo debe contar con resguardos, dispositivos de protección y sistemas de parada. Estos sistemas y elementos fueron proyectados en el reacondicionamiento, y se mencionaron en las secciones previas.

Desde el arranque hasta el apagado, pueden ocurrir situaciones peligrosas. Si se cuenta con operadores debidamente capacitados, es posible disminuir los accidentes e incidentes. [2]

A continuación, se presentan algunos de los principales riesgos.

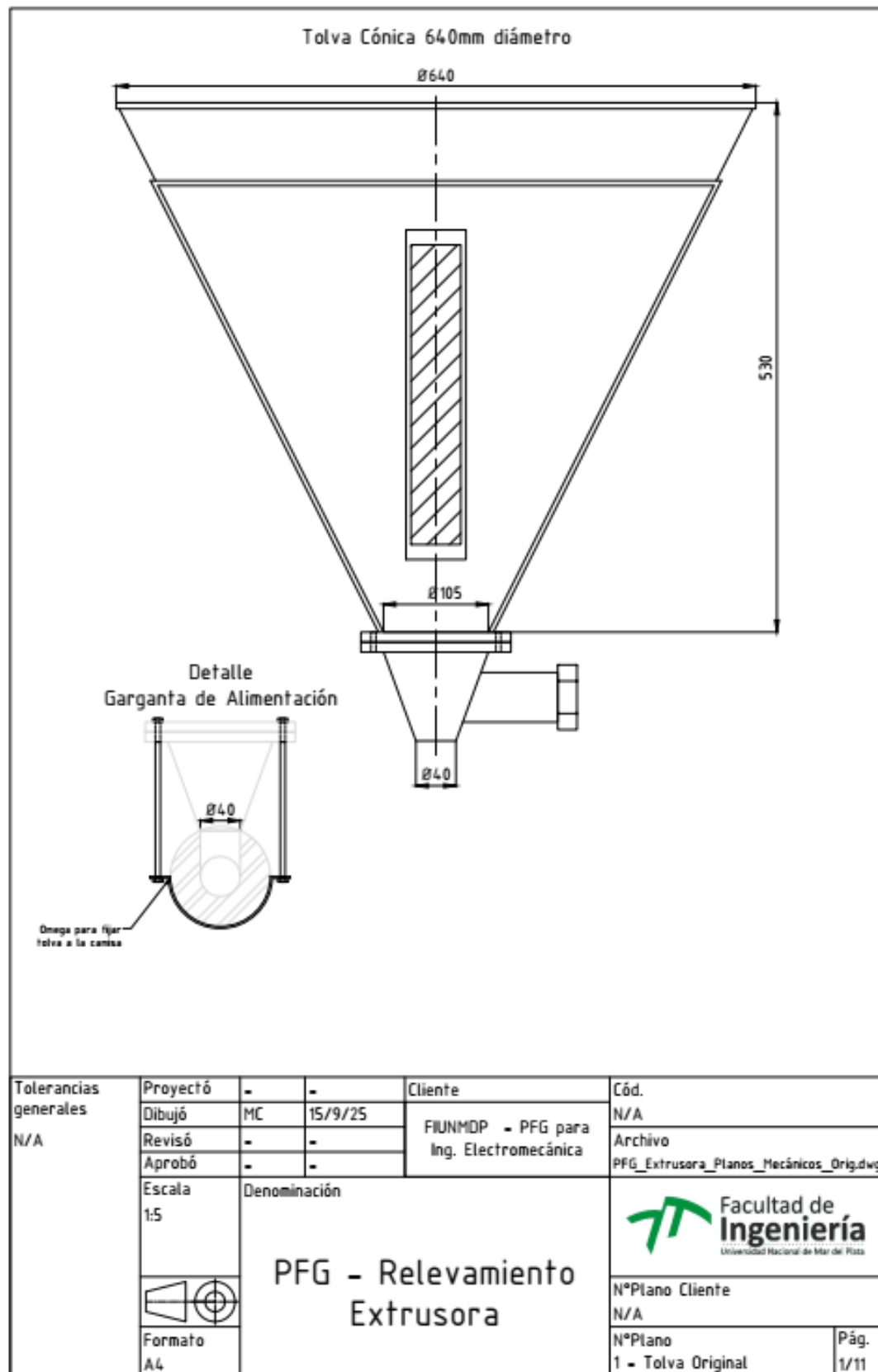
Peligro potencial	Verificaciones de prácticas seguras
Cambio de elementos/revisión	
Elementos calientes (herramientas y polímero calientes)	Usar guantes y zapatos de seguridad aptos para el trabajo con alta temperatura.
Descarga eléctrica (pines del extrusor, preparación)	Seguir los procedimientos de bloqueo eléctrico al trabajar sobre la máquina.
Resbalones/caídas (materiales en el suelo)	Verificar el orden y limpieza. Verificar si hay fugas.
Puesta en marcha	
Proyectiles y quemaduras (extrusores)	Verificar temperaturas por zonas. Utilizar elementos de protección personal, en particular protección ocular, guantes y zapatos para trabajo con altas temperaturas.
Operación	
Puntos de pellizco	Mantener las manos alejadas de las piezas en movimiento.
Quemaduras (filamento caliente)	Usar guantes y herramientas adecuadas para manipular lámina caliente.

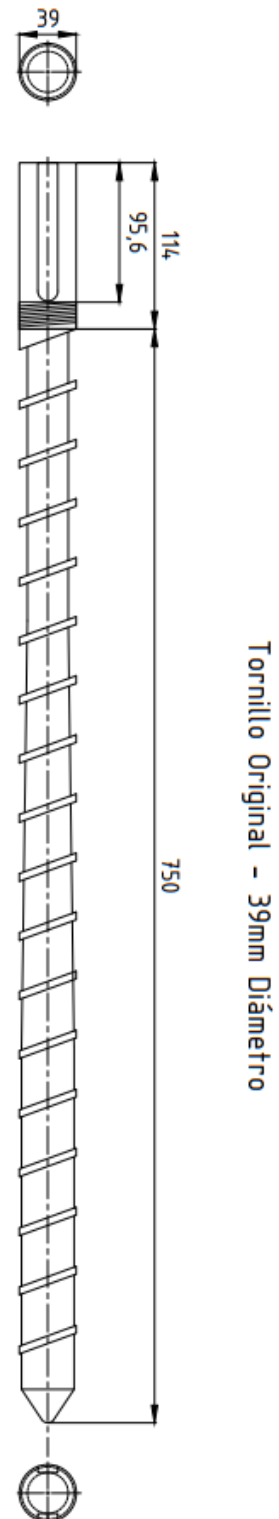
Quemaduras (elementos calientes)	Evitar contacto con partes calientes. Usar guantes y zapatos de seguridad para trabajo con altas temperaturas.
Riesgo de atrapamiento	Mantener protecciones siempre colocadas. Usar guantes y calzado de seguridad
Desarme de “arcos” o bloqueos en la alimentación de la tolva Posible riesgo para el operario y la maquina si la herramienta utilizada entra en contacto con el tornillo en movimiento	No apoyarse sobre la tolva. Usar solamente herramientas plásticas, nunca metálicas.
Enhebrar Riesgo de atrapamiento	Realizar la operación con suma precaución. En caso de que corte uno de los filamentos durante la extrusión, para simplificar utilice un extruido restante al que se pueda unir el extruido que se cortó.
Resbalones/caídas (por presencia de materiales en el suelo)	Verificar el orden y limpieza. Verificar si hay fugas.

Otras prácticas seguras que se pueden mencionar son [2]:

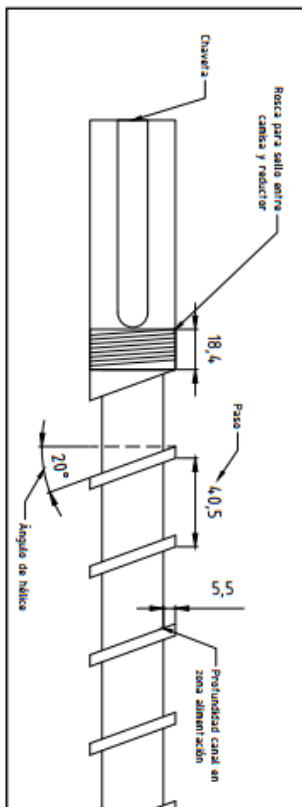
- Capacitar al personal: Corroborar que este familiarizado con las practicas seguras, el uso de elementos de protección personal y con el manual operativo.
- Evitar la presencia de más personal del requerido alrededor de la línea de operación.
- Corroborar que todos los controladores de temperatura se encuentren bien configurados.
- Confirmar que se encuentre el equipo apto para avanzar en el proceso en cada paso. Por ejemplo, verificar la temperatura adecuada para finalizar el precalentamiento y comenzar la extrusión.
- Utilizar las herramientas adecuadas, guantes protectores, zapatos de seguridad y protector facial.

Anexo III – Relevamiento componentes mecánicos originales

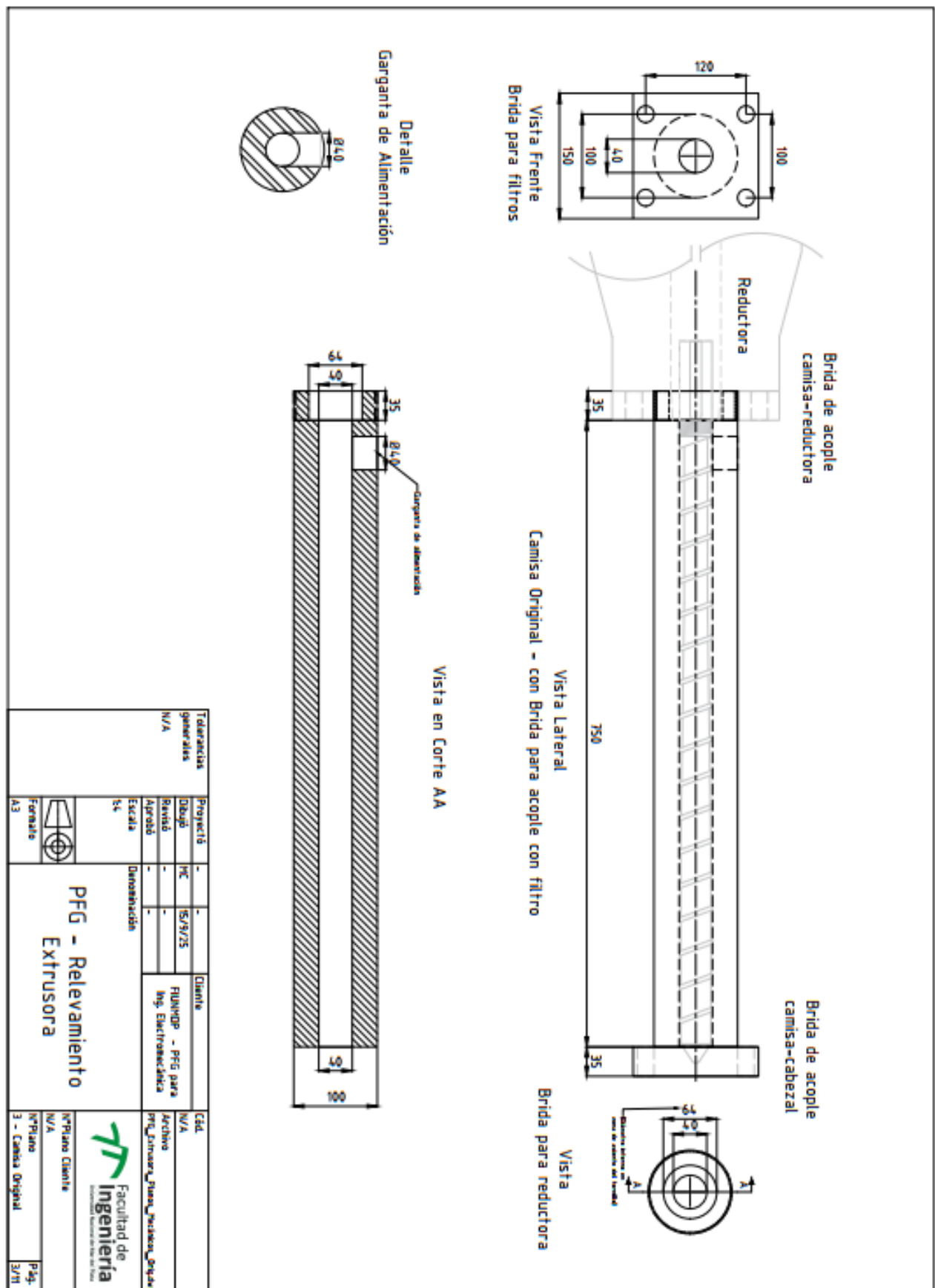




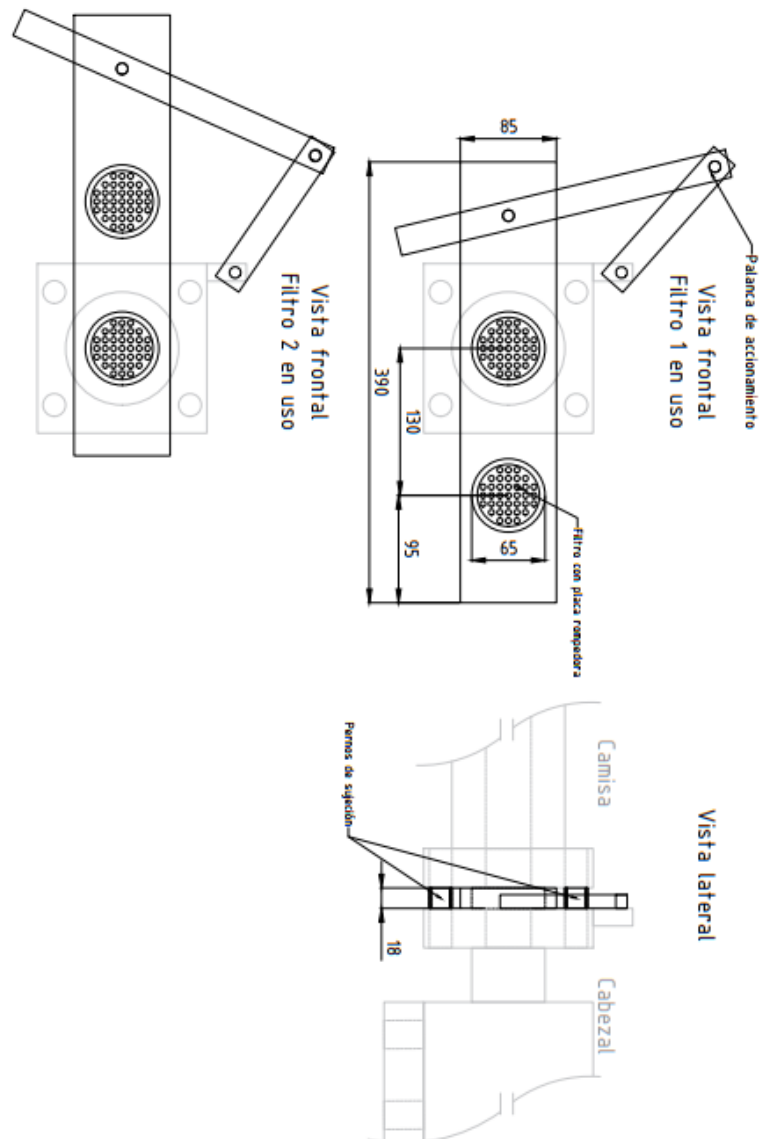
Detalle parámetros tornillos - Escala 1:2



