

**Diseño y Fabricación de un Equipo de Laboratorio para
el Estudio de Procesamiento de Termoplásticos**



Davies, Guillermo Antonio

PROYECTO INTEGRADOR PROFESIONAL

Presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del
Comahue como requisito para la obtención del grado de INGENIERO
MECÁNICO

Neuquén - Argentina

2020

Diseño y Fabricación de un Equipo de Laboratorio para el Estudio de Procesamiento de Termoplásticos

DAVIES, Guillermo Antonio.

Director: Ing. **CAMPOS, Damián.**

Co-director: Ing. **SANTARELLI, Edgardo.**

Presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del
Comahue como requisito para la obtención del grado de INGENIERO
MECÁNICO

Neuquén - Argentina

2020

Diseño y Fabricación de un Equipo de Laboratorio para el Estudio de Procesamiento de Termoplásticos

DAVIES, Guillermo Antonio

Aprobado en fecha 01 de Junio de 2020

Tribunal evaluador:

- Dra. Ing. SOMMADOSSI, Silvana.
- Dra. Ing. ZALAZAR, Mónica.
- Mg. Ing. KEIL, Germán.

.....
Ing. CAMPOS, Damián.

Director

Dedicatoria

A mis padres, por acompañarme en las distintas etapas de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

A María Carla, por creer en mi y acompañarme en momentos difíciles.

A mis profesores, agradezco su confianza para llevar a cabo este trabajo y la asistencia brindada para lograr este objetivo.

AGRADECIMIENTOS INSTITUCIONALES

A la Universidad Nacional del Comahue y su cuerpo docente, que contribuyeron a mi formación profesional.

Al Departamento de Mecánica Aplicada de la Facultad de Ingeniería, por el uso de sus equipos e instalaciones.

Diseño y Fabricación de un Equipo de Laboratorio para el Estudio de Procesamiento de Termoplásticos

Autor: DAVIES, Guillermo Antonio.

Director: CAMPOS, Damián.

Co-Director: SANTARELLI, Edgardo.

Resumen

El desarrollo del presente trabajo surge ante la necesidad planteada por el Grupo de Estudio de Polímeros Sintéticos y Naturales (GEPSyN) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue, de desarrollar un equipo de laboratorio para el procesamiento de termoplásticos.

Los materiales poliméricos se encuentran en constante desarrollo gracias a sus innumerables aplicaciones. En especial los compuestos poliméricos dado que son ampliamente utilizados en diferentes productos industriales. Según su comportamiento con la temperatura, los polímeros se pueden clasificar en termoestables y termoplásticos. Por lo general, en los procesos que involucran mezclado y homogeneización de otros agregados con el polímero en estado fundido, son necesarias altas tensiones de corte. Esta condición plantea los requisitos mínimos de diseño para un equipo que procese este tipo de materiales.

La metodología propuesta permitió desarrollar las distintas etapas del proceso de diseño de una máquina, y finalmente la fabricación validó, mediante las pruebas realizadas, las suposiciones asumidas en etapas tempranas del proyecto.

Palabras clave: Termoplásticos, Diseño, Mezclador.

Design and Manufacture of a Laboratory Equipment for the Study of Thermoplastic Processing

Author: DAVIES, Guillermo Antonio.

Advisor: CAMPOS, Damián.

Co-Advisor: SANTARELLI, Edgardo.

Summary

The development of this work appears before the need raised by the Group for the Study of Synthetic and Natural Polymers (GEPSyN) of the Faculty of Engineering of the National University of Comahue, to develop laboratory equipment for thermoplastic processing.

Polymeric materials are in constant development thanks to their countless applications. Especially polymeric compounds since they are widely used in different industrial products. Depending on their behavior with temperature, polymers can be classified into thermosets and thermoplastics. Generally, in the processes that involve mixing and homogenization of other aggregates with the polymer in the molten state, high shear stresses are necessary. This condition raises the minimum design requirements for equipment that processes this type of material.

The proposed methodology allowed to develop the different stages of the design process of a machine, and finally the manufacturing validated, through the tests carried out, the assumptions assumed in the early stages of the project.

Keywords: Thermoplastics, Design, Mixer.

Índice

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVO	2
3. MARCO TEÓRICO	2
3.1. Generalidades	3
3.1.1. Características de los termoplásticos	3
3.1.2. Procesamiento de polímeros	5
3.2. Normativa de Referencia	8
3.3. Metodología de diseño	8
3.3.1. Planificación del producto - Declaración de Misión	9
3.3.2. Diseño Conceptual	9
3.3.3. Ingeniería Básica	10
3.3.4. Ingeniería de Detalle	13
3.3.5. Pruebas y Refinamiento	14
4. DESARROLLO	16
4.1. Planificación del Producto - Declaración de Misión	16
4.2. Diseño Conceptual	17
4.2.1. Identificación de las necesidades	18
4.2.2. Benchmarking	19
4.2.3. Especificaciones Técnicas	19
4.2.4. Funciones y Subfunciones	19
4.2.5. Generación de Conceptos Solución	21
4.2.6. Selección del Concepto Solución	25
4.2.7. Arquitectura de la máquina	26
4.3. Ingeniería Básica	32
4.3.1. Predimensionamiento	32
4.3.2. Verificación de componentes principales	46
4.3.3. Sistema de Control	47
4.4. Ingeniería de Detalle	49

4.5. Fabricación	50
4.6. Pruebas	53
4.7. Líneas futuras de trabajo	54
5. CONCLUSIONES	55
Referencias	56
A. Anexo I: Identificación de Necesidades	59
B. Anexo II: Benchmarking	61
B.1. Molino de rodillos 80E- <i>Exakt</i>	61
B.2. <i>Three Roll Mills</i>	63
B.3. <i>Productos CT</i>	64
C. Anexo III: Memoria de Cálculo	70
D. Anexo IV: Plano	95

Índice de Figuras

1. Módulo de elasticidad E para un poliestireno cristalino (A), un poliestireno ligeramente reticulado (B) y poliestireno amorfo (C) (H. F. Brinson y C. L. Brinson, 2008).....	3
2. Tres formas de generar un compuesto Polímero/Arcilla (Saad y col., 2017)	5
3. Desglose conceptual del proceso de fabricación de productos de base polimérica (H. F. Brinson y C. L. Brinson, 2008).	7
4. Metodología de diseño adaptada de (Ulrich y Eppinger, 2012).	8
5. Subetapas en la fase de Diseño Conceptual (Ulrich y Eppinger, 2012). . .	10
6. Método de Generación de Conceptos (Ulrich y Eppinger, 2012).	10
7. Tipos de Prototipos (Ulrich y Eppinger, 2012)	14
8. Riesgo técnico frente a costo de prototipos (Ulrich y Eppinger, 2012) . . .	15
9. Diagrama de Caja Negra.	20
10. Asignación de Bloques Físicos.....	20
11. Matriz Morfológica.....	22
12. Concepto Solución 1: Sistema de extrusión por tornillo.....	23
13. Concepto 2: Sistema de mezclado dispersivo.....	24
14. Concepto 3: Sistema de rodillos múltiples.....	24
15. Agrupación de bloques funcionales.....	26
16. Arquitectura de la máquina - Diagrama de cajas.....	27
17. Arquitectura de la máquina - Esquema de bloques principales.....	28
18. Diagrama de interacciones entre bloques principales.....	28
19. Sección transversal de un mezclador interno de laboratorio con rotores tipo roller (Canedo, 2017).....	29
20. Parámetros geométricos de la sección transversal de un mezclador interno (Canedo, 2017).	30
21. Representación geométrica del modelo de la cámara de mezcla (Bousmina, 2012).....	34