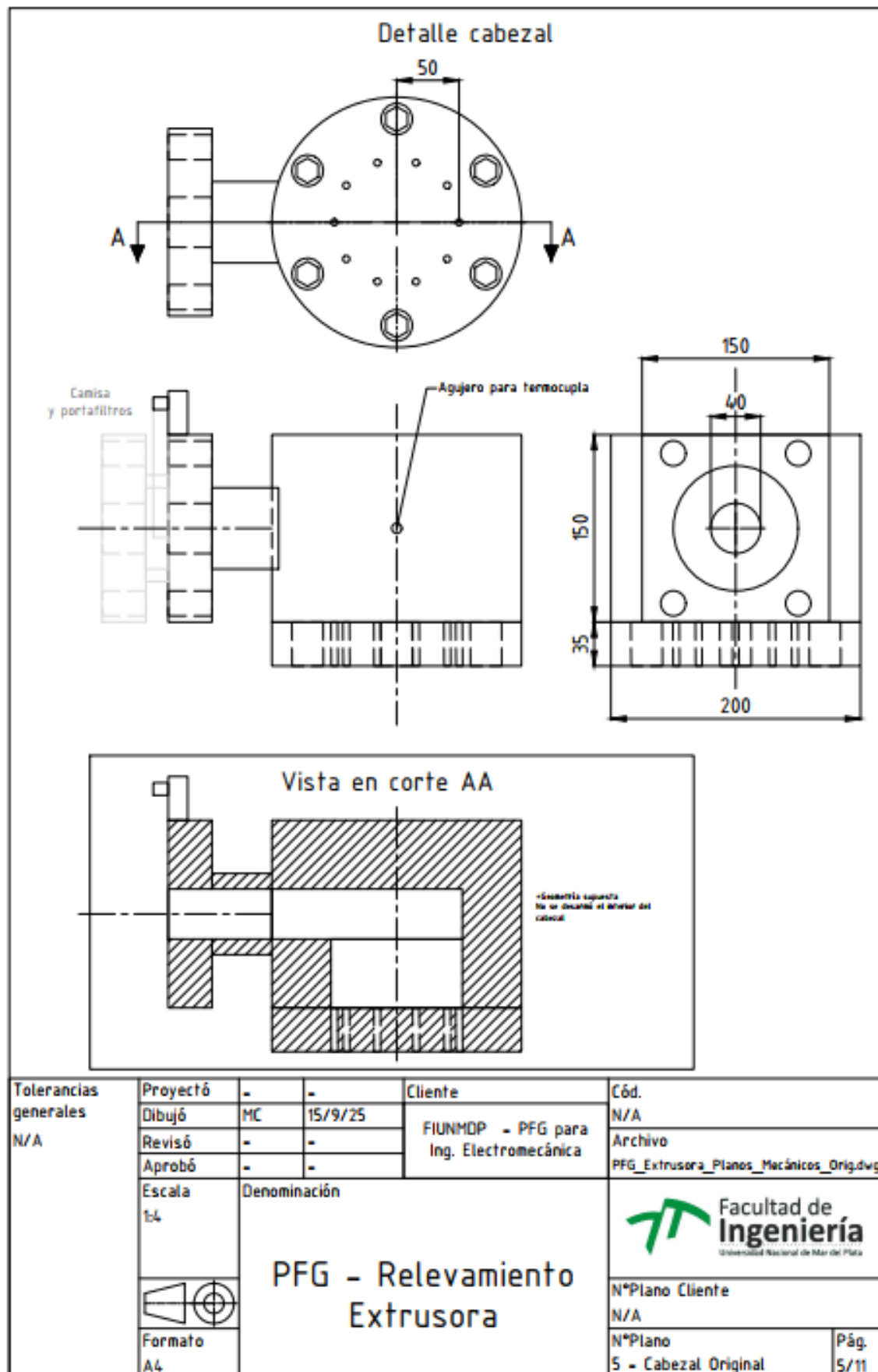
Tolerancias generales	Proyectó	-	-	Cliente	Cód.
N/A	Dibujó	MC	15/9/25	FLUINOP - PFG para Ing. Electromecánica	N/A
	Revisó	-	-		Archivo
	Aprobó	-	-		PFG_Extras2_Prima_Marcas_Org.docx
Escala	Denominación				
1:3	PFG - Relevamiento Extrusora				
Formato					
A3	N°Plano Cliente N/A N°Plano N/A 2 - Tornillo Original Pág. 2/11				

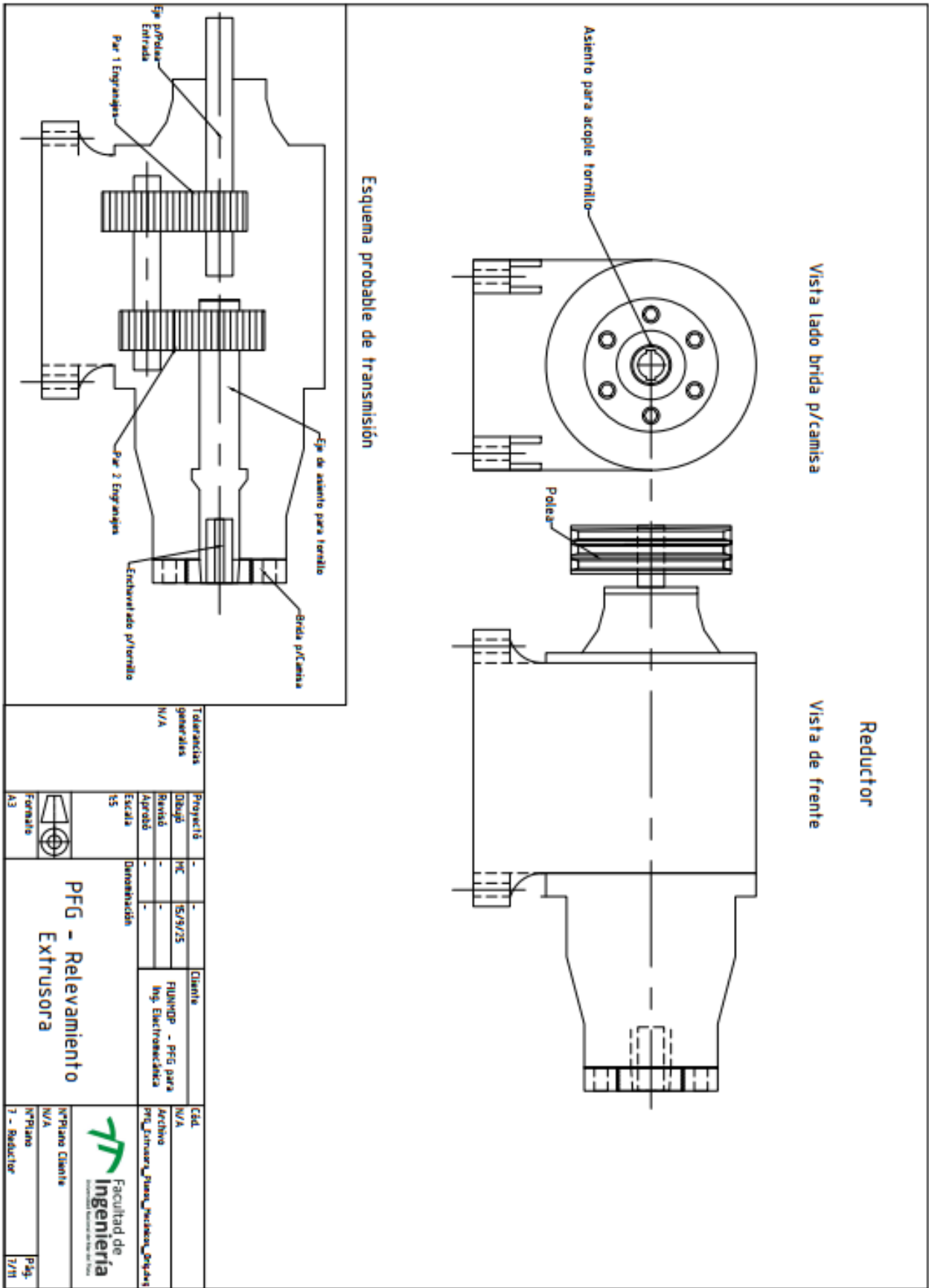


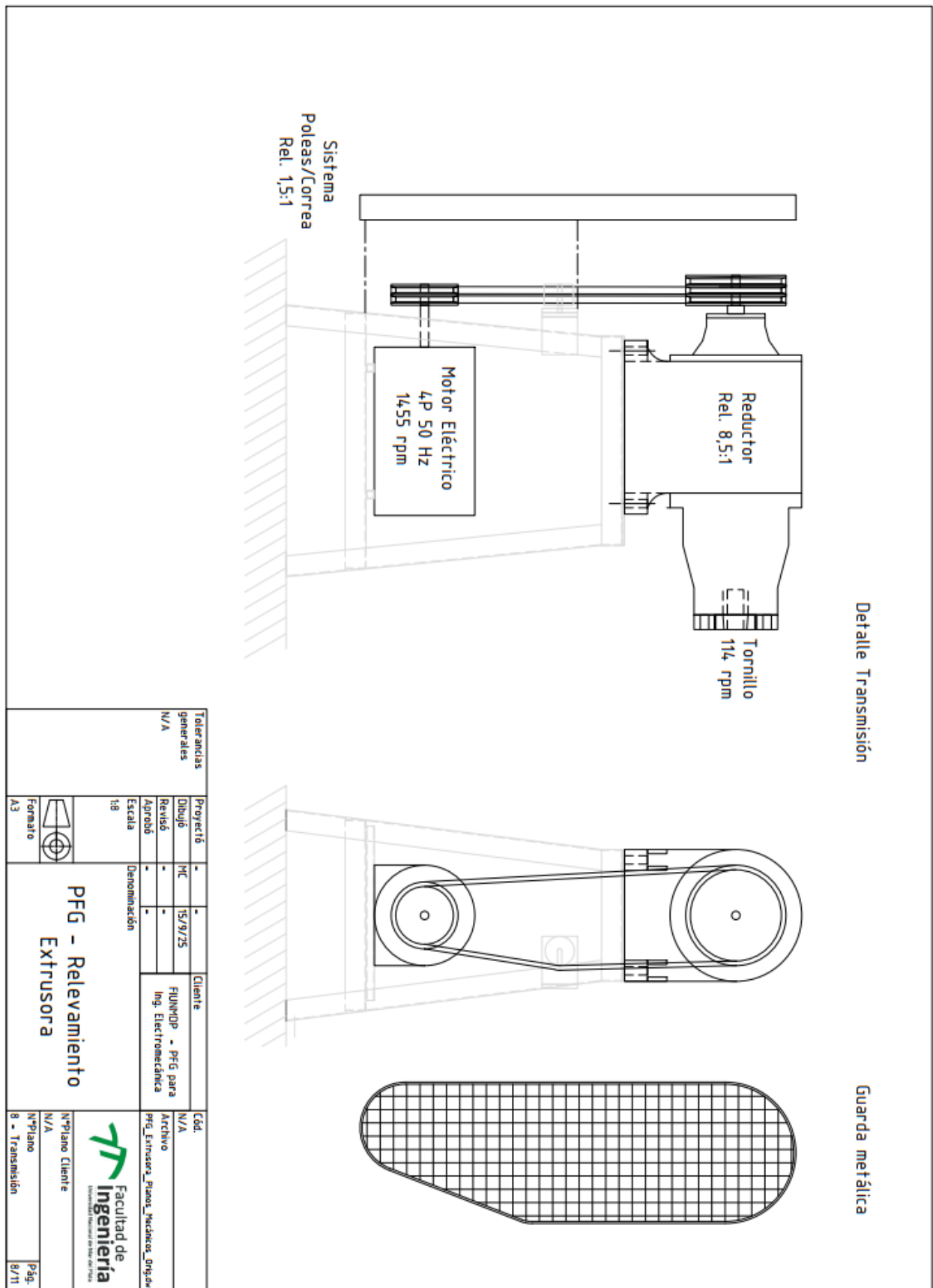
Filtros y Cambiador de Filtros

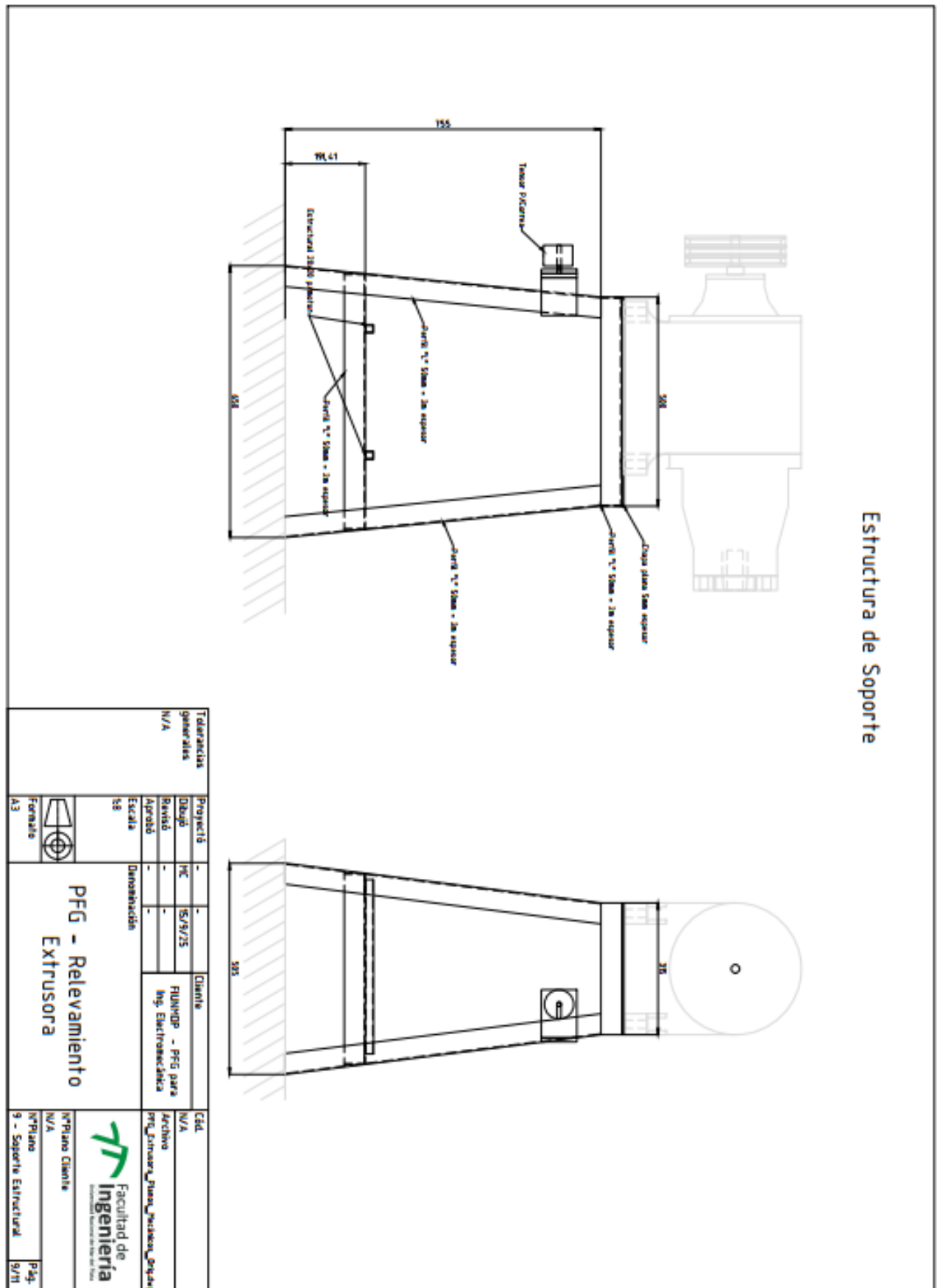


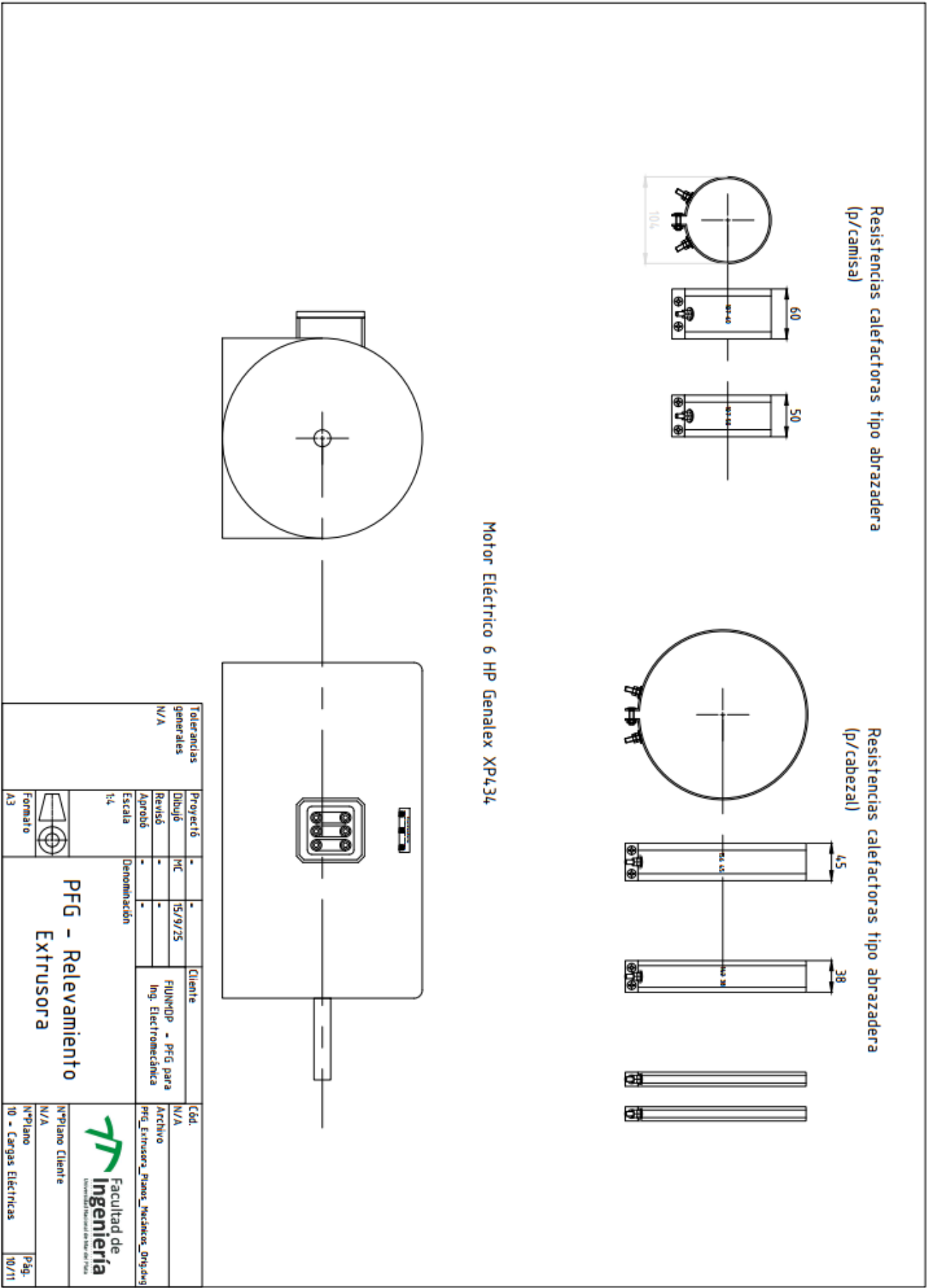
Tolerancias generales N/A	Proyecto	-	-	Cliente	Cód.	N/A
	Dibujó	MC	15/9/25	FUNDOP - PFG para Ing. Electromecánica	Archivo	PFG_Extusora_Planos_Mechatcica_09-2019
	Revisó	-	-			
	Aprobó	-	-			
Escala 1:4	Denominación			 Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de San Luis		
PFG - Relevamiento						
Extrusora						
Formato A3	N° Plano Cliente			N° Plano	Pág.	4 - Cambiadores
	N/A			N/A	L/11	

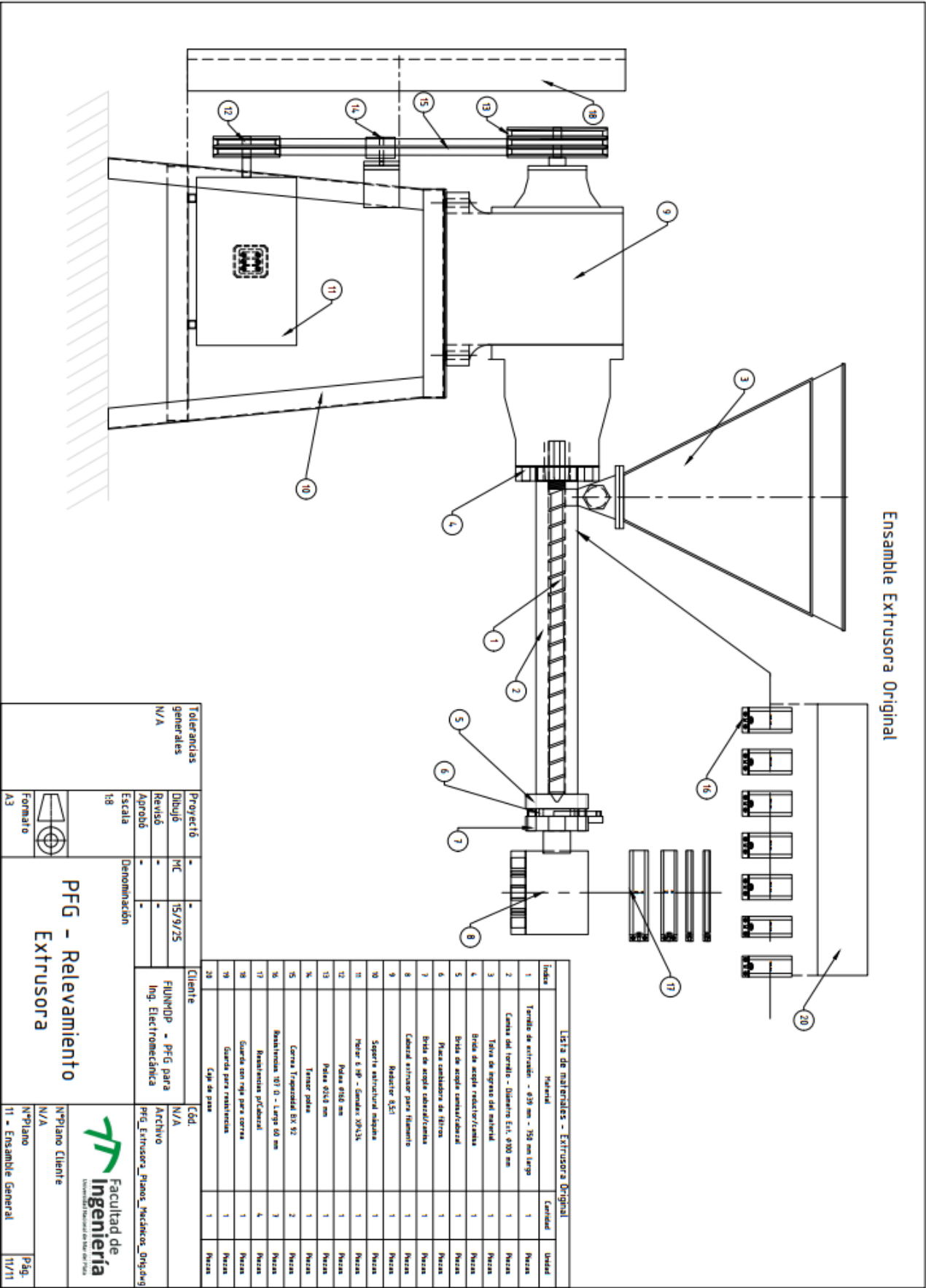




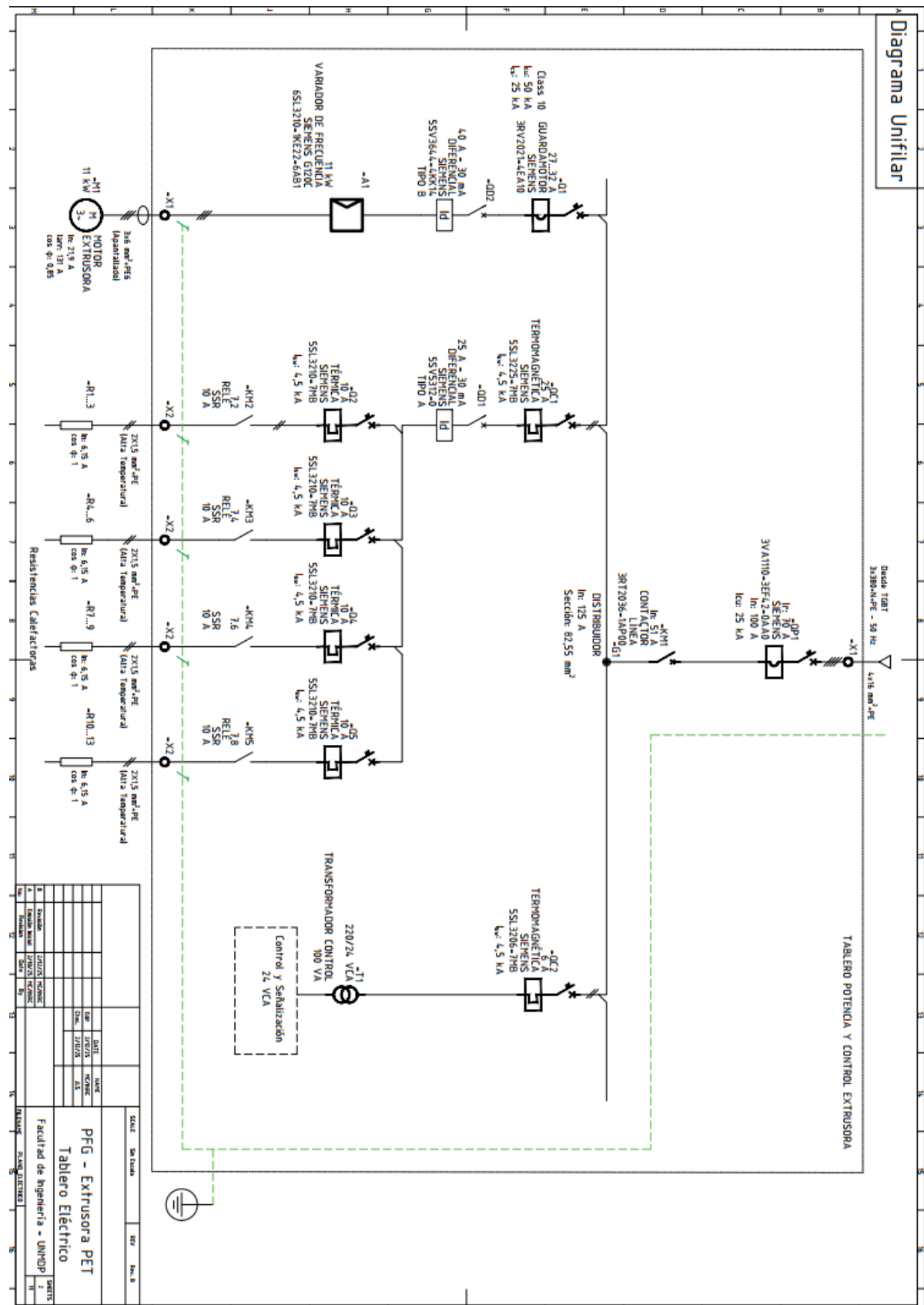


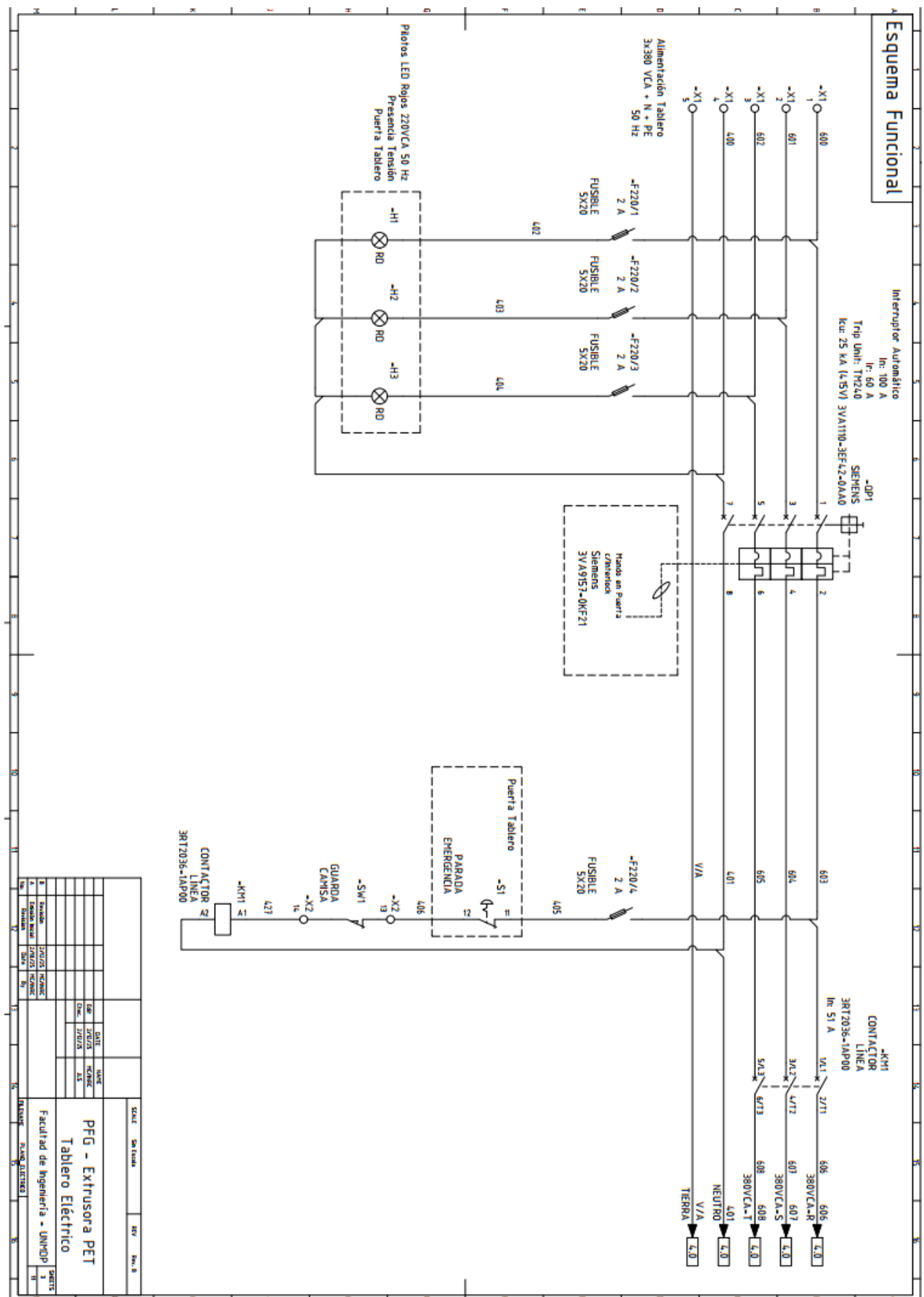


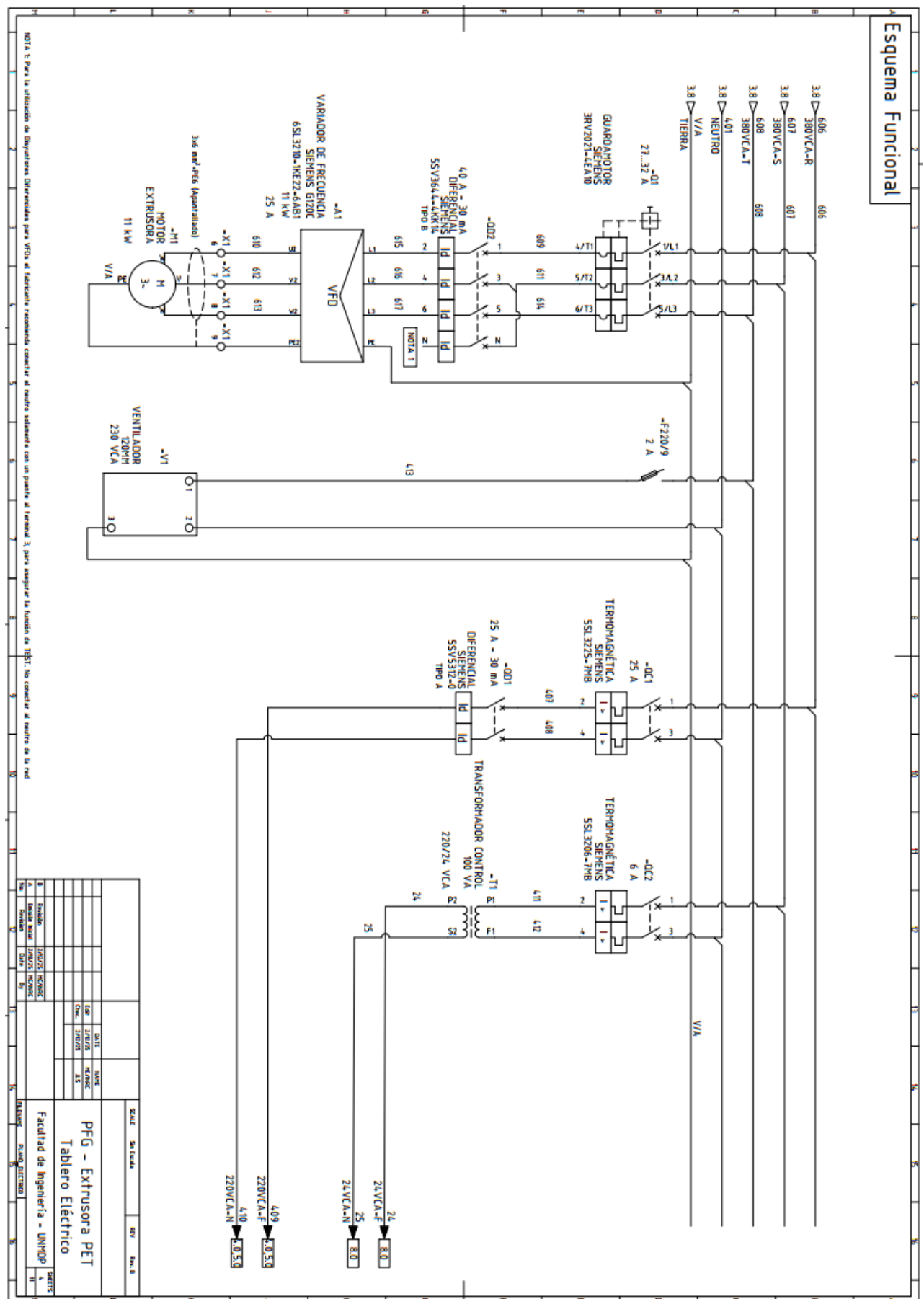


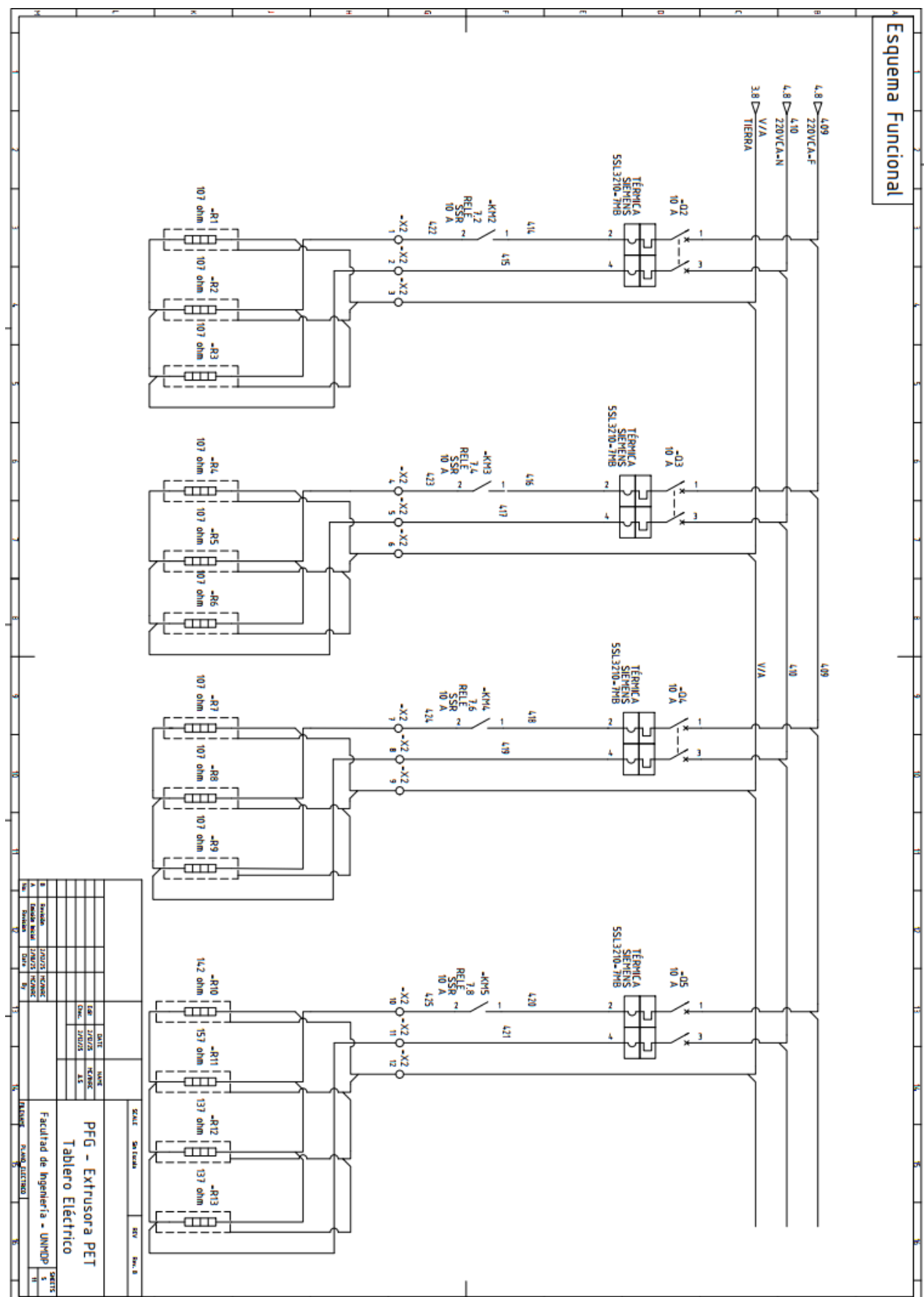


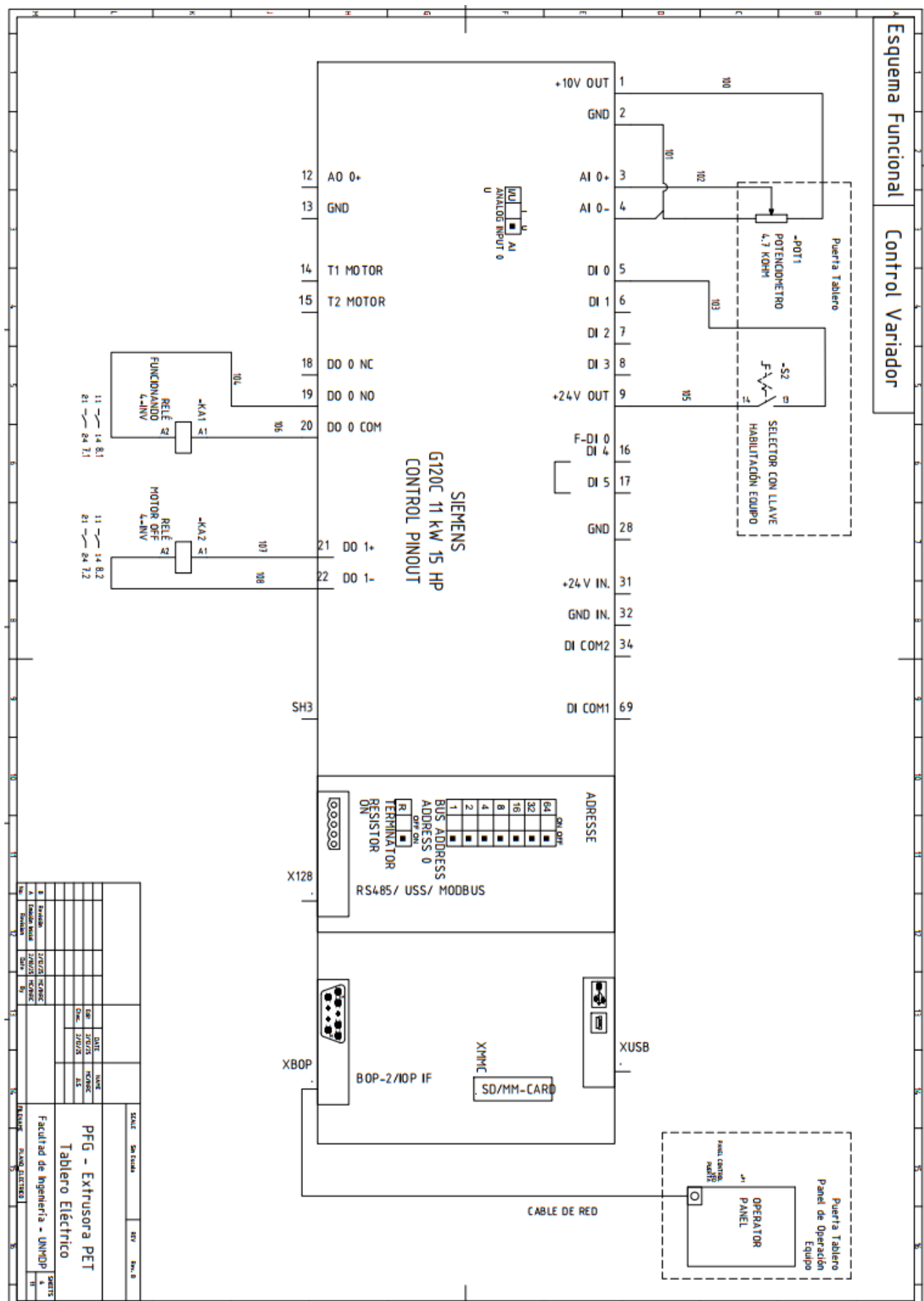
Anexo V – Esquemas Eléctricos