22.	Solución gráfica de la Ec. (21). Los parámetros corresponden a una resina PET procesada en un <i>Haake Rheomix 3000</i> con rotores tipo roller, $T_0 = 280^\circ C$ y $f = 0,75$, para diversos valores de velocidad de los rotores (rpm) (Canedo, 2017).	38
23.	Temperatura sobre la pared (estado estacionario) versus velocidad de los rotores para el caso ejemplificado en la Figura 20 (Canedo, 2017).	39
24.	Esquema de componentes mecánicos principales.	41
25.	Datos motorreductor V50H (http://tisatransmisiones.com.ar/).	42
26.	Características técnicas rodamiento 6205R (https://koyo.jtekt.co.jp/en/).	44
27.	Características técnicas acople A30 (http://www.gummiargentina.com/).	45
28.	Cámara de mezcla.	45
29.	Modelo 3D de los componentes situados en el flujo de fuerza de la máquina.	47
30.	Esquema de un sistema de controlador tipo <i>PID</i> , adaptado de (Mandado Pérez y otros, 2010).....	47
31.	Esquema eléctrico sistema de control de temperatura.....	48
32.	Perfiles de leva que conforman el rotor.....	50
33.	Mecanizado cámara de mezcla.	51
34.	Cámara de mezcla - Tapas Frontal y Trasera.	51
35.	Cámara de mezcla: montaje de resistencias.....	51
36.	Ejes y Engranajes de transmisión.....	52
37.	Caja porta engranajes.....	52
38.	Detalle Rotores.	52
39.	Equipo de Laboratorio para el Estudio de Procesamiento de Termoplásticos.	53
40.	Muestra obtenida luego de procesar una mezcla de Polipropileno y <i>Remafin Rosa PE 0330</i>	54
41.	Molino de rodillos 80E- <i>Exakt</i>	62
42.	Molino de rodillos 80 <i>Three Roll Mills</i>	63
43.	<i>CT Internal Mixer (Chareon Tut Co. LTD)</i>	65
44.	<i>CT Single-Screw Extruder(Chareon Tut Co. LTD)</i>	66
45.	<i>CT Twin-Screw Extruder(Chareon Tut Co. LTD)</i>	67

46. *CT Twin-Screw Extruder*: los tornillos son diseñados para diversas aplicaciones de materiales (*Chareon Tut Co. LTD*).67
47. *CT Two-Roll Mill*(*Chareon Tut Co. LTD*).68
-

Índice de Tablas

1.	Sistema de ponderación simple.....	18
2.	Jerarquización de las Necesidades del Cliente.....	18
3.	Especificaciones Técnicas Objetivo.	19
4.	Matriz de Selección de Conceptos	25
5.	Parámetros geométricos y técnicos del mezclador interno de laboratorio <i>Haake Rheomix 3000</i> con rotores de alta intensidad tipo <i>roller</i> (https:// www.thermofisher.com/).....	40
6.	Parámetros geométricos del mezclador interno de laboratorio.	40

1. INTRODUCCIÓN

Los materiales poliméricos se encuentran en constante desarrollo gracias a sus innumerables aplicaciones. Los polímeros comerciales o estándar son materiales ligeros, resistentes a la corrosión y al ataque químico, de baja resistencia y rigidez, y no son adecuados para uso a altas temperaturas. Sin embargo, son relativamente económicos y fácilmente conformables en una diversidad de formas. Por otro lado, los polímeros ingenieriles están diseñados para tener mejores prestaciones (mejor resistencia) a temperaturas elevadas. Estos últimos se producen en cantidades relativamente pequeñas y son costosos.

Los polímeros están compuestos por muchos átomos conectados entre sí formando largas cadenas. Se pueden clasificar de varias formas: según la manera en que las moléculas son sintetizadas, según su estructura molecular o según su familia química. Sin embargo, el método más utilizado para clasificarlos es en función de su comportamiento mecánico y térmico. De esta manera se los clasifica en: Termoplásticos, Termoestables y Elastómeros ([Askeland, 1998](#)).

En nuestra región, una de las aplicaciones de gran importancia que tienen estos materiales está relacionada con la protección/recuperación contra efectos de la corrosión de conductos tubulares usados en la industria del petróleo normalmente conocidos como “*tubings*”. Esta problemática es abordada en el *Proyecto FITR INDUSTRIA 15/2013 “Desarrollo de Compuestos Tubulares Patagónicos”* que forma parte del proyecto 04/I230, a cargo del Grupo de Estudio de Polímeros Sintéticos y Naturales (*GEPSyN*) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue.

Con este fin, se utilizan tubos de compuestos poliméricos de pequeño espesor de pared fabricados por extrusión, los cuales pueden ser colocados con algún grado de interferencia tanto en el interior como en el exterior de dichos elementos. De este modo se logra la protección de tubos nuevos y un importante incremento de la vida en servicio de tubos usados, que de otro modo deberían ser dejados fuera de servicio por problemas de corrosión.

Para esta aplicación son de especial interés los polímeros termoplásticos de uso general en la industria, en particular Polietileno (PE) y Polipropileno (PP). Estos se componen de largas cadenas producidas al unir moléculas pequeñas o monómeros. Se caracterizan

por tener un comportamiento dúctil, baja densidad, alta relación resistencia-peso, bajo costo, versatilidad de procesamiento y se pueden reciclar con facilidad. Al ser calentados a temperaturas elevadas, se ablandan y se conforman por flujo viscoso, lo cual limita su temperatura de servicio.

En particular, las propiedades de los compuestos poliméricos no sólo dependen de las características de cada componente, sino de la naturaleza de la interfase polímero-refuerzo. El agregado de refuerzo a la matriz polimérica mejora las propiedades del material, pero requiere un procesamiento de mayor complejidad que el de los polímeros puros.

Los estudios del comportamiento reológico de estos materiales durante su procesamiento se desarrollan en laboratorios y en función de los resultados obtenidos pueden ser escalados a niveles industriales. Para este fin, se utilizan equipos especiales que permiten manipular pequeñas cantidades de material y modificar las condiciones del proceso a fin de ajustar y optimizar las variables operativas. Considerando que los costos asociados a la adquisición de este tipo de equipamiento, son muy elevados, surge la necesidad de desarrollar y fabricar un prototipo de laboratorio que permita llevar adelante los estudios mencionados.

2. OBJETIVO

Diseño y fabricación de un equipo de laboratorio para el estudio de procesamiento de termoplásticos.

3. MARCO TEÓRICO

En este apartado se presentarán a modo conceptual, los aspectos fundamentales que hacen al desarrollo del proyecto. Se hará referencia a los siguientes temas: características de los termoplásticos, procesamiento de polímeros, normativa de referencia y metodología de proyecto. El primer paso en el análisis consiste en entender la física y la química de los polímeros orientado a la obtención del objetivo del presente trabajo.

3.1. Generalidades

3.1.1. Características de los termoplásticos

Los termoplásticos tienen la característica de alcanzar el estado líquido o líquido pastoso, por efecto de la temperatura. Este comportamiento se debe a su estructura molecular, la cual puede ser de tipo de cadenas covalentes lineales o ramificadas, unidas entre sí por enlaces débiles. Estas pueden conformarse en el espacio, desde una estructura completamente amorfa hasta un alto grado de ordenamiento cristalino, según alguna de las estructuras de Bravais (H. F. Brinson y C. L. Brinson, 2008). Sin embargo, este ordenamiento es parcial y los termoplásticos, con mayor capacidad de cristalización alcanzan alrededor de un 70 % de fracción cristalina, entre estos el Polipropileno (PP) y el Polietileno (PE).