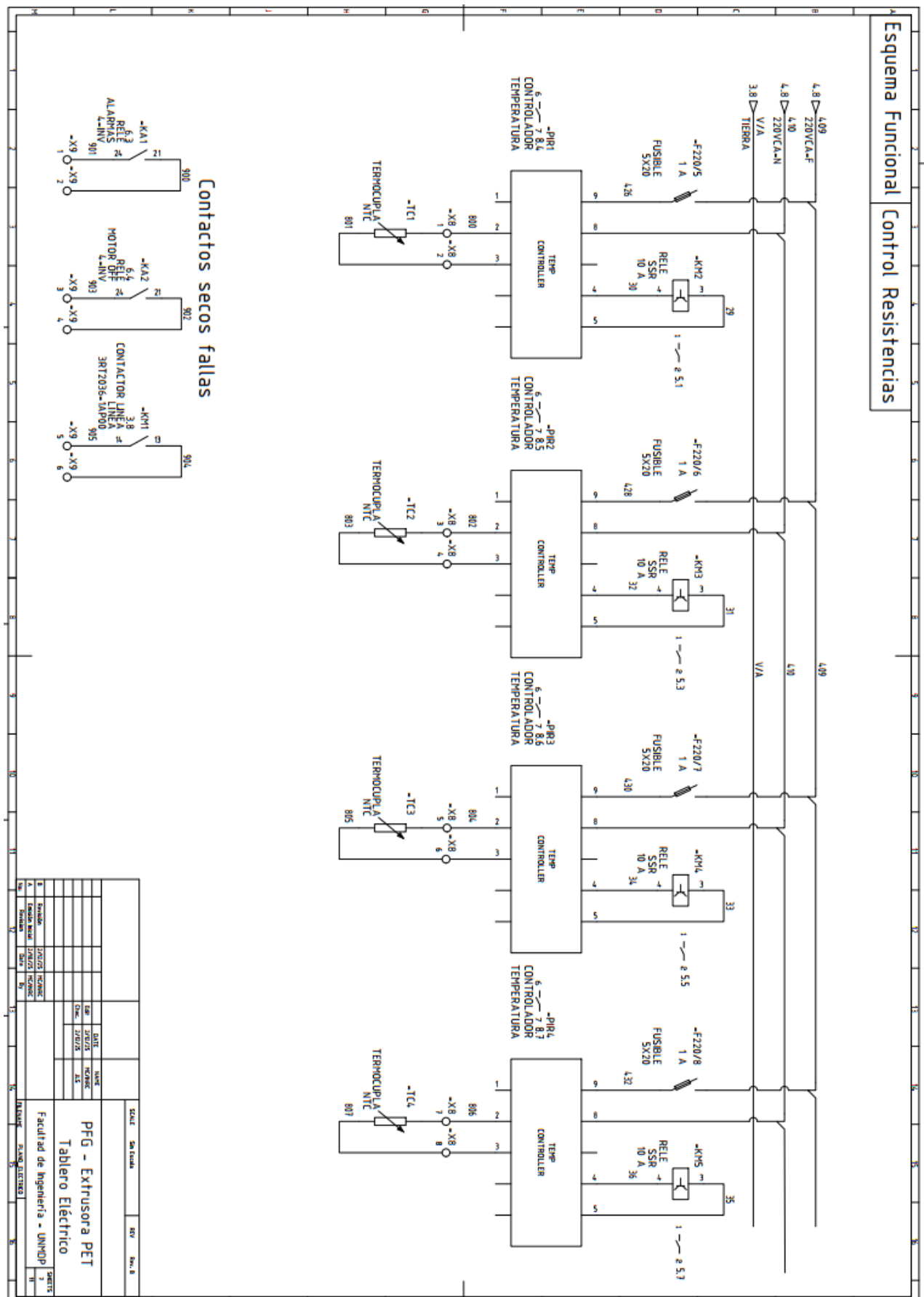


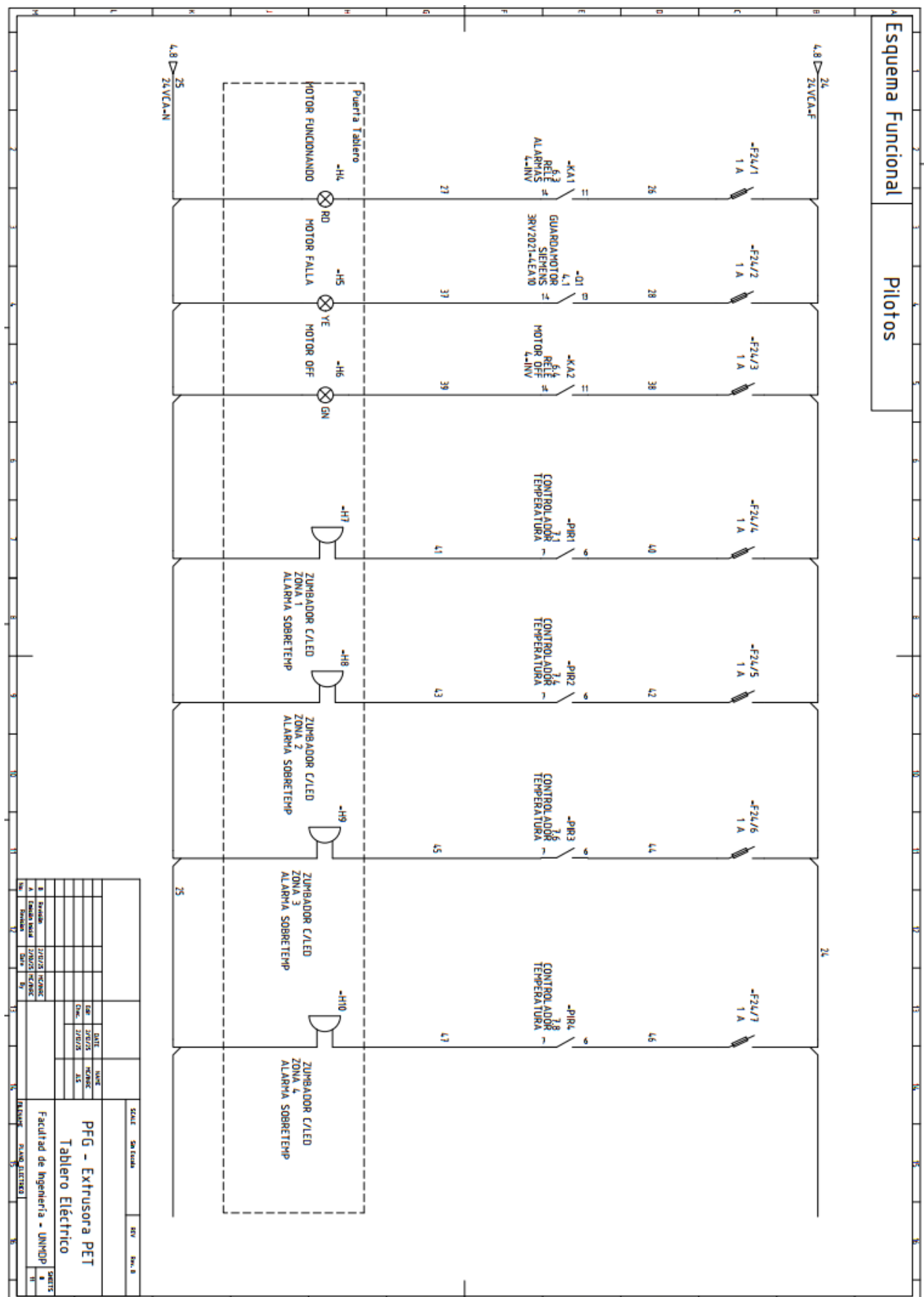


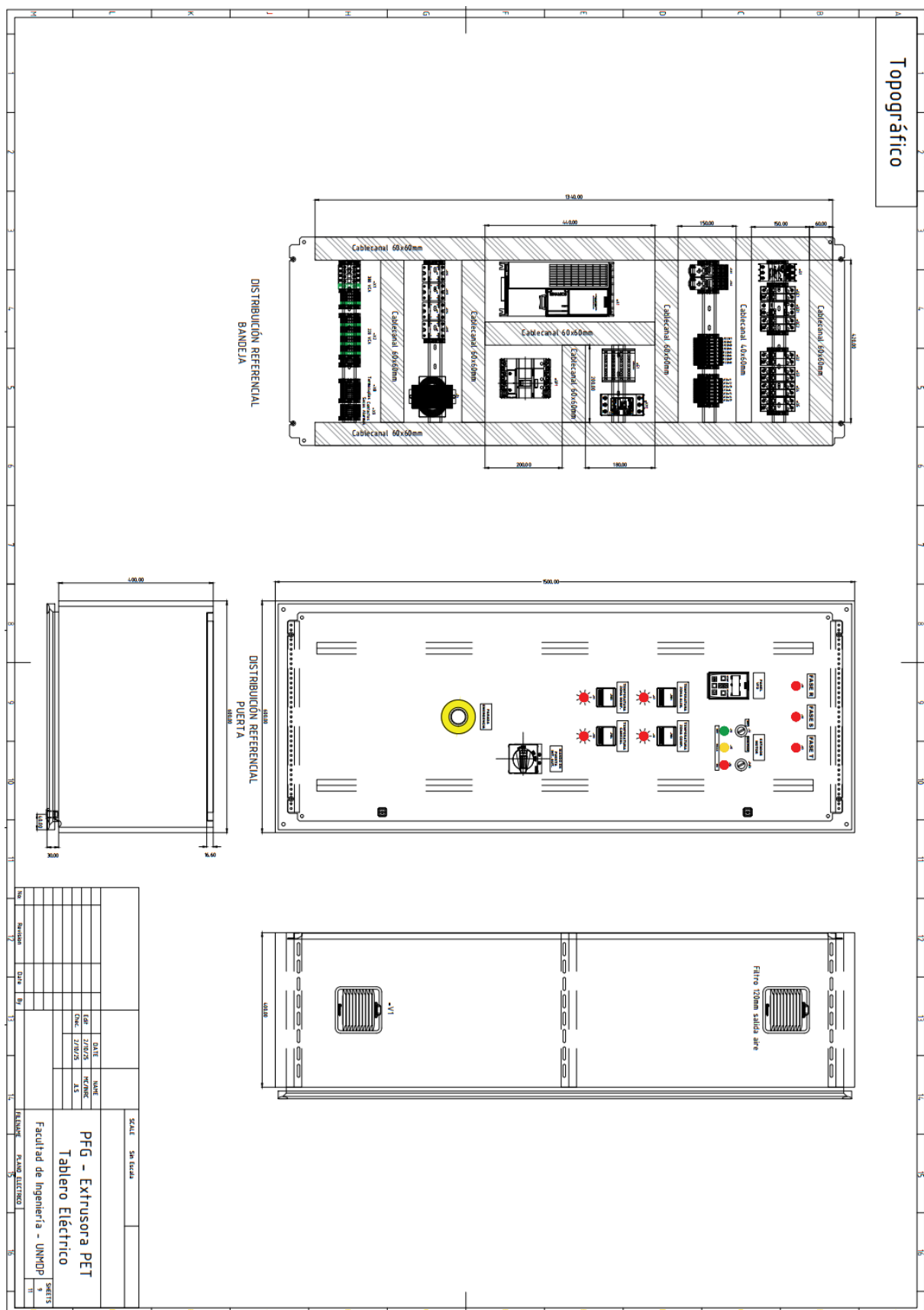


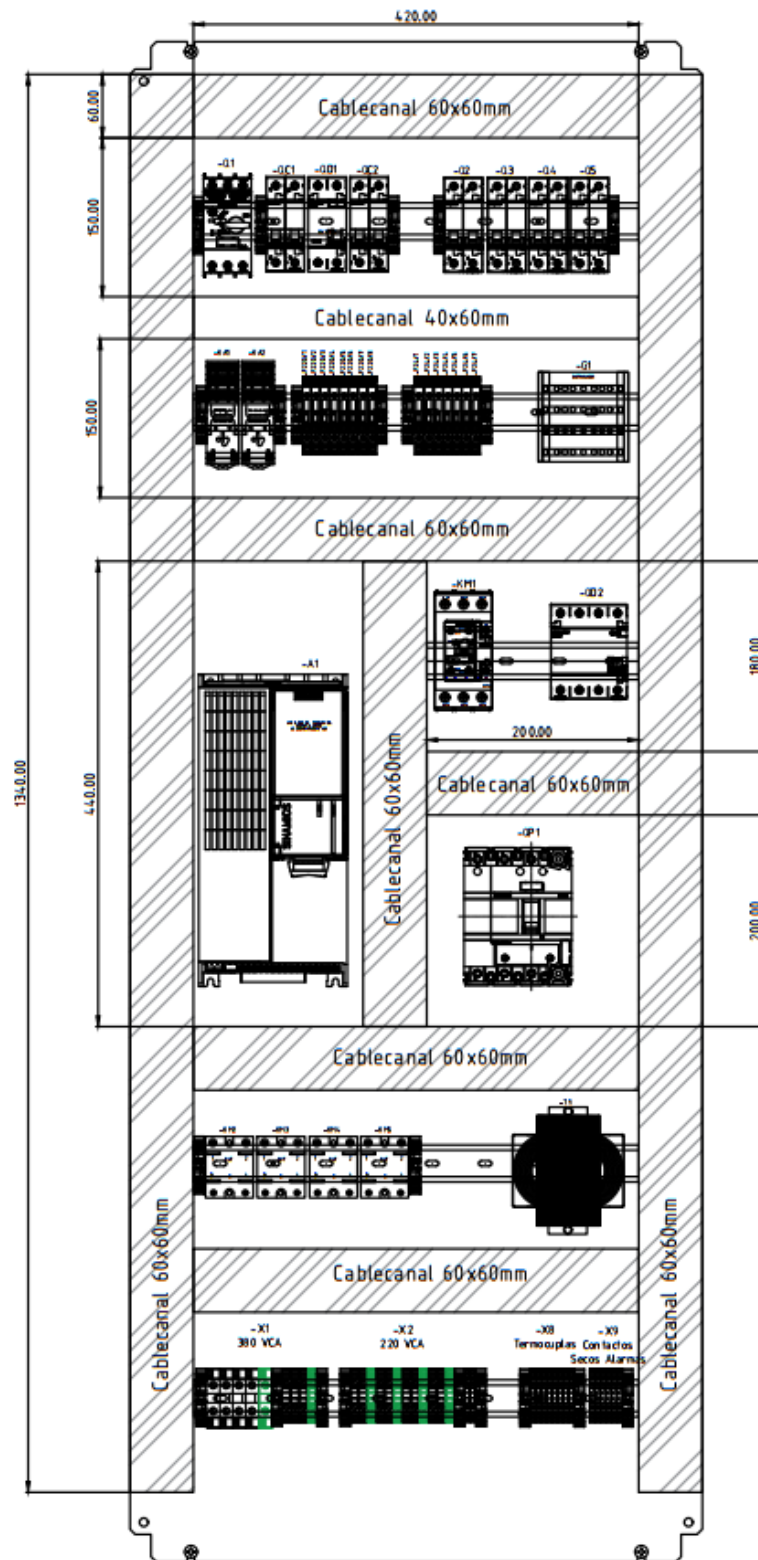




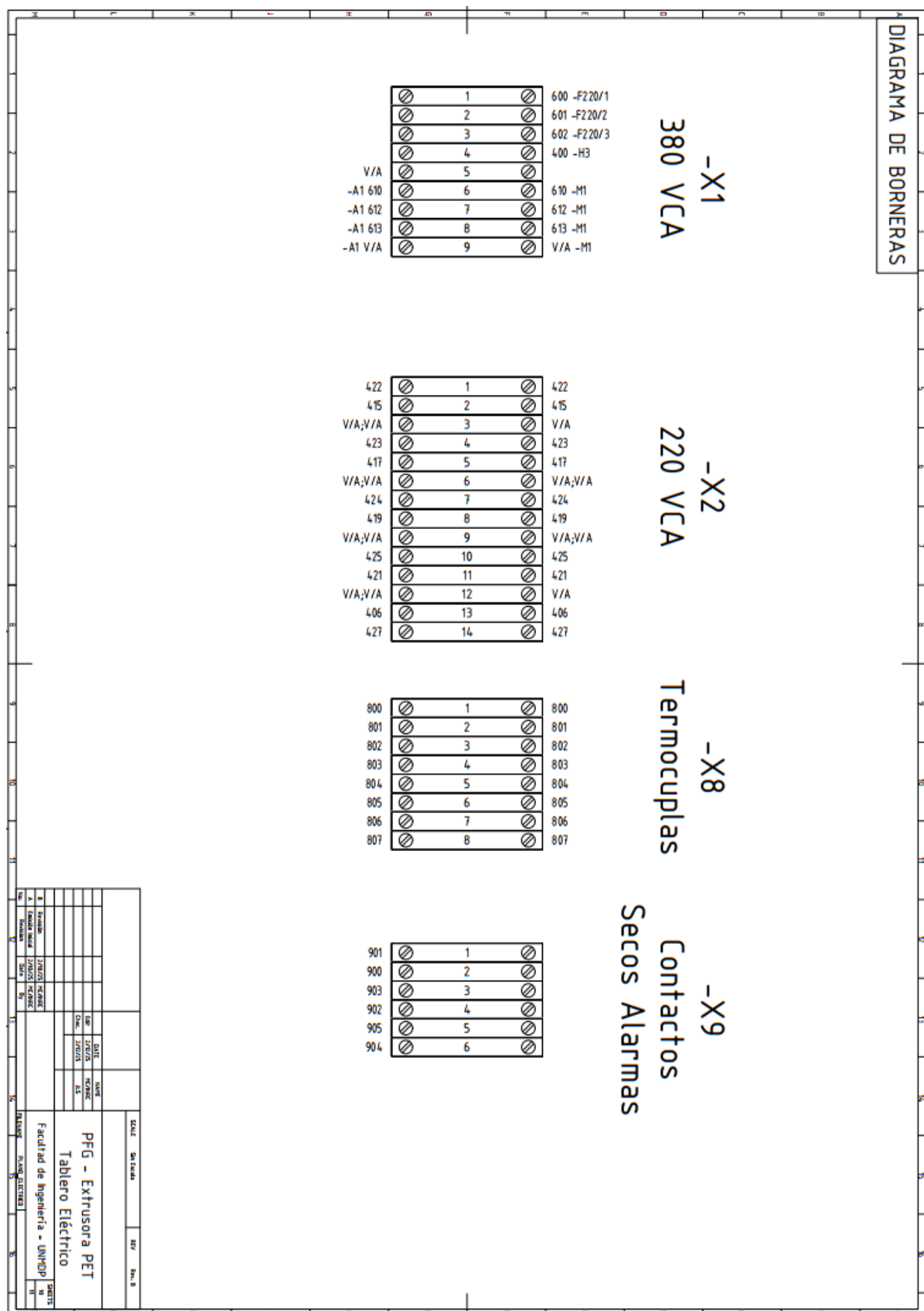




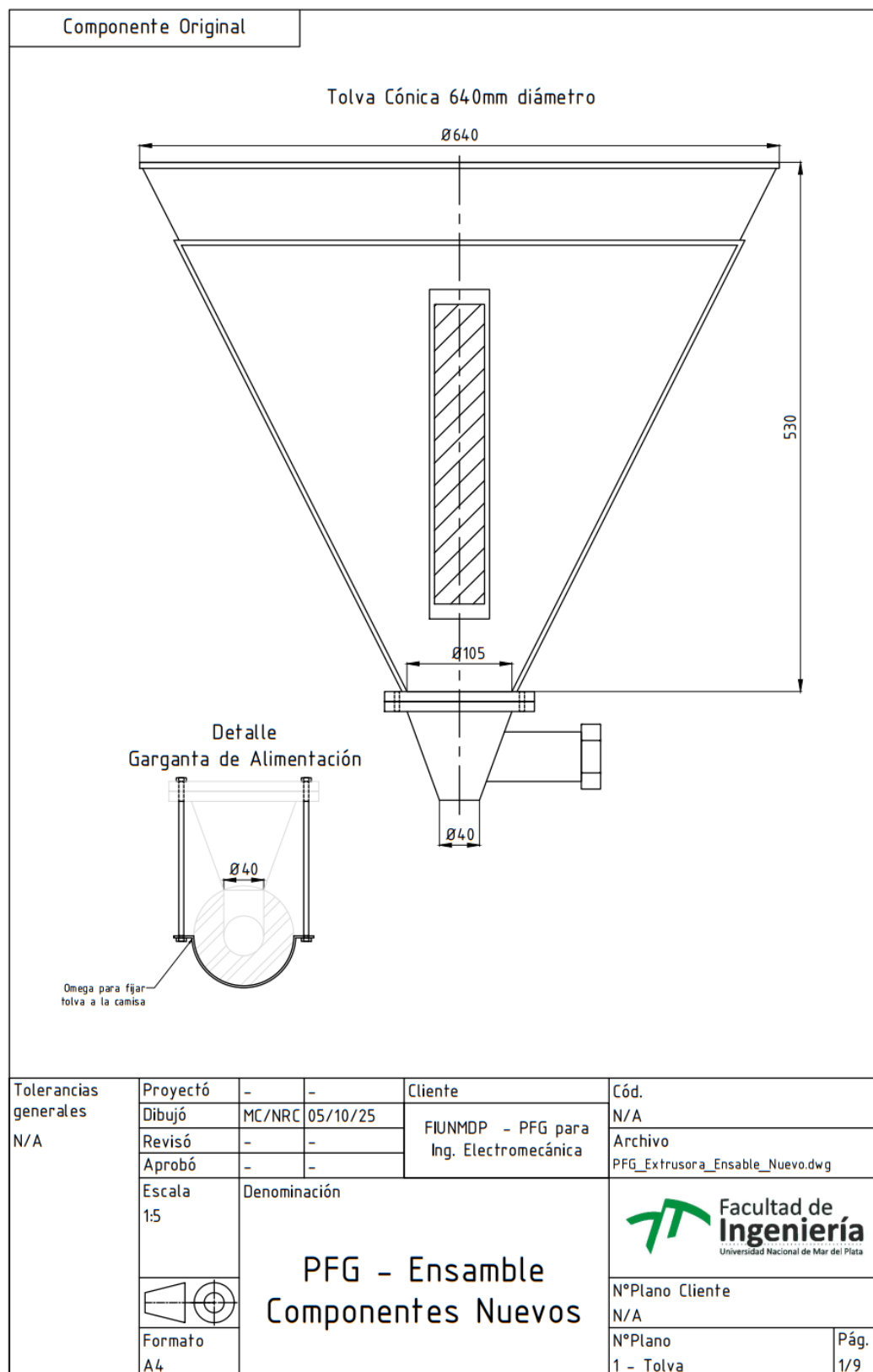




DISTRIBUCIÓN REFERENCIAL
BANDEJA

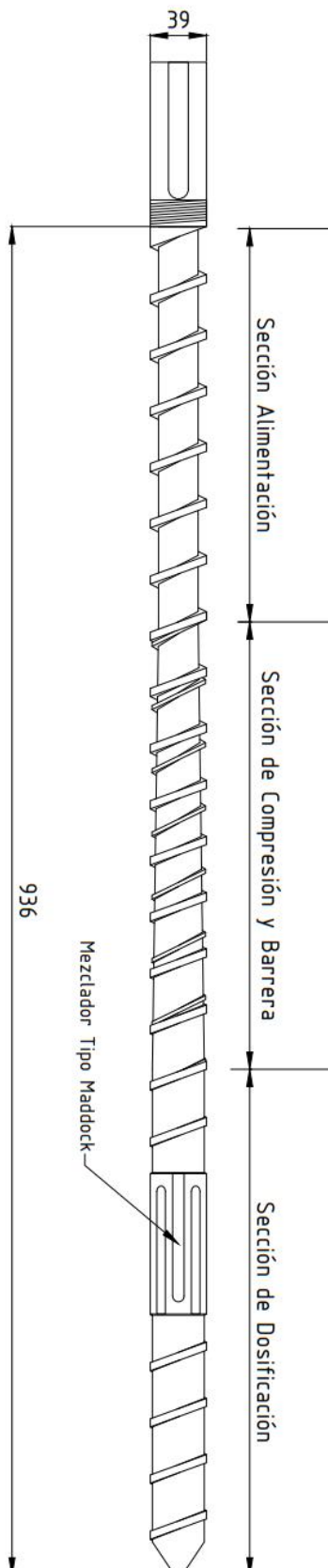