Los materiales de estructura amorfa se comportan como rígidos a temperaturas menores que la temperatura de transición vítrea (T_g). En el caso de los semicristalinos, la posibilidad de llevarlos al estado líquido implica alcanzar temperaturas superiores a la temperatura de fusión de la fase cristalina (T_m). Esto se puede observar a partir de la variación del módulo de elasticidad E con la temperatura (ver Figura 1).

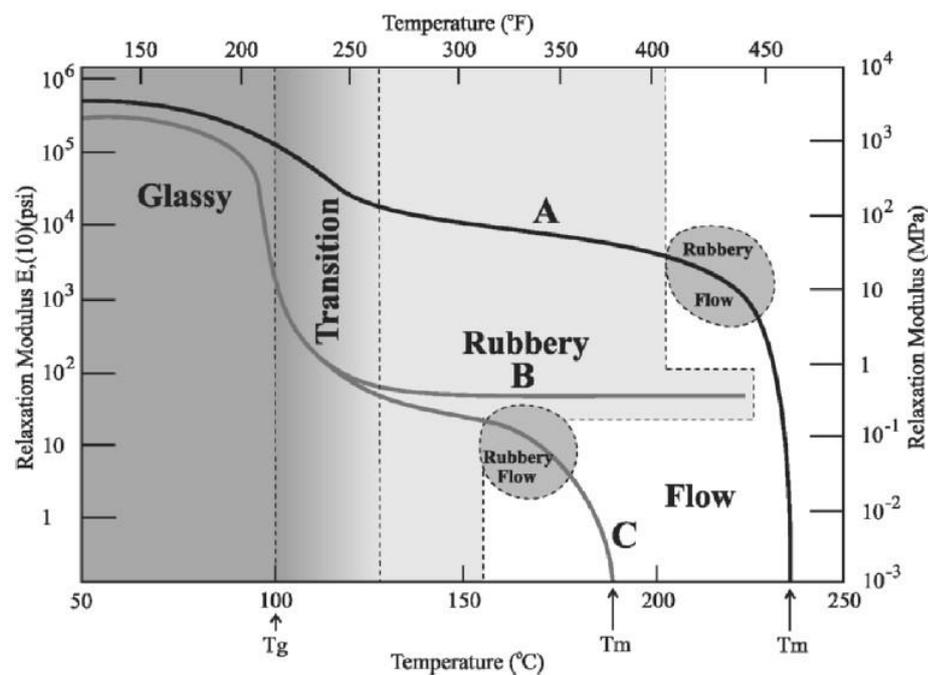


Figura 1. Módulo de elasticidad E para un poliestireno cristalino (A), un poliestireno ligeramente reticulado (B) y poliestireno amorfo (C) (H. F. Brinson y C. L. Brinson, 2008)

El comportamiento observado en la figura anterior, es la base de la mayoría de los métodos de procesamiento de mayor difusión para este tipo de materiales, entre los cuales se encuentra el moldeo por compresión, la extrusión, los procesos de inyección, el calandrado y mezclado.

La utilización industrial de los polímeros en general y de los termoplásticos en particular, no se limita solo a estos materiales en sí mismos, sino también a toda una serie de materiales compuestos, en los cuales el polímero hace las veces de matriz. Es decir, se incorporan refuerzos que van dispersos físicamente en esta, sin afectar a sus características estructurales (H. F. Brinson y C. L. Brinson, 2008).

Se pretende que los refuerzos sean altamente eficaces, de modo que se consigan los objetivos propuestos a un costo aceptable. El agregado de reforzantes se realiza a fin de mejorar ciertas propiedades, pero que puede ir en detrimento de otras, incluido el procesamiento, lo que determina la selección final de uno o varios aditivos en el comportamiento conjunto.

En general, la interacción entre aditivo y polímero implica la necesidad de una alta compatibilidad y miscibilidad, incluso a nivel molecular. Además, no debe ser volátil en las condiciones del proceso de transformación (tensión de vapor baja a altas temperaturas), ni tender a agregarse, de lo contrario daría lugar a un depósito del aditivo en forma de capa fina superficial, resultando en inconvenientes en la homogenización. No deberá exudar durante su vida en servicio dado que generaría problemas de estética y la pérdida de eficacia por eliminación del aditivo. Por último, no debe ser tóxico ni perjudicial para la salud del personal que lo manipule (Beltrán y Marcilla, 2012).

En los últimos años y por su potencial aplicación industrial, se ha prestado especial atención al desarrollo de los nanocompuestos Polímero/Arcilla (PNC por su sigla en inglés). Los mismos han sido planteados como solución a fin de mejorar el comportamiento mecánico de los termoplásticos involucrados a altas temperaturas, considerando que la máxima temperatura de trabajo para el PE es del orden de los 60 ° C y para el PP es del orden de los 75 ° C, en tanto que las condiciones de uso habitual de los “tubings” encamisados, en algunos casos pueden alcanzar temperaturas del orden de los 90 ° C y fuertes depresiones (Saad y col., 2017).

Existen tres formas de generar un compuesto Polímero/Arcilla, tal como se observa en

la Figura 2. La primera, es obtener un microcompuesto con proporciones de hasta 30 a 40 % de arcilla, con el fin de que se produzcan resultados significativos en la modificación de las propiedades físicas del polímero. La segunda, es obtener un nanocompuesto intercalado, para ello las moléculas del polímero se introducen entre las capas del refuerzo lo que se denomina intercalación. La tercera, es obtener un nanocompuesto exfoliado. En la exfoliación las nanoarcillas en capas pierden toda relación estructural entre ellas, permitiendo que las cadenas poliméricas las rodeen.

Los nanocompuestos combinan las ventajas de los termoplásticos con las del refuerzo mejorando sus propiedades mecánicas, pero requieren un procesamiento que puede implicar altas tensiones de corte incluso mayores que para otros materiales.

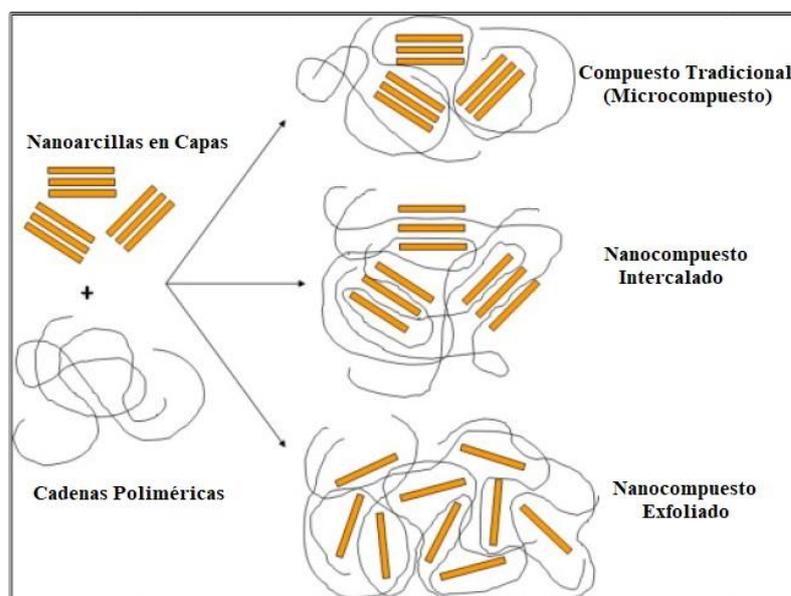


Figura 2. Tres formas de generar un compuesto Polímero/Arcilla (Saad y col., 2017)

3.1.2. Procesamiento de polímeros

El procesamiento de polímeros se define como una actividad de ingeniería relacionada con las operaciones realizadas en sistemas poliméricos para aumentar su utilidad. Principalmente, se trata de la conversión de la materia prima en un producto final, que implica no solo la conformación sino también la composición y las reacciones químicas que conducen a modificaciones macromoleculares y estabilización de la morfología, resultando así en estructuras de mayor valor.