Anexo VI – Reacondicionamiento mecánico – Esquemas de armado



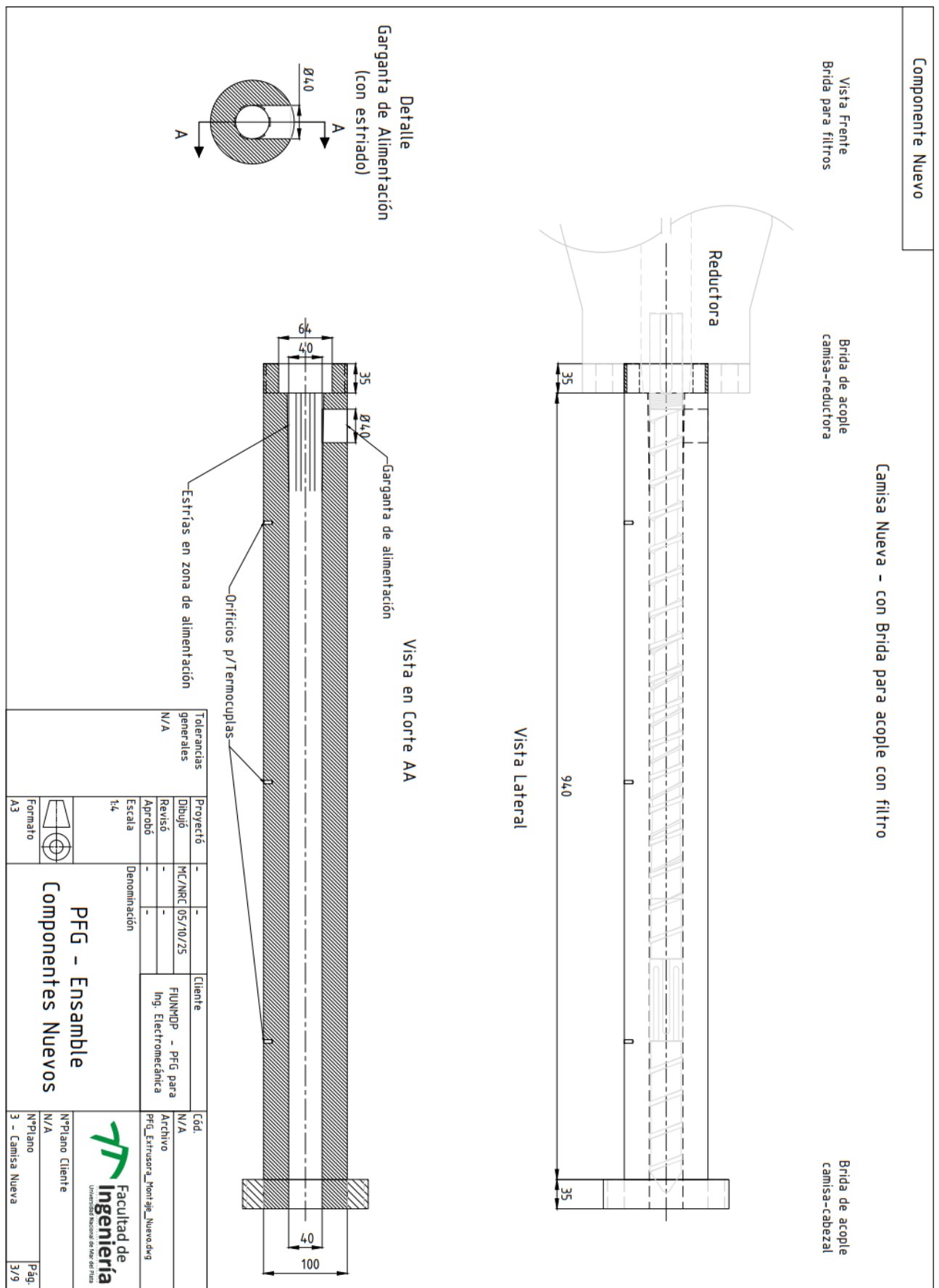
Componente Nuevo

Tornillo a Fabricar



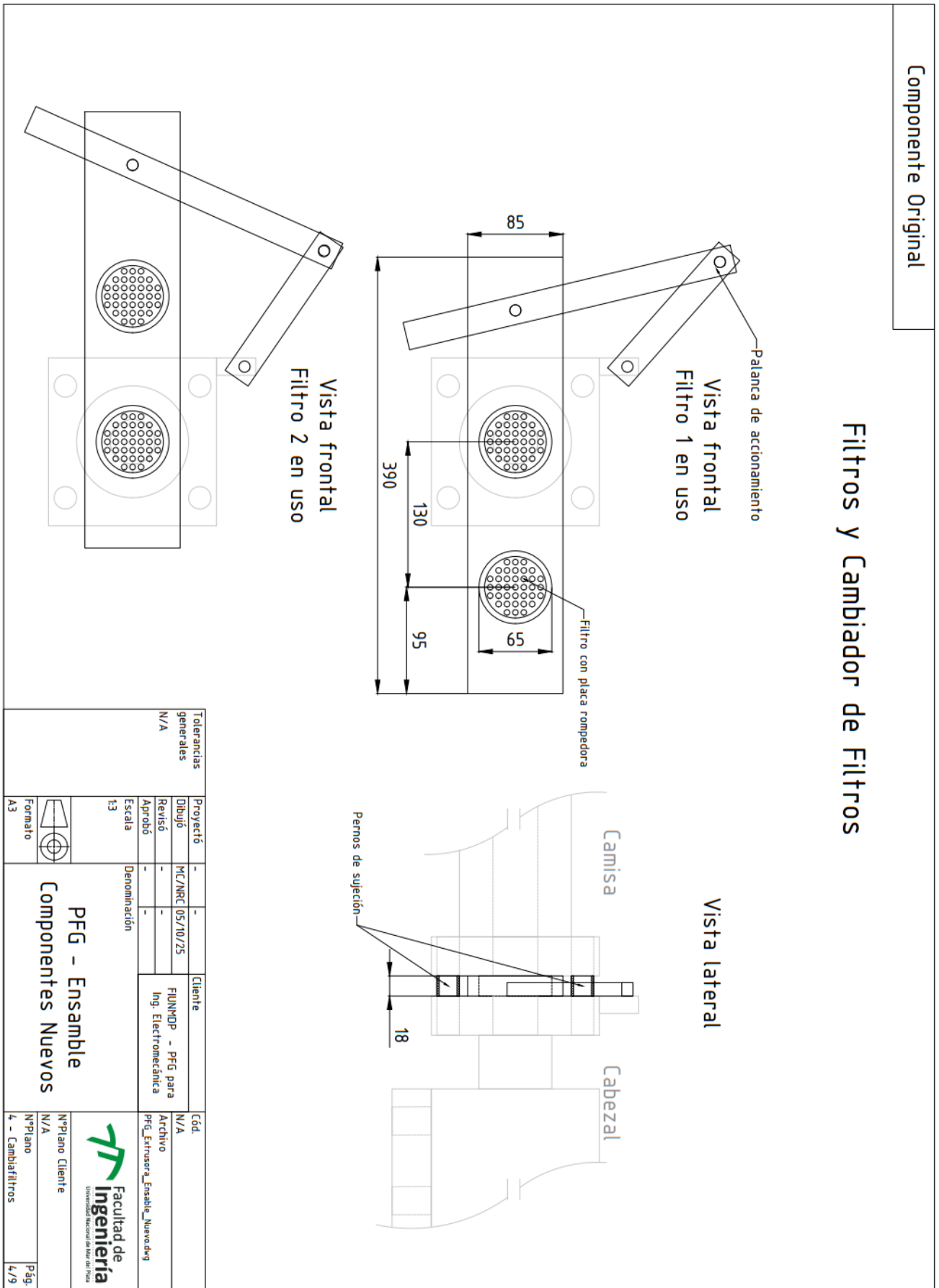
Relación L/D: 24

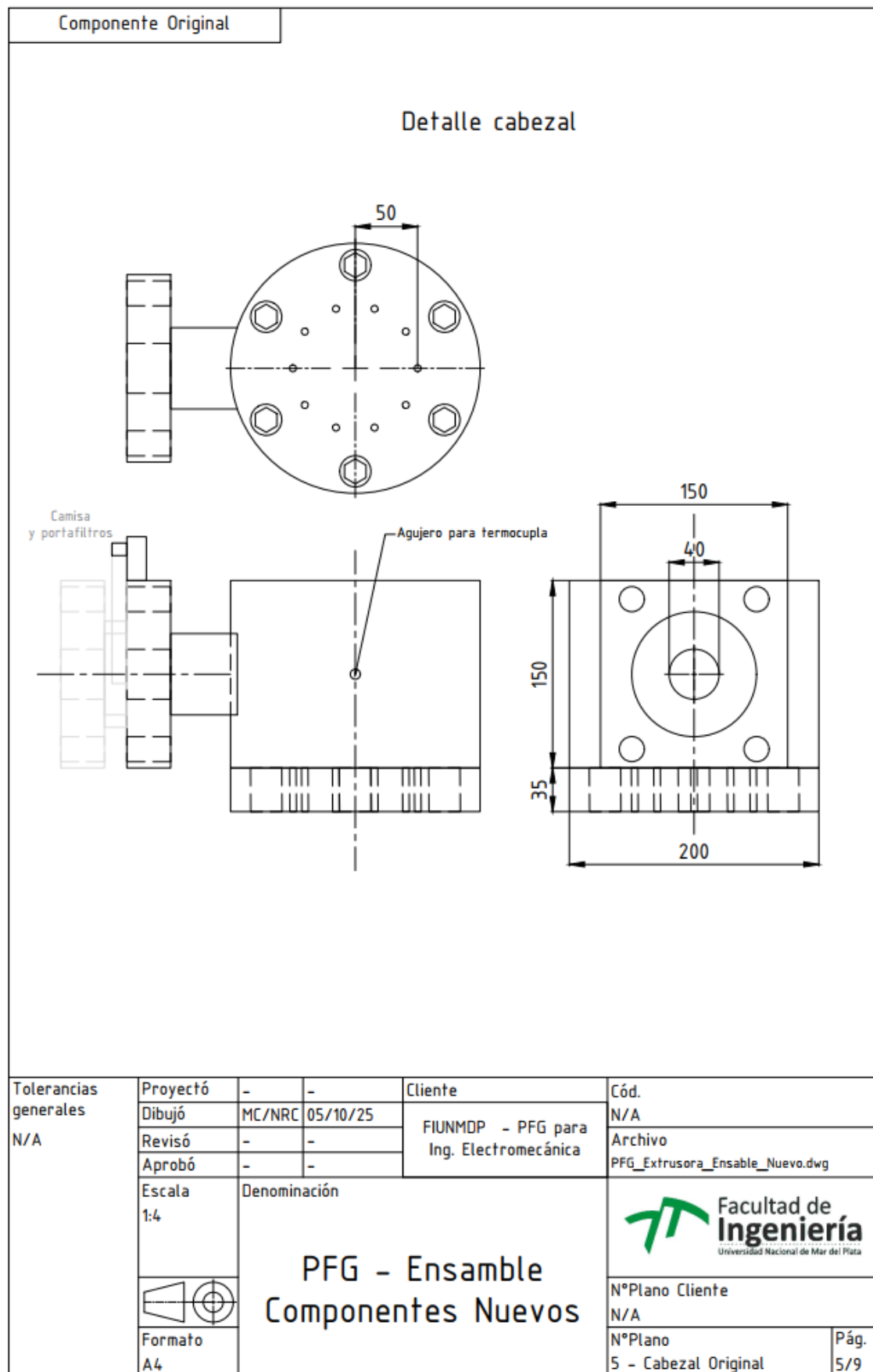
Tolerancias generales	Proyectó	-	-	-	Cliente	Cód.
N/A	Dibujó	MC/NRC	05/10/25	FIUNMDP - PFG para	N/A	Archivo
	Revisó	-	-	Ing. Electromecánica		PFG_Extrusora_Ensamble_Nuevo.dwg
	Aprobó	-	-			
	Escala	1:3	Denominación			
	Formato	A3	PFG - Ensamble Componentes Nuevos			
			NºPlano Cliente			
			N/A			
			NºPlano			
			2 - Tornillo Nuevo			
			Pag.			
			2/9			