El campo de aplicación de esta ciencia se ha analizado tradicional y consistentemente en términos de los métodos de procesamiento predominantes: extrusión, moldeo por inyección o por soplado, calandrado, mezclado, moldeo rotacional, entre otros.

Cada proceso, para la obtención de un producto final, comienza con el polímero generalmente suministrado en forma de pellet. El cual se va a conformar exitosamente solo después de una serie de operaciones preliminares o posteriores (ver Figura 3), sabiendo que la naturaleza de las mismas determina en gran medida la forma, el tamaño, la complejidad, la elección y el costo del equipo de laboratorio a desarrollar. Es por esto que resulta relevante la comprensión de dichas operaciones. Por lo general, se las refiere como pasos elementales del procesamiento de polímeros.

A continuación, se identifican cinco operaciones:

- Manejo de sólidos particulados.
- Fusión.
- Presurización y Bombeo.
- Mezclado.
- Desvolatilización y Pelado.

Una vez concluidas una o más de estas operaciones se obtiene el producto final mediante algún método de conformación. La selección de este depende de la geometría y aplicación del producto, y de la existencia de métodos alternativos más económicos. Los diversos métodos utilizados en la industria son:

- Extrusión.
 - Moldeado y Fundición.
 - Estiramiento.
 - Calandrado y Recubrimiento.
 - Revestimiento de molde.
-

El desglose estructural y secuencial, de las operaciones y métodos involucrados en el procesamiento de los polímeros, se basa firmemente en los principios de la ingeniería y la ciencia de los polímeros, a saber:

- Fenómenos de transporte.
- Transferencia de calor y masa.
- Reología del polímero fundido.
- Mecánica de sólidos.
- Propiedades de la mezcla.

Estos principios, proporcionan las herramientas básicas para analizar cuantitativa y cualitativamente el diseño y la fabricación del equipo de laboratorio para el estudio de procesamiento de termoplásticos.

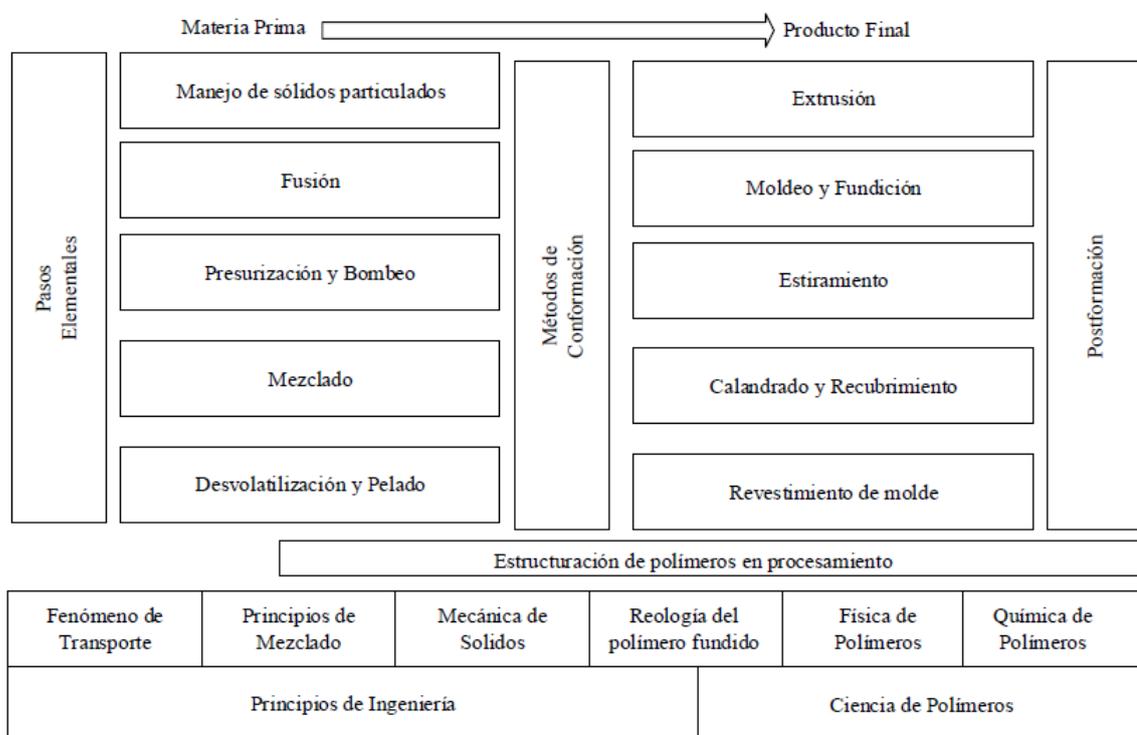


Figura 3. Desglose conceptual del proceso de fabricación de productos de base polimérica (H. F. Brinson y C. L. Brinson, 2008).

3.2. Normativa de Referencia

Para conocer datos técnicos y operativos que se utilizan a nivel mundial para la elaboración de las mezclas y que permiten estandarizar los trabajos de investigación, desarrollo, comparar las diferentes muestras y su respectivo control de calidad, se toman como referencia las siguientes normas:

- *ASTM D2396*. Standard Test Methods for Powder-Mix Time of Poly Vinyl Chloride (PVC) Resins Using a Torque Rheometer, ([ASTM-D2396-94, 2012](#)).
- *ASTM D2538*. Standard Practice for Fusion of Poly (Vinyl Chloride) (PVC) Compounds Using a Torque Rheometer, ([ASTM-D2538-18, 2018](#)).
- *ASTM D3182*. Standard Practice for Rubber—Materials, Equipment, and Procedures for Mixing Standard Compounds and Preparing Standard Vulcanized Sheets, ([ASTM-D3182-16, 2016](#)).

3.3. Metodología de diseño

El desarrollo de un producto es una secuencia de pasos y actividades que un grupo de trabajo, organización o empresa utiliza para concebir, diseñar y comercializar un producto o servicio. En este sentido, establecer un proceso de desarrollo bien definido es útil para tener en cuenta los recursos disponibles y las restricciones, al momento de planificarlo.

En el presente trabajo se sigue la metodología propuesta por los reconocidos autores ([Ulrich y Eppinger, 2012](#)). Si bien no es posible establecer con claridad dónde empieza y termina cada una de las etapas, una división y control del proceso de desarrollo será de utilidad a lo largo del proceso de diseño (ver Figura 4).