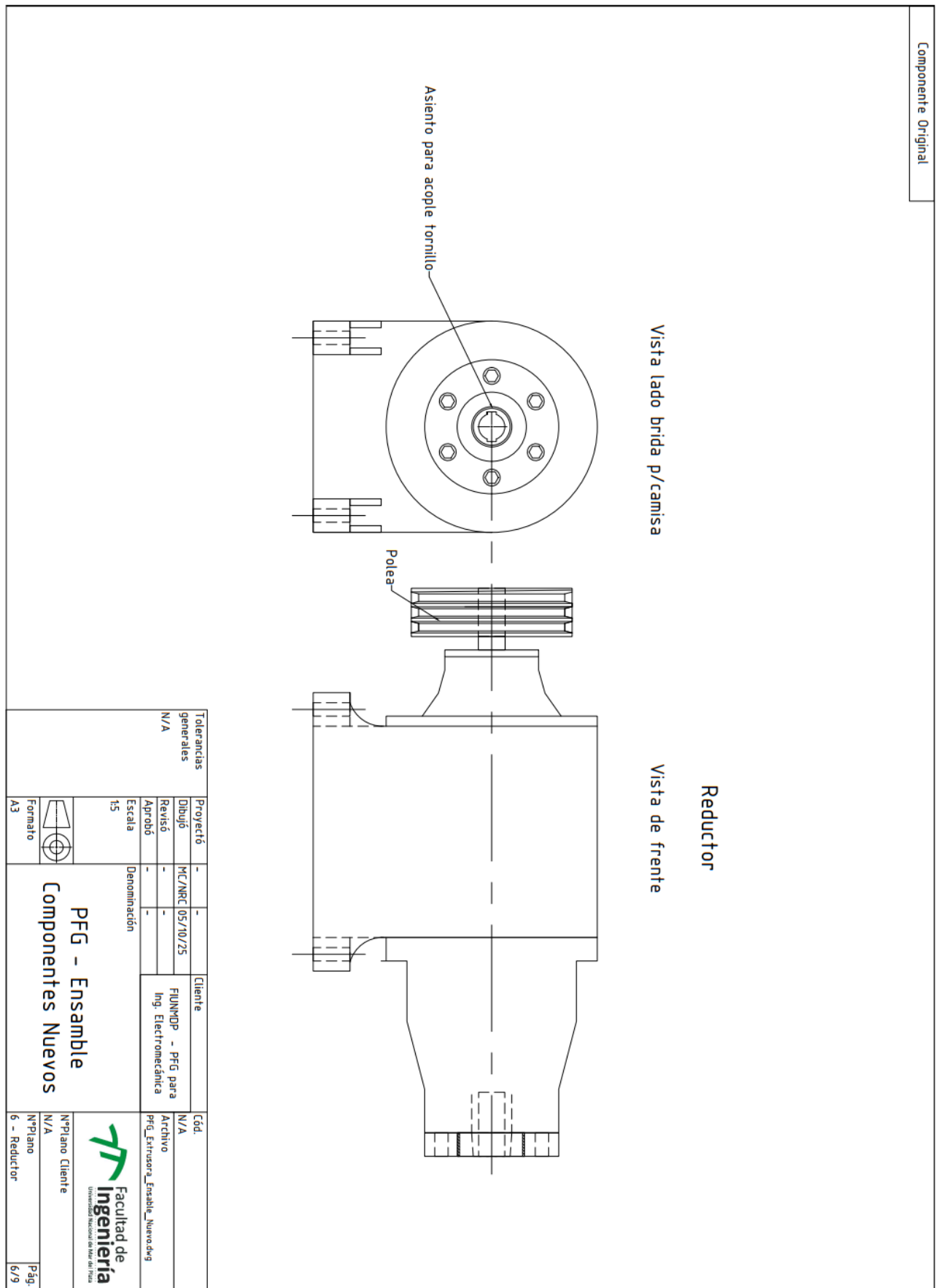


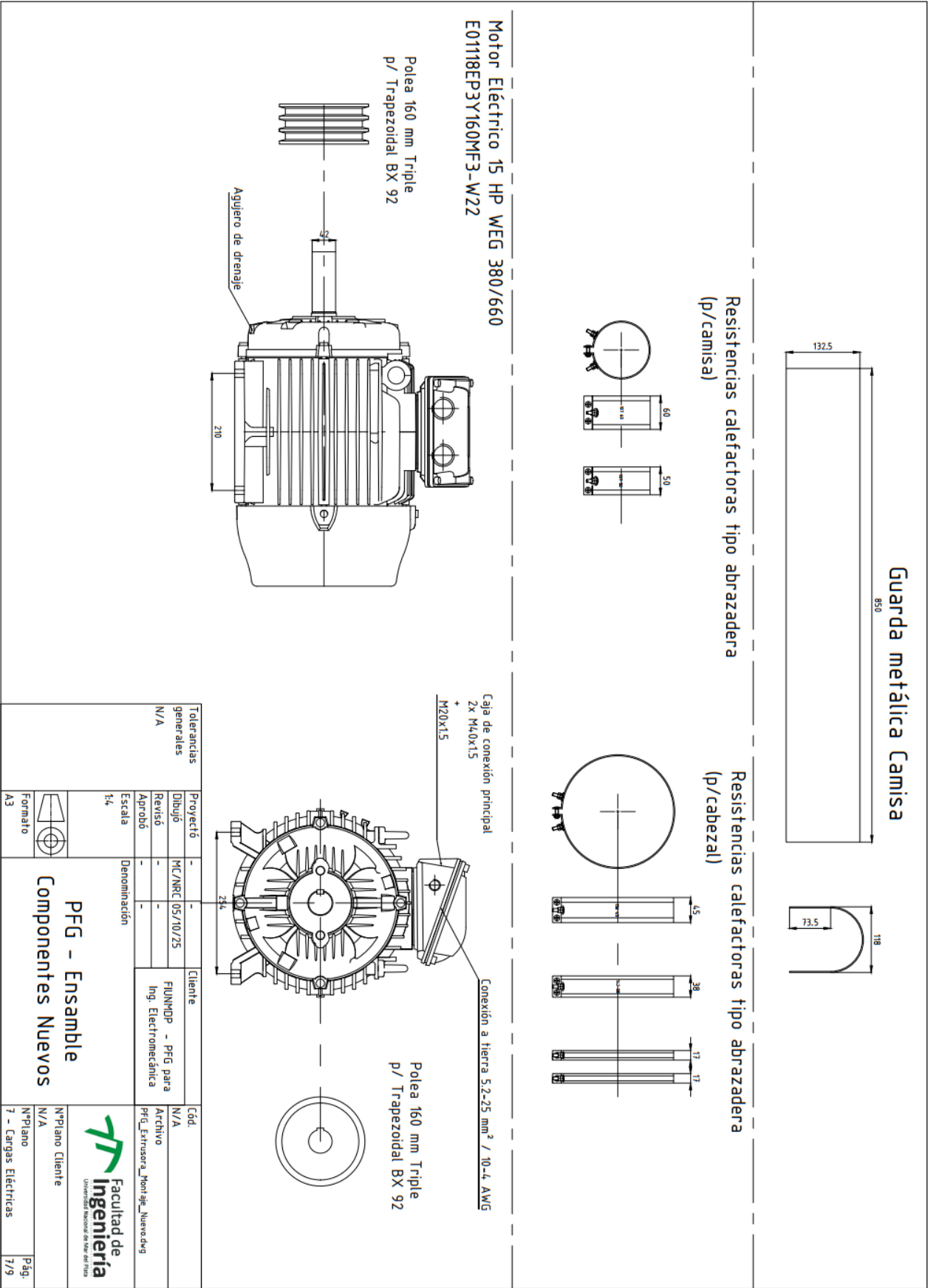
Componente Original

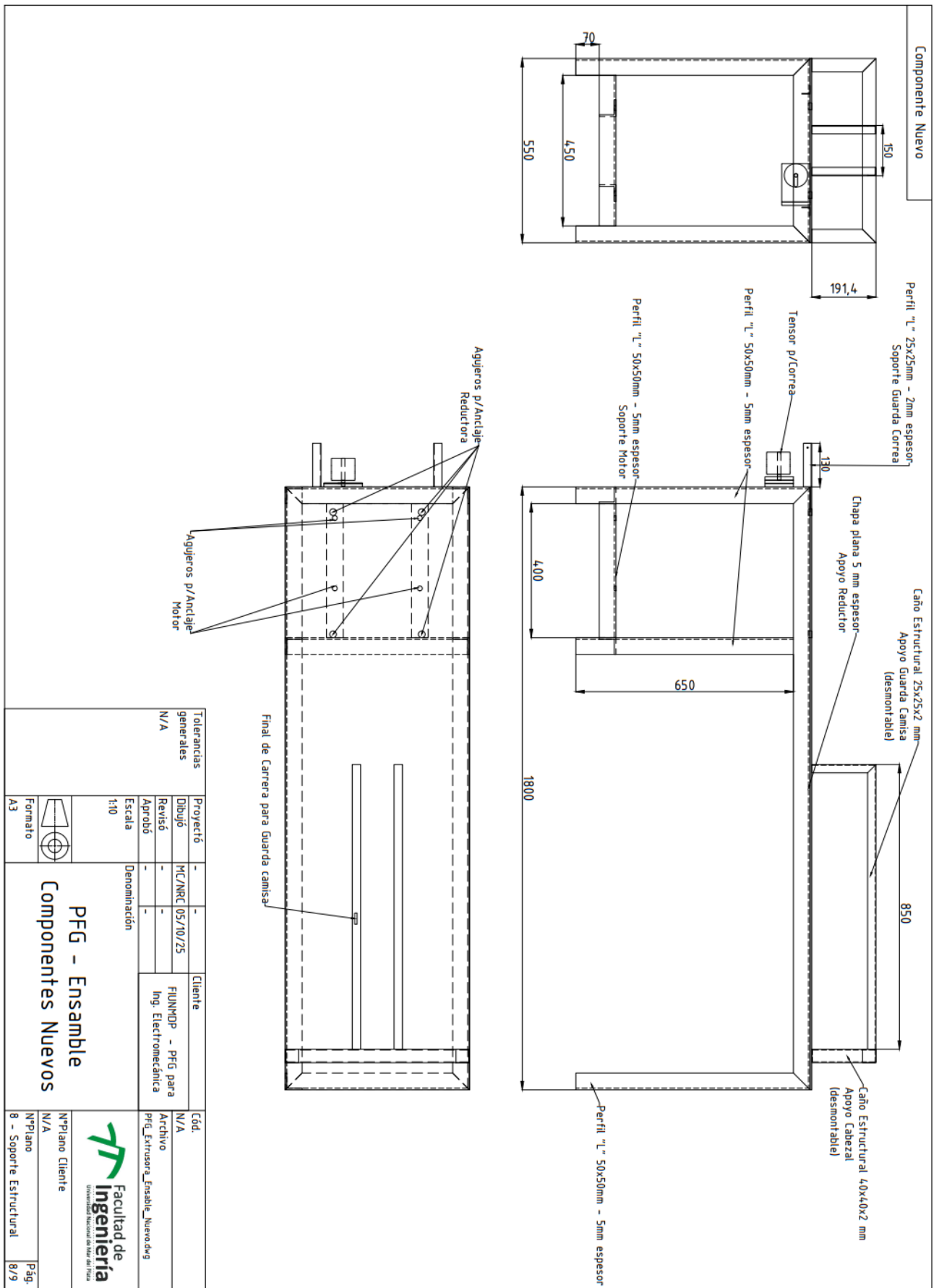
Filtros y Cambiador de Filtros

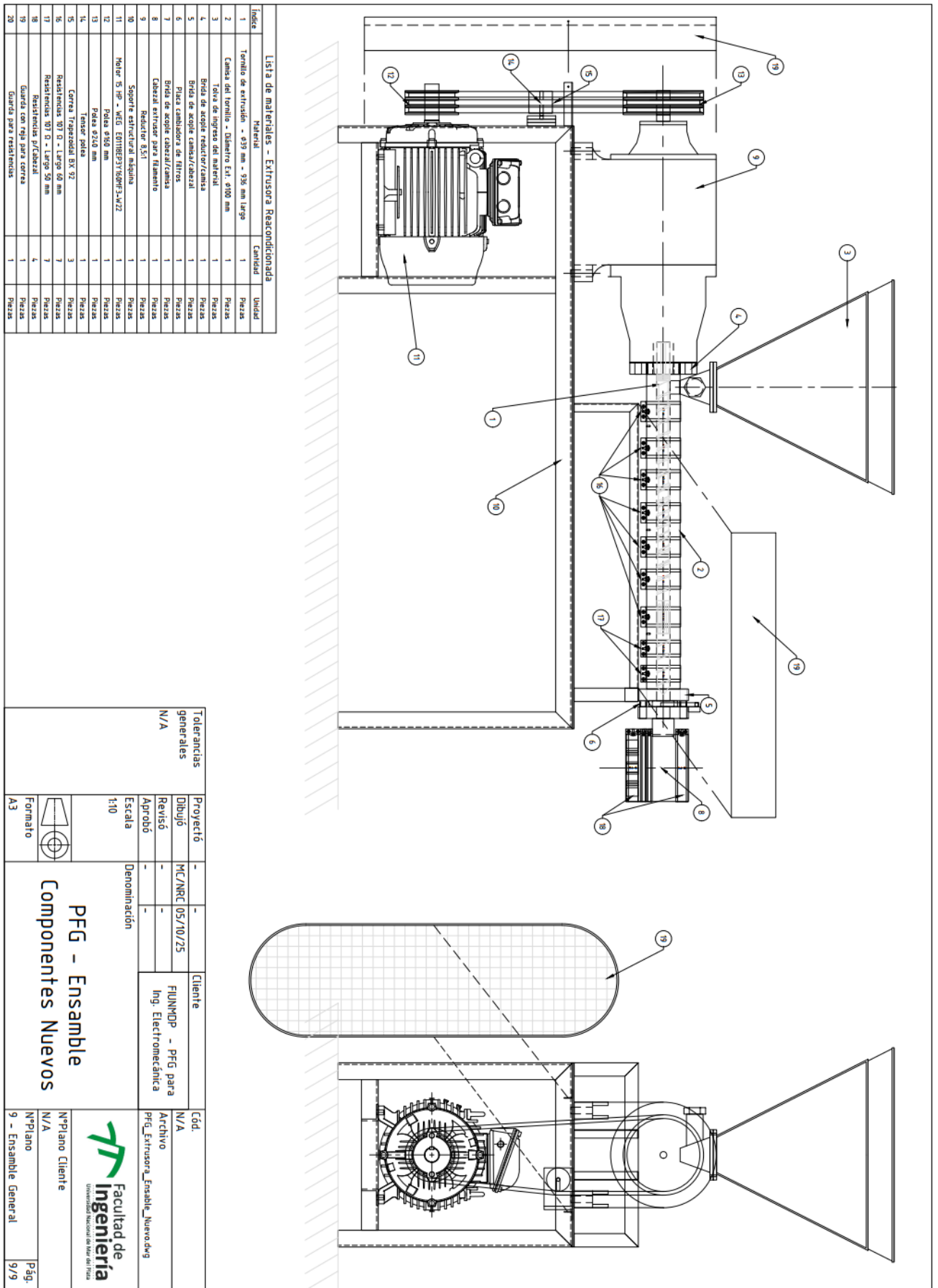












Anexo VII – Montaje de la extrusora

Requisitos previos:

- Contar con el soporte de la extrusora armada, nivelada y fijada al piso del taller en el lugar donde se desea instalar el equipo.
- Verificar que se cuenta con todas las partes y equipos que se requieren. Verificar que se cuenta con las herramientas para realizar el montaje.
- Corroborar que todas las superficies de apoyo, bridas y piezas estén limpias.

Pasos:

1. Montaje del motor sobre la estructura.
 - a. Instalar el motor en la estructura, con el eje apuntando hacia la parte trasera del equipo.
 - b. Colocar y alinear la polea.
 - c. Dejar preparada la bornera para conectar los cables de alimentación.
2. Montaje de la caja reductora
 - a. Colocar la caja reductora sobre la estructura.
 - b. Asegurar con pernos y arandelas. Verificar el correcto alineamiento horizontal y vertical de la brida de salida para no tener problemas en la futura instalación de la camisa.
 - c. Colocar la polea alineada con la polea del motor.
3. Preparación del tornillo
 - a. Colocar las chavetas en el muñón. Verificar que asiente correctamente en la ranura.
 - b. Aplicar grasa de montaje en la superficie exterior del tornillo para facilitar el montaje (Una pequeña capa, no excederse).
4. Acoplamiento tornillo-caja reductora
 - a. Alinear el extremo del tornillo con el eje de salida del reductor.
 - b. Acoplar mediante la chaveta el tornillo con el reductor.
5. Montaje de la camisa
 - a. Montar las resistencias eléctricas sobre la camisa, sin cablear. Asegurar que ajusten firmemente para un buen contacto térmico.
 - b. Con cuidado, colocar la camisa desde el extremo del tornillo hacia la reductora. Roscar sobre el cabezal, buscando que la boquilla de alimentación quede en posición vertical hacia arriba.
 - c. Verificar que el tornillo gire libremente con la mano. De no ser así, realinear el sistema.

- d. Colocar el soporte (estructura de perfilería indicada en el plano) para el apoyo de la brida para el cabezal.
- 6. Montaje del sistema de filtrado y cabezal
 - a. Instalar el cambia-filtro en la salida de la camisa.
 - b. Asegurar con bulones cruzados en secuencia cruzada.
 - c. Montar el cabezal sobre el cambia-filtro. Se monta con cuatro pernos a la brida de la camisa. El portafiltros debe quedar fijo por apriete entre las dos bridas, la del cabezal y la de la camisa.
- 7. Montaje de la transmisión.
 - a. Revisar la alineación de las dos poleas.
 - b. Instalar y tensar las correas con la tensión recomendada. Utilizar el tensor para regular la tensión.
- 8. Montaje de la tolva
 - a. Fijar la tolva sobre la entrada de la camisa, asegurando que quede firmemente alineada y sellada. Utilizar la "U" para asegurar la tolva sobre la propia camisa.
- 9. Conexión eléctrica.
 - a. Posicionar el tablero eléctrico a un lado de la estructura.
 - b. Cablear las resistencias. Cablear en grupos de 3 en paralelo en la camisa. Cablear las cuatro resistencias en paralelo en el cabezal. Los cuatro grupos deben ser alimentados por cuatro respectivos cables de 2x1,5+T de alta temperatura (con aislación de fibra de vidrio) hacia el tablero. Conectar en los bornes X2-1-12 según plano eléctrico.
 - c. Conectar el motor al tablero, con el cable de 3x6+6 blindado en el tablero. Conectar la bornera del motor en triángulo. Conectar el cable en el tablero a los bornes X1-6, 7, 8, 9 según plano eléctrico.
 - d. Colocar las termocuplas en su posición, y cablear. Conectar a bornera X8.
 - e. Poner a tierra el gabinete del tablero, y la estructura de la extrusora.
 - f. Revisar continuidad eléctrica, y resistencia de aislamiento.
 - g. Conectar la alimentación del tablero a la instalación eléctrica de la planta, con un cable 4x16+PE en la bornera X1, según plano eléctrico.
 - h. Asegurar que todos los interruptores, térmicas y seccionadores estén en posición de apagado.

10. Instalación de protecciones mecánicas

- a. Instalar protección sobre partes móviles (poleas y motor)
- b. Instalar la guarda sobre la camisa. Verificar que se asiente correctamente sobre la estructura de soporte, haciendo contacto con el final de carrera. De lo contrario el equipo no se energiza.

11. Verificación final antes de puesta en marcha

- a. Confirmar el correcto ajuste de todas las fijaciones.
- b. Verificar que el tornillo gire libremente (movimiento manual desacoplado del motor).
- c. Revisar nivel de aceite en el reductor.
- d. Revisar libre giro del eje del motor.
- e. Cerrar puerta del tablero con llave.

Anexo VIII – Manual de operación

La operación de la máquina se realiza en tres etapas. La primera etapa comprende el encendido de la máquina y su equipo periférico. Luego, se ajustan las condiciones de procesamiento a los parámetros para el PET, buscando cumplir con los requisitos de desempeño del producto. Por último, se realiza el ajuste fino y resolución de problemas.

Una operación exitosa requiere prestar atención a muchos detalles, como la calidad y el flujo del material de alimentación, el perfil de calor adecuado para fundir sin degradar el plástico y la supervisión del funcionamiento y coordinación de los distintos equipos periféricos.

Verificaciones previas al arranque

Se debe corroborar que se esté en condiciones para comenzar con el proceso de extrusión. En lo que respecta en particular a la extrusión, se deben verificar los siguientes puntos:

- 1) En primer lugar, se debe verificar que se cuenta con todos los elementos de protección personal, y que la máquina se encuentra en condiciones para operar. Por ejemplo, que se encuentren colocadas las protecciones mecánicas sobre la camisa y sobre la polea.
- 2) Salvo que el mismo plástico ya esté en la máquina de un ciclo previo, la máquina debe estar completamente limpia o purgada, incluyendo tolva, barril, placa de ruptura, matriz y equipo de salida. En el caso particular de la extrusora que se analiza, se supone solamente se utilizará con PET, por lo que no supondría un problema.
- 3) Revisar bandas calefactoras y conexiones eléctricas con cuidado.
- 4) Verificar termocuplas y sus conexiones.
- 5) Asegurarse de que el flujo a través del extrusor no esté bloqueado.
- 6) Tener un balde o recipiente medio lleno de agua para recoger el extruido inicial, que será descartado.
- 7) Encender tablero eléctrico. Antes de iniciar, asegurarse con el encargado de la instalación eléctrica que todo el tablero está listo para operar:
 - a. El interruptor automático principal debe estar en posición de OFF, seccionando el equipo. Las tres luces indicadoras de tensión del tablero deben estar encendidas. Las térmicas de distribución, diferencia, guardamotor, contactor de línea, deben estar en posición de encendido. De no ser así, asegurar las condiciones para encenderlo.
 - b. Una vez que se verifique la correcta condición operativa del tablero, cerrarlo. No debe abrirse en otra ocasión salvo falla del equipo. Utilizar el mando en puerta para cerrar el interruptor automático, hacia la posición de ON.

- c. Verificar que las luces del motor no indiquen inconvenientes. La luz de OFF indica que el motor está apagado. La luz de ON enciende cuando el motor empieza a funcionar. La luz de falla enciende solo si el guardamotor opera, ante una sobrecarga o falla.

En cuanto al proceso general que se llevará a cabo en el Taller Protegido, previo al arranque del precalentamiento de la extrusora, se debe tener avanzada la etapa de deshumidificación del PET por procesar.