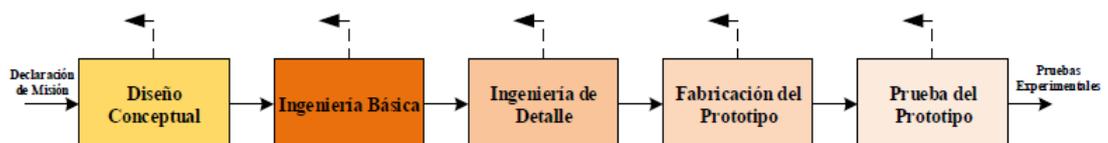


Figura 4. Metodología de diseño adaptada de ([Ulrich y Eppinger, 2012](#)).

Es importante destacar que las actividades propuestas se enmarcan en un proceso iterativo, en el cual en cualquier etapa de las antes mencionadas, se puede volver a una anterior

con el objetivo de encontrar la mejor solución.

3.3.1. Planificación del producto - Declaración de Misión

A la actividad de planificación se la suele denominar “fase cero”, porque precede a la aprobación del proyecto y lanzamiento del proceso real de desarrollo del producto. Esta fase comienza con la identificación de las oportunidades guiada por la estrategia corporativa, contemplando la evaluación de los avances tecnológicos y los objetivos de mercado.

Se pretende en esta fase poder definir la Declaración de Misión, donde se va a especificar cuál es el objetivo del producto tanto a nivel económico como de necesidades a satisfacer, también se pretende plantear las suposiciones y restricciones a las que estará sujeto el mismo.

3.3.2. Diseño Conceptual

En la fase de Diseño Conceptual se identifican las necesidades de los usuarios, se definen las especificaciones técnicas, se generan en un proceso de síntesis y evalúan conceptos alternativos, centrando la mirada en el funcionamiento y aspectos estructurales y tecnológicos básicos. Con el objetivo de facilitar su ejecución, (Ulrich y Eppinger, 2012) han propuesto una secuencia de tareas conforme a lo expuesto en la Figura 5.

Reconocidos autores en la temática como ser (Ulrich y Eppinger, 2012), (Pahl y Beitz, 2007) y (Ullman, 2010), coinciden en que los mayores esfuerzos del proceso de diseño deben concentrarse en esta etapa, dado que en la misma quedan definidas las bases de la performance y los costos asociados. A partir de allí, el proyecto adquiere una “rigidez” tal que, cualquier modificación necesaria en el mismo en las etapas de Ingeniería Básica y de Detalle, implican un significativo costo complementario. Específicamente en la sub-fase de Generación de Conceptos, dada su criticidad, (Ulrich y Eppinger, 2012) proponen una metodología detallada para su desarrollo tal como se presenta en la Figura 6.

Finalmente, luego aplicando metodologías aptas para el propósito, que incluyen dado el caso simulaciones simples y ensayos focalizados, se selecciona el concepto solución. El mismo se representa habitualmente por medio de esquemas gráficos a nivel de croquis acompañados de una memoria descriptiva.

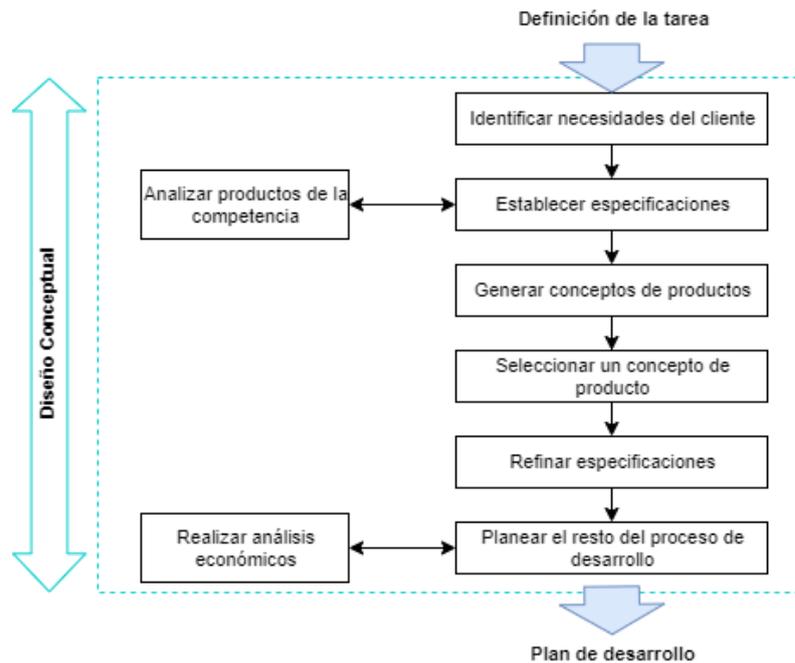


Figura 5. Subetapas en la fase de Diseño Conceptual (Ulrich y Eppinger, 2012).

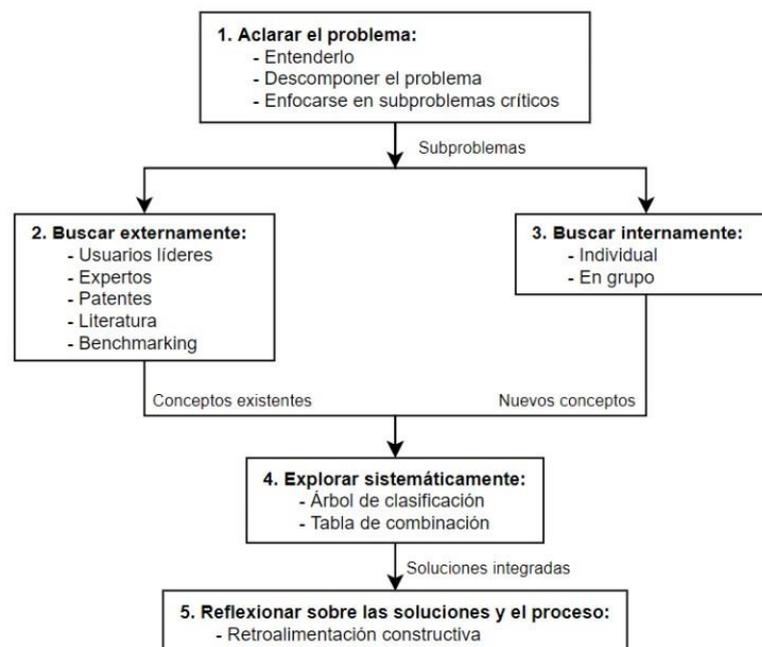


Figura 6. Método de Generación de Conceptos (Ulrich y Eppinger, 2012).

3.3.3. Ingeniería Básica

Una vez seleccionado el concepto solución, se determina la configuración de diseño global y definitiva del producto que permite obtener una visión general de los materiales,

las formas y dimensiones, y del proceso de fabricación. Estos tres elementos condicionan las decisiones de diseño de esta etapa y están estrechamente relacionados entre sí, dado que un diseño concreto puede requerir formas complejas para ser funcional o para reducir el número de piezas, pero su fabricación puede ser más costosa y compleja así como los materiales necesarios para su conformación.

Los trabajos en esta etapa son los que más se acercan a las actividades tradicionales de los departamentos de diseño. En ellas, profesionales que dominan las nuevas técnicas de modelización y simulación (CAD/CAE) así como las de prototipado y ensayo, desarrollan las piezas, elementos y conjuntos que compondrán el producto. Estas actividades son típicamente iterativas y se dirigen hacia la optimización (en función de los recursos humanos, materiales y de tiempo disponibles). En las fases de simulación y evaluación de las soluciones, conviene desarrollar prototipos funcionales y realizar una evaluación mediante ensayos (fiabilidad, durabilidad, etc).

Las metodologías clásicas dan recomendaciones y reglas básicas sobre cómo obtener en esta etapa soluciones correctas en ingeniería mecánica. Debe tenerse en cuenta dada la complejidad creciente de las máquinas, la necesidad de obtener índices de confiabilidad adecuados con consideraciones particulares sobre las denominadas técnicas *DfX* (*del inglés "Design for X"*) que se proponen con el fin de centrar el objetivo del diseño en algún factor X que la Empresa considere relevante. En general, este concepto suele estar relacionado con estrategias de la Ingeniería Concurrente (Riba, 2010).

Se suele hablar de diseño para: la fabricación, el ensamblaje, el mantenimiento, la fiabilidad, la seguridad, el medio ambiente, la reutilización, el reciclaje; por mencionar solamente los más relevantes. Con ello se enfatiza en el enfoque que la Empresa quiera darles a sus productos como elemento diferenciador de la competencia y de valor añadido, además de reducción de costos y aumento de flexibilidad en los procesos de producción.

Una de las metodologías de diseño utilizadas en Ingeniería Concurrente, particularmente las relacionadas con la productividad, es Diseño para Fabricación *DFM* (*del inglés "Design for Manufacturing"*), que se puede definir como una colección de programas, técnicas, métricas, herramientas y métodos para mejorar la fabricación de partes o simplificar el ensamble de productos, analizando valores, tolerancias, movimiento, complejidad y conveniencia para el ensamble manual, automático o flexible (robótico) para que se

adapte de manera óptima, a un sistema de fabricación particular, en cuanto a costo y calidad.

Mediante esta metodología se pretende que además del diseñador, personas del equipo de producción, e inclusive los proveedores, participen en el proceso de diseño, a fin de garantizar la fabricación. Sin embargo, no solo se utiliza, como se mencionó anteriormente, sino que es una herramienta de *benchmarking* que permite estudiar los productos de la competencia y cuantificar las dificultades de fabricación y ensamble.

El diseño para fabricación utiliza información de muchos tipos como: planos, especificaciones del producto y alternativas de diseño, un entendimiento detallado de los procesos de producción y ensamble, y una estimación de costos y volúmenes de producción, para lograr su objetivo último, que es obtener un artículo de alta calidad con el mayor aprovechamiento de los recursos. Por lo tanto, es necesaria la colaboración de miembros del equipo de desarrollo, así como de expertos externos a él ([Ulrich y Eppinger, 2012](#)).

Para la aplicación de *DFM* en general, es decir, sin especificaciones para un proceso, se pueden tener en cuenta los siguientes elementos:

1. Estimar el costo de fabricación.
2. Reducir el costo de componentes.
3. Reducir el costo de los ensambles.
4. Reducir el costo de producción
5. Considerar el impacto de las decisiones de *DFM* sobre otros factores.

Antes de llevar a cabo la selección del proceso, es necesario hacer algunas consideraciones en cuanto a los factores que afectan la selección del mismo, como:

1. Materiales: específicamente las propiedades mecánicas y físicas.
 2. Geométricos: entre los que se encuentran la forma, el tamaño y el peso de la pieza, y las tolerancias y acabados superficiales de la misma.
 3. Producción: entre los que están el tiempo de mercadeo, y la cantidad y la tasa de producción.
-

Finalmente el resultado de la Ingeniería Básica se da en forma de planos de conjunto o esquema de configuración, lista preliminar de piezas y, convenientemente, una memoria con los aspectos más relevantes del proceso de esta etapa (soluciones descartadas y motivos, resultados de las simulaciones y ensayos, prototipos, etc).

3.3.4. Ingeniería de Detalle

De acuerdo a la metodología propuesta, se considera a la Ingeniería de Detalle como la última etapa del proceso de diseño. Esta se desarrolla a partir de la definición proporcionada por la Ingeniería Básica en cuanto a los planos de conjunto y la memoria técnica, tiene como objetivo la elaboración de toda la documentación necesaria para la fabricación del producto. Como resultado del diseño de detalle se tienen los planos de las piezas y conjuntos específicos, la documentación de los componentes de mercado incorporados y la relación de piezas y conjuntos (o módulos), todos ellos con su denominación, número de referencia, número de piezas, material y otras especificaciones técnicas (sobre acabados, procesos, ensayos de recepción) o de gestión (normas de aplicación, proveedores, contratistas) (Riba, 2010).

Si bien la realización de prototipos funcionales obliga, en la etapa anterior, a que se realicen planos de detalle para su eventual construcción, en la Ingeniería de Detalle habrá que incorporar en el diseño definitivo los cambios y modificaciones derivados de los ensayos.

El diseño de detalle no debe limitarse al desarrollo de las tareas definidas al finalizar la Ingeniería Básica, sino que además tiene funciones propias como la comprobación de las funciones y la depuración de las soluciones para simplificar, eliminar o unificar elementos (diseño *DFM* de última hora). A menudo, las buenas soluciones se originan en etapas anteriores, pero su articulación efectiva suele tener lugar durante esta etapa.

Normalmente, se producen muchas interacciones entre las etapas de Ingeniería Básica y de Detalle, si bien es cierto que la partición del diseño en estas dos etapas es más de orden conceptual que práctico, hay que señalar que es improductivo realizar tareas de diseño de detalle antes de validar un producto con los ensayos correspondientes.

3.3.5. Pruebas y Refinamiento

La fase de pruebas y refinamiento comprende la construcción y evaluación de versiones múltiples de preproducción del producto.

(Ulrich y Eppinger, 2012) definen prototipo como una aproximación al producto en una o más dimensiones de interés. Con base en esta definición, cualquier entidad que exhiba al menos un aspecto del producto que es de interés para el equipo de desarrollo puede considerarse como un prototipo.

Según estos autores, los prototipos se pueden clasificar en dos dimensiones (ver Figura 7). La primera dimensión contiene dos grados, los *físicos* que son objetos tangibles y parecidos en aspecto al producto y los *analíticos* que representan el producto de manera matemática o visual con el objetivo de analizar uno o varios aspectos de interés. En la segunda dimensión, se encuentran los prototipos *integrales*, que son versiones a escala del producto, que ejecutan la mayor parte de los atributos, y los prototipos *enfocados* que realizan uno, o pocos, de los atributos de un producto con la finalidad de responder preguntas antes de pasar a uno del tipo integrado.

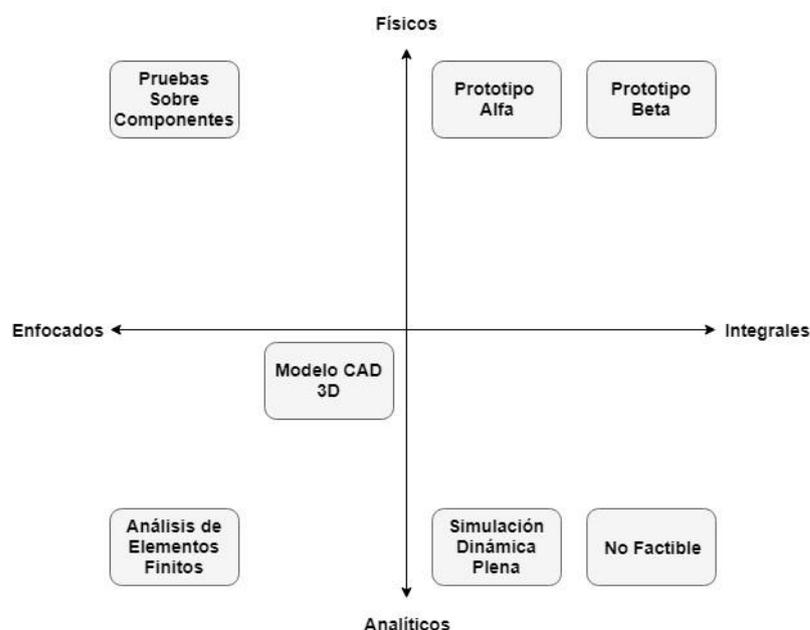


Figura 7. Tipos de Prototipos (Ulrich y Eppinger, 2012)

Un prototipo físico a veces exhibe fenómenos imprevistos que no están relacionados por completo con el objetivo original del prototipo, una razón para estas sorpresas es que todas las leyes de la física están operando en el equipo, sin embargo, aunque algunas de

las cualidades inesperadas son irrelevantes para el prototipo y molestas durante la prueba, algunas de éstas también se presentarán en el producto final. En estos casos, pueden servir como herramienta para detectar fenómenos perjudiciales inadvertidos que pueden aparecer en el producto final.