Encendido (Start – up)

Los detalles para operar la máquina se basan en lo que requiere el plástico que se procesa, como ajustes de temperatura y velocidad del tornillo. Los procedimientos de arranque implican ciertas precauciones:

1. Comenzando con las zonas frontal y trasera (extremo del cabezal y sección de alimentación), se deben ajustar los pirómetros ligeramente por encima del punto de fusión del plástico (285°C). El calentamiento debe ser gradual desde los extremos hacia el centro del barril para evitar acumulación de presión por posible degradación del material fundido.
2. Aumentar todas las resistencias gradualmente, verificando desviaciones que puedan indicar calefactores quemados o fuera de control, subiendo y bajando ligeramente el punto de ajuste del controlador para comprobar si la energía se enciende y apaga.
3. Cuando los controladores muestren que todos los calefactores están ligeramente por encima del punto de fusión, ajustar a los valores de operación deseados, verificando que cualquier aumento de calor sea gradual, particularmente en el frente/cabezal transversal.
4. El tiempo requerido para alcanzar el equilibrio térmico varía dependiendo del tamaño del extrusor. Los controladores de encendido/apagado suelen provocar sobrepasos.
5. El polímero fundido puede comportarse de muchas formas, por lo que nadie debe pararse frente al extrusor durante el arranque, y nunca se debe mirar dentro de la tolva de alimentación debido al riesgo de retroceso por degradación previa del material, entre otros (Seguir recomendaciones de seguridad, Anexo II – Seguridad).
6. Una vez alcanzadas las temperaturas establecidas, se coloca el plástico en la tolva y se inicia el tornillo a baja velocidad.
7. El operador debe observar la corriente requerida en el panel del variador “BOP-2” para mover el tornillo, detenerlo si la corriente es demasiado alta y esperar unos minutos antes de reiniciar. El equipo cuenta igualmente con una protección si se sobrecarga

el motor, pero la supervisión de un operario es imprescindible. Luego del tiempo de espera, encender nuevamente el motor con el botón de ON del panel.

8. Dejar que la máquina funcione unos minutos y purgar hasta obtener un extruido de buena calidad visualmente (la experiencia indica cómo debe verse; un cierto tamaño y cantidad de burbujas o vapores puede ser óptimo para un fundido particular, según la experiencia tras ajustar todos los controles). Si se dejó plástico en el extrusor, puede ser necesario un tiempo de purga más largo para eliminar cualquier plástico ligeramente degradado.
9. Ajustar el tornillo a la velocidad requerida con el potenciómetro, asegurándose de que no se alcance un nivel de corriente consumida excesivo.
10. El extruido puede comenzar su recorrido desde la matriz “enhebrando” a través del equipo de salida hasta el sistema de arrastre.
11. Puede ser necesario un ajuste entre el extrusor y el equipo de salida. Se pueden aumentar las velocidades del tornillo del extrusor y las tasas de arrastre.
12. El extrusor se puede “ajustar finamente” para obtener los parámetros finales requeridos y cumplir con la tasa de producción y el tamaño del producto deseados.

Funcionamiento

El operador debe estar supervisando el proceso. Dentro de las tareas principales a realizar se encuentran:

- Verificar que no se corte el filamento extruido y en tal caso guiarlo nuevamente para que siga con el proceso.
- Agregar material a la deshumidificadora de manera de poder asegurar un suministro constante a la extrusora.
- Retirar el pellet producido con cierta periodicidad.
- Controlar que las variables permanezcan estables en los valores preestablecidos. Ante aumentos sustanciales de la temperatura de la camisa, consumo eléctrico del motor o signos de funcionamiento anormal del proceso, se debe frenar de inmediato el proceso y analizar los problemas.
- Realizar el mantenimiento constante de los equipos para asegurar su correcto funcionamiento y informar a los supervisores del taller ante cualquier evento.

Parada (Shutdown)

Las paradas de proceso varían ligeramente según si la máquina debe limpiarse para cambiar el material utilizado o solo detenerse brevemente. Si se va a procesar nuevamente el mismo tipo de plástico, generalmente no se requiere limpieza. Si se requiere limpieza para cambiar de plástico, es necesario desarmar la máquina a una temperatura suficientemente alta para permitir la limpieza antes de que el material se solidifique.

Apagado sin limpieza:

1. Vaciar la tolva lo mejor posible.
2. Reducir todos los ajustes de temperatura al calor de fusión del material
3. Reducir la velocidad del tornillo a 2-5 rpm, purgando el plástico, si es necesario, en un balde o tambor de agua antes de reducir el calor de fusión.
4. Cuando el tornillo esté aparentemente vacío, detenerlo y apagar los calefactores y la energía principal

NOTA: Los pasos 3 y 4 deben completarse antes de que la temperatura de fusión baje significativamente para evitar apagado prematuro con plástico en el barril.

5. Como se tendrá un paquete de mallas con placa de ruptura, desconectar la matriz/cabezal y retirar la placa de ruptura y las mallas. Limpiar según sea necesario.

Limpieza de extrusor al apagar:

Los dos primeros pasos son los mismos que los pasos 1 y 3 de la sección anterior. Luego:

3. Cuando el extrusor esté vacío, detener el tornillo.
4. Apagar y desconectar los calefactores de la matriz/cabezal. Reducir otros calefactores a la temperatura de fusión del plástico.
5. Desarmar la matriz y limpiarla mientras aún está caliente. Retirar la matriz y eliminar la mayor cantidad posible de plástico raspando con espátula de cobre o cepillando con cepillo de alambre de cobre. Retirar todas las resistencias y termocuplas. Considerar un sistema de extracción de gases sobre el área de desarmado y limpieza, por la emisión de volátiles o humos tóxicos que puede emanar el material.
6. Empujar gradualmente el tornillo mientras se limpia con cepillo de alambre de cobre y lana de cobre. Tener cuidado si se usa soplete para quemar plástico; los aceros templados, como el Hastelloy, pueden alterarse, y el tornillo puede deformarse, debilitarse o sufrir desgaste, corrosión o incluso romperse.
7. Continuar la limpieza después de retirar el tornillo, si es necesario.
8. Apagar calefactores y energía principal.

La limpieza final de piezas, especialmente desarmadas, se realiza mejor manualmente.
 Si se usa agua, secar con aire.

Operación	Cómo/Cuándo	Advertencia
A-Secado	Realizar el secado de las escamas de PET, para contar con el material suficiente para poder operar.	 Riesgo de tropiezo y caída al mismo nivel.  Superficies calientes  Ruido
A01-Verificar limpieza escamas	Verificar que las escamas de PET estén limpias. No deben estar mezcladas con etiquetas, suciedad, tapas, u otros contaminantes	 Riesgo de tropiezo y caída al mismo nivel.
A02-Cargar escamas en secadora	Cargar las escamas en la secadora.	 Riesgo de tropiezo y caída al mismo nivel.
A03-Proceso de secado	Encender el sistema de secado. Configurar temperatura y tiempo de secado. (Recomendado 180°C durante 4 horas).	 Riesgo choque eléctrico  Solo personal autorizado y capacitado.

A04-Extraer escamas	La deshumidificadora 3 en 1 recomendada para el proceso automáticamente ingresa el material a la tolva secadora y de allí a la extrusora.	 Riesgo de tropiezo y caída al mismo nivel.
A05- Suministrar constantemente nuevo material a la deshumidificadora	Cargar la deshumidificadora para poder tener un procesamiento continuo durante el tiempo que el taller protegido se encuentra abierto.	 Riesgo de tropiezo y caída al mismo nivel.
B-Extrusión		
B01-Realizar verificación previa a extrusión	Revisar bandas calefactoras y conexiones eléctricas con cuidado. Verificar termocuplas y sus conexiones. Contar con un recipiente con agua para depositar el primer extruido que se produzca.	 Riesgo de tropiezo y caída al mismo nivel.
B02- Encender el tablero eléctrico principal	Acceder al tablero y colocar el mando en puerta en "ON" para dar tensión a la máquina. Si se halla presionado, destrabar el botón de parada de emergencia o "golpe de puño".	 Riesgo choque eléctrico  Atención. Verificar que las puertas del gabinete no estén abiertas.
B03-Inicio seguro de precalentamiento	Encender los pirómetros mediante el botón de "ON" de cada uno. En primera instancia encender los pirómetros de la zona de alimentación y del cabezal, y regularlos a una temperatura mayor al punto de fusión (recomendado 300°C).	 Riesgo choque eléctrico  Atención. Verificar que las puertas del gabinete no estén abiertas.

	El calentamiento debe ser gradual desde los extremos hacia el centro de la camisa para evitar acumulación de presión por posible degradación del material fundido.	
B04- Precalentamiento	Encender el resto de los pirómetros mediante el botón de "ON" de cada uno. Los mismos deben estar regulados ligeramente por encima de la temperatura de fusión (285°C), se recomiendan 300°C. Si la máquina se encontraba fría, se encenderán las resistencias y se llevará a la temperatura de funcionamiento. Una vez alcanzada la temperatura, debe mantenerse a la máquina en espera por aproximadamente 40 minutos. Esto asegura que todo el tornillo y el sistema se halla en temperaturas óptimas. Tiempo estimado: 40-60 minutos	 Riesgo de proyección de polímero fundido. Utilizar elementos de protección personal, y mantenerse alejado de cabezal y tolva.  Riesgo de tropiezo y caída al mismo nivel.  Superficies calientes  Riesgo choque eléctrico
B05- Regulación de pirómetros	Ajustar a los valores de operación deseados. Temperaturas referencia: - Zona 1 (alimentación): 250 °C - Zona 2 (compresión): 265 °C - Zona 3 (dosificación): 275 °C - Cabezal: 280 °C	 Riesgo de proyección de polímero fundido. Utilizar elementos de protección personal, y mantenerse alejado de cabezal y tolva.
B06- Inicio rotación tornillo	Estando la extrusora en la temperatura seteada y habiendo esperado el tiempo recomendado, se iniciará la rotación del tornillo.	 Solo personal autorizado y capacitado puede tocar el variador de velocidad. (potenciómetro).

	El operador observa la corriente requerida para mover el tornillo. Si la corriente es demasiado alta debe esperar unos minutos antes de reiniciar. Dejar que la máquina funcione unos minutos y purgar hasta obtener un extruido de buena calidad visualmente.	 Riesgo choque eléctrico  Atrapamientos. No exponer las manos en equipos en movimiento y puntos de atrapamiento.  Riesgo de tropiezo y caída al mismo nivel.  Superficies calientes  Ruido
B07-Llevar máquina a régimen	Se eleva la velocidad del tornillo lentamente, girando el potenciómetro, hasta llevarlo a la velocidad de régimen. Se debe verificar constantemente que no haya un aumento significativo del consumo de amperes. Si hay un consumo en amperes mayor al valor máximo indicado, pueden estar tapados los filtros o puede haber un problema en el reductor de la máquina.	 Solo personal autorizado y capacitado puede tocar el variador de velocidad. (potenciómetro).  Riesgo choque eléctrico  Atrapamientos. No exponer las manos en equipos en movimiento y puntos de atrapamiento.  Riesgo de tropiezo y caída al mismo nivel.

		 Superficies calientes  Ruido
B08-Encender pelletizadora.	Se encenderá la pelletizadora y sus rodillos de tracción.	 Riesgo choque eléctrico  Atrapamientos. No exponer las manos en equipos en movimiento y puntos de atrapamiento.  Riesgo de tropiezo y caída al mismo nivel.  Ruido
B09- Colocar filamentos en batea de enfriamiento y pelletizadora.	El primer tramo del filamento que sale de la matriz será desechado. Posteriormente, se tomarán los filamentos y se los colocará en las guías para que pasen por la batea de enfriamiento y posteriormente en los rodillos de tracción para que entre en la pelletizadora. Regular los parámetros de pelletizadora y extrusora para asegurar una producción continua y sin interrupciones.	 Atrapamientos. No exponer las manos en equipos en movimiento y puntos de atrapamiento.  Riesgo de tropiezo y caída al mismo nivel.  Superficies calientes  Ruido
B10- Retirar pellets	Retirar bolsón de pellets completo, y poner uno vacío en su lugar.	 Riesgo de tropiezo y caída al mismo nivel.

Operación	Como/Cuando	Advertencia
C - Mantenimiento		
C01 – Reemplazar filtro	Ante un incremento en la diferencia de presiones antes y después del filtro, o un aumento en el consumo en amperes del motor, se procederá a cambiar el filtro.	-
C02-Detener maquina y esperar las condiciones aptas para el reemplazo	Parar la rotación del tornillo y esperar a que la presión en el cambia filtro disminuya.	 Solo personal autorizado y capacitado puede manejar el variador de velocidad. (potenciómetro)  Riesgo choque eléctrico
C03-Rotación filtro	Aflojar los bulones que ajustan la brida de enganche. Trasladar manualmente la placa corrediza en el interior del cambia filtro. Verificar que se desplazó correctamente la placa porta filtros. Ajustar nuevamente los bulones de la brida de enganche.	 Atrapamientos. No exponer las manos en equipos en movimiento y puntos de atrapamiento.  Riesgo de tropiezo y caída al mismo nivel.  Superficies calientes

C04- Extracción, limpieza y cambio de filtro.	Extraer las tres placas del filtro utilizando guantes y una espátula. Remover restos plásticos carbonizados del espacio libre en el que se encontraban las placas del filtro, y lubricar con spray de silicona para que quede preparada de cara a un nuevo cambio de malla. Desechar la malla metálica. Limpiar las placas del filtro no desechables. Colocar la nueva malla metálica en el espacio libre de la placa corrediza del cambiafiltros.	 Atrapamientos. No exponer las manos en equipos en movimiento y puntos de atrapamiento.  Riesgo de tropiezo y caída al mismo nivel.  Superficies calientes
C05-Poner en marcha extrusora	Poner en marcha nuevamente la extrusora.	 Solo personal autorizado y capacitado puede tocar el variador de velocidad. (potenciómetro)  Riesgo choque eléctrico

Anexo IX – Manual de mantenimiento

Componente de la máquina	Tarea	Frecuencia	Procedimiento	Advertencia
Motor	001-Limpieza de rejillas de ventilación	Semanal	Estando la máquina apagada, tomar un paño o pincel seco, y limpiar las rejillas de ventilación del motor.	 Riesgo choque eléctrico
	002- Inspección visual y auditiva de rodamientos del motor	Semestral	Estando la máquina apagada. Se retira la cobertura metálica del motor y se verifica el estado de los rodamientos. Corroborar correcto giro y si presentan ruidos o juego axial excesivo.	 Atrapamientos
Reductor	001-Control del nivel de aceite	Mensual	Controlar el nivel de aceite en el reductor mediante el indicador de nivel presente en un costado. En caso de que falte aceite, desenroscar de forma manual el tapón y completar con lubricante por encima del mínimo. Para realizar el llenado, utilizar un embudo con filtro. Utilizar aceite: (sugerido: aceite sintético ISO VG 320)	 Riesgo de tropiezo y caída al mismo nivel.
	002-Cambio de aceite	Triannual o cada 4000 hrs de uso	Extraer el tapón inferior con una llave fija, dejar escurrir el aceite, volver a colocar el tapón.	

			Luego retirar el tapón superior y llenar utilizando un embudo con filtro hasta el nivel adecuado. Utilizar aceite: (sugerido: aceite sintético ISO VG 320).	
	003-Inspección visual y mecánica de sellos de reductor	Trimestral	Verificar el estado general, y controlar que no haya filtraciones de aceite.	
Resistencias calefactoras	001-Inspección visual y mecánica.	Anual	Realizar inspección visual y mecánica de las resistencias. Verificar el estado del cableado y de las conexiones.	 Superficies calientes  Riesgo choque eléctrico
	002-Medición de continuidad	Anual	Utilizando un multímetro en modo continuidad, testear una por una.	
Termocuplas	001-Inspección visual y mecánica.	Anual	Verificar el estado correcto del cableado y conexiones de cada termocupla	 Superficies calientes  Riesgo choque eléctrico
	002-Verificar el funcionamiento de las termocuplas	Anual	Extraer las termocuplas de la extrusora accediendo por la reja metálica superior. Una vez retiradas, aplicar una fuente de calor localizada (por ejemplo, pistola de aire caliente o llama controlada) sobre la punta de la termocupla. Verificar en el pirómetro el aumento de temperatura para asegurar su correcta respuesta.	
Brida de enganche	001-Limpieza de brida de enganche	Semestral	Extraer la resistencia. Limpiar la superficie con paño desengrasante.	

	002-Verificar el apriete de los tornillos	Semestral o luego de cambio de filtro	Asegurar el correcto apriete para evitar pérdidas de material entre las partes que une la brida.	
Filtros	001-Inspección visual en brida	Semanal	Verificar posibles pérdidas de material fundido en el cambiafiltro. Controlar el apriete de los tornillos de las placas exteriores. Si persiste, revisar presencia de elementos entre las placas.	 Superficies calientes
	002-Inspección visual placa portafiltros	Luego de cambio de filtro	Verificar el correcto posicionamiento de la placa corrediza antes de que el material alcance temperatura de fusión.	
Brida de acople	001-Limpieza de la brida de acople	Anual	Extraer la resistencia tipo collar, limpiar con paño y desengrasante	 Superficies calientes
	002-Verificar el apriete de los tornillos	Semestral o luego de cambio de filtro	Asegurar el correcto apriete para evitar pérdidas de material entre las partes que une la brida.	
Camisa	001-Limpieza de camisa	Anual	Extraer resistencias, limpiar con paño y desengrasante.	 Superficies calientes
Caños de extensión	001-Limpieza de caño extensión	Anual	Extraer resistencias, limpiar con paño y desengrasante.	
				 Riesgo choque eléctrico
Cabezal	001-Limpieza de exterior del cabezal	Anual	Extraer resistencias, limpiar con paño y desengrasante.	 Riesgo choque eléctrico