En contraste, los prototipos analíticos, en la mayoría de los casos, son más fáciles de modificar y permiten cambios más grandes pero nunca develan fenómenos que no son parte del modelo fundamental en el que se basa. Estos se usan para reducir el intervalo de parámetros factibles y luego los físicos se emplean para afinar o confirmar el diseño. Por esta razón, casi siempre se construye, al menos, un prototipo físico en un trabajo de desarrollo de un producto.

Las ventajas anticipadas de un prototipo al reducir el riesgo deben ponderarse respecto al tiempo y dinero necesarios para construir y evaluar el prototipo. Esto es particularmente importante para prototipos integrales. Los productos de alto riesgo o con incertidumbre por los altos costos de falla, nueva tecnología o la naturaleza revolucionaria del producto, se beneficiarán de estos prototipos. Por el contrario, los productos en que los costos de falla sean bajos y la tecnología sea bien conocida no tienen grandes ventajas por reducción de riesgo si se construyen prototipos. La Figura 8 muestra el riesgo de producir o no un prototipo físico integral versus el costo asociado a la construcción del mismo.

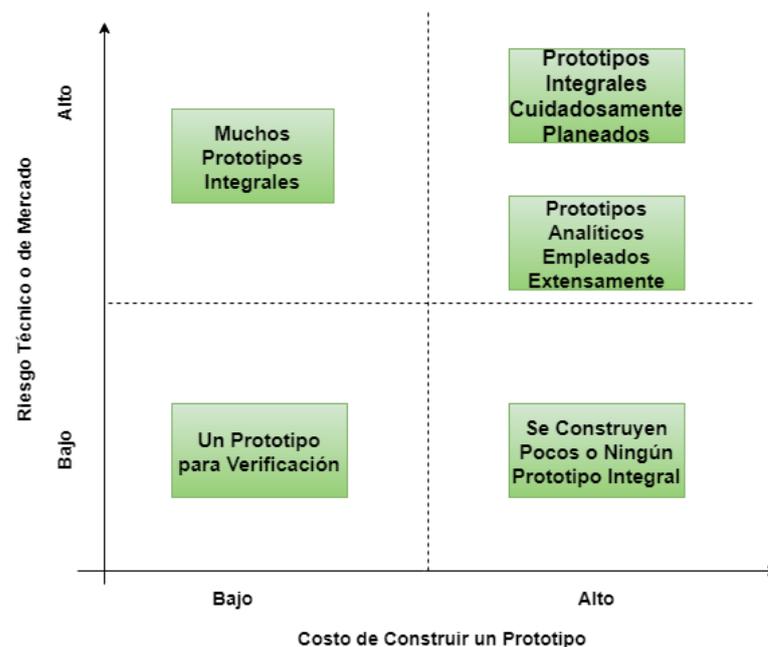


Figura 8. Riesgo técnico frente a costo de prototipos (Ulrich y Eppinger, 2012)

Otro de los objetivos para realizar un prototipo es integrar, es decir asegurar que los componentes y subsistemas funcionen como se espera, con esto en mente se usan prototipos físicos integrales. Los nombres usados para estos prototipos son alfa y beta. Los alfa se conforman con piezas cuya construcción no está asociada al proceso tecnológico definitivo, y se ensayan para determinar si el producto satisface requisitos específicos. Los beta, se construyen con las piezas definitivas del producto y son evaluados exhaustivamente en forma interna y también en el ambiente de uso por los clientes con el objetivo de obtener información sobre operación, confiabilidad y obtener mejoras para las especificaciones del producto final.

4. DESARROLLO

En esta sección se desarrollarán las distintas etapas definidas precedentemente, en la metodología proyectual, para el diseño y fabricación del equipo de laboratorio para el estudio de procesamiento de termoplásticos.

4.1. Planificación del Producto - Declaración de Misión

Como se mencionó en la introducción, el presente trabajo surgió de la necesidad del Grupo *GEPSyN* de construir un equipo de laboratorio para realizar estudios del comportamiento reológico de compuestos con matriz polimérica.

A continuación, se establece la Declaración de Misión del producto cuyos considerandos guiarán la ejecución del proyecto:

Título del Proyecto:

- Diseño y Fabricación de un Equipo de Laboratorio para el Estudio de Procesamiento de Termoplásticos.

Descripción del Producto:

- Equipo de laboratorio para realizar estudios del comportamiento reológico de compuestos con matriz polimérica.
-

Propuesta de Valor:

- Asistencia técnica a Empresas locales en el desarrollo de materiales poliméricos específicos para su aplicación en la industria petrolera.

Objetivos Clave de Negocio:

- Disminuir costos asociados.

Demandante:

- Laboratorios de desarrollo de materiales poliméricos.
- Empresas de manufactura de materiales poliméricos.

Suposiciones y Restricciones:

- Accionado por un motor eléctrico.
- Diseño modular de capacidad flexible.
- Componentes estándar disponibles en el mercado.
- Fabricación de componentes ad-hoc en empresas metalmecánicas de la zona.

Involucrados:

- Investigadores.
- Personal técnico de laboratorios.

4.2. Diseño Conceptual

En primera instancia, se procede a identificar las necesidades del Cliente (a partir de entrevistas), seguido de una búsqueda y análisis de productos existentes en el mercado (*benchmarking*), revisión de patentes y normativa de aplicación. Luego de definir las especificaciones técnicas objetivo que guiarán el desarrollo del proyecto, se proponen diversas alternativas y se selecciona el concepto de producto que continuará el proceso de desarrollo.

4.2.1. Identificación de las necesidades

Con el objetivo de establecer un canal directo de información, se realizó una entrevista con el responsable del *GEPSyN* (ver Anexo I: Identificación de Necesidades (A)). La misma se desarrolló, a partir de un cuestionario preestablecido orientado a conocer su opinión con respecto a sus expectativas del producto.

Del análisis de la información, se obtuvieron las necesidades interpretadas. Luego, para jerarquizar dichas necesidades se estableció la importancia relativa de estas. A tal fin se utilizó un sistema de ponderación simple adoptando la escala de valoración indicada en la Tabla 1.

Tabla 1. Sistema de ponderación simple.

Coficiente	Importancia Atribuida
1	Útil
2	Muy Útil
3	Importante
4	Muy Importante
5	Crítica

Luego de efectuar la ponderación descrita precedentemente, se obtienen las necesidades jerarquizadas, tal como se puede observar en la Tabla 2.

Tabla 2. Jerarquización de las Necesidades del Cliente.

N	Equipo de Laboratorio	Coficiente	Peso
1	Genera una mezcla homogénea.	5	22,7
2	Permite setear las condiciones operativas (temperatura, velocidad, torque, presión).	2	9
3	Obtiene un producto para postconformar.	1	4,6
4	Procesa la materia prima hasta alcanzar un estado líquido/pastoso.	5	22,7
5	Dosifica la cantidad de material a procesar.	3	13,6
6	Diseño modular.	3	13,6
7	Costo de referencia.	3	13,6
Sumatoria		22	100

4.2.2. Benchmarking

Una práctica común en la industria es la actividad de *benchmarking*, la cual involucra la recopilación de información sobre los productos o procesos de los competidores o de algunas empresas consideradas referentes en la temática bajo estudio. Esta información con frecuencia se recopila y se emplea como estándar de comparación para productos o servicios similares en cuanto a factores tales como diseño, calidad del producto, servicio postventa o procesos de producción (Spendolini, 1994).

En este caso particular, se analizaron diversos productos disponibles en el mercado internacional (ver Anexo II: *Benchmarking* (B)). Los productos analizados proporcionan información relevante al momento de definir las especificaciones técnicas objetivo y se constituyen, dado sus principios de funcionamiento, en alternativas base para el desarrollo del los conceptos solución.

4.2.3. Especificaciones Técnicas

A partir de la identificación de necesidades del cliente y del análisis de benchmarking se definieron las especificaciones técnicas objetivo (ver Tabla 3), las cuáles serán revisadas y completadas al final del proceso de diseño.

Tabla 3. Especificaciones Técnicas Objetivo.

N°	Métrica	Imp.	Unidades	Marginal	Ideal
1	Largo - Alto - Ancho	1	mm	500 - 200 - 450	
2	Control de Temperatura	1	Binaria	Sí	
3	Sistema de Calentamiento	1	Lista	Eléctrico	
4	Temperatura Máxima	1	°C	>150	300
5	Tiempo de Procesamiento	1	s	<3000	<1500
6	Volumen de Procesamiento	1	ml	>100	<500
7	Potencia del Motor	5	kW	>0,55	<3,8
8	Número de Vueltas	1	rpm	<300	100
9	Torque Máximo	1	Nm	>10	50

4.2.4. Funciones y Subfunciones

Como una primera aproximación al problema se elabora el diagrama de caja negra (ver Figura 9), para obtener una descripción general sin incurrir en ninguna solución física de

los elementos funcionales del producto. A partir de este, se representa la función general del producto que opera con flujos de material, energía y señales.

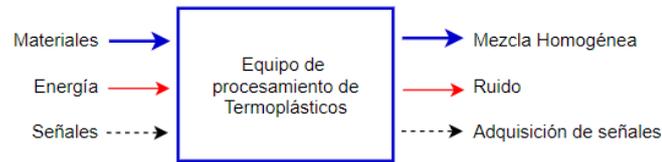


Figura 9. Diagrama de Caja Negra.

Dada la complejidad del problema, y tal como lo sugieren (Ulrich y Eppinger, 2012), se procede a desglosarlo en una serie de problemas más sencillos, con el objetivo de solucionarlos de manera enfocada. Siguiendo esta metodología, la caja negra se vuelve transparente definiéndose subfunciones para simplificar la tarea de generación de conceptos (ver Figura 10).

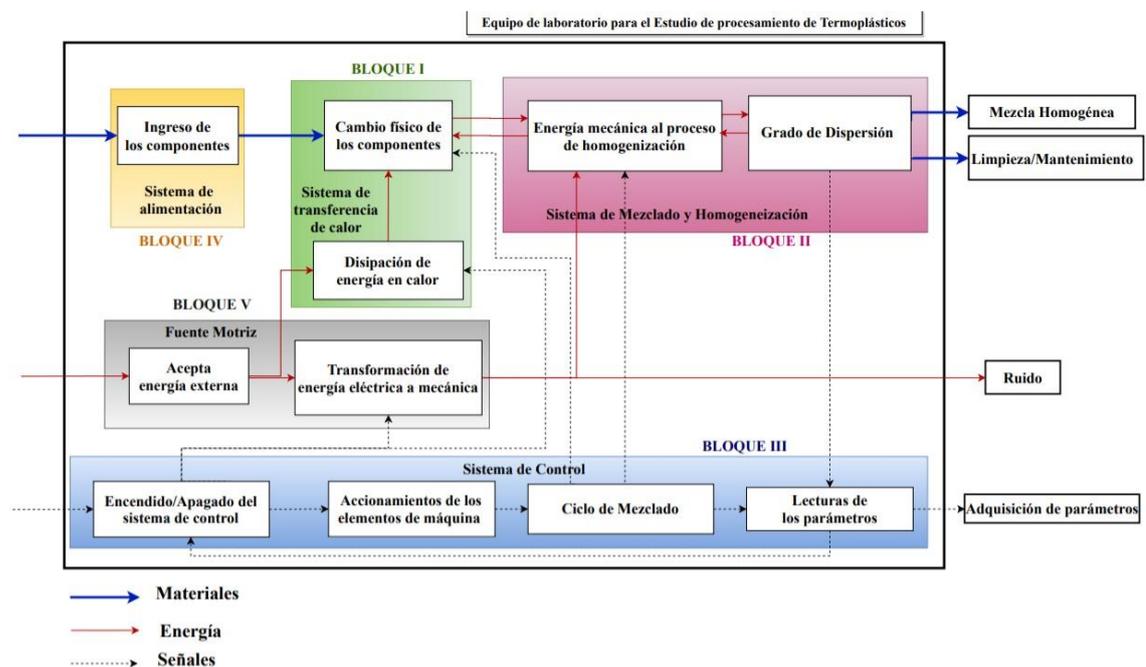


Figura 10. Asignación de Bloques Físicos.

En la figura anterior, se pueden observar los siguientes bloques funcionales:

- Bloque I - Sistema de transferencia de calor: provee parte del calor necesario para producir el cambio de estado de sólido a fundido.

- Bloque II - Sistema de mezclado y homogeneización: permite alcanzar un grado de dispersión y homogeneización aceptable a partir de la generación de altas tensiones de corte.
- Bloque III - Sistema de Control: es un conjunto de dispositivos encargados de administrar, ordenar, dirigir o regular el comportamiento de la máquina.
- Bloque IV - Sistema de alimentación: carga la materia prima en condiciones aptas para su procesamiento.
- Bloque V - Fuente motriz: recibe la energía externa proporcionada al sistema y la convierte en energía mecánica utilizada para el procesamiento.

4.2.5. Generación de Conceptos Solución

Para la generación de conceptos solución se desarrolló una Matriz Morfológica según la propuesta dada por (Ullman, 2010). La misma tiene un carácter sistemático que combina las diversas soluciones propuestas para cada una de las subfunciones definidas precedentemente.

Las alternativas propuestas se fundamentan en los requerimientos establecidos en etapas anteriores, estudios de máquinas similares (benchmarking) y las restricciones impuestas por el cliente, principalmente en cuanto a los costos asociados para su fabricación y puesta en marcha.

Como puede observarse en la Figura 11, del análisis realizado, se obtienen tres conceptos solución:

- Concepto 1: Sistema de extrusión por tornillo.
 - Concepto 2: Sistema de mezclado dispersivo.
 - Concepto 3: Sistema de rodillos múltiples.
-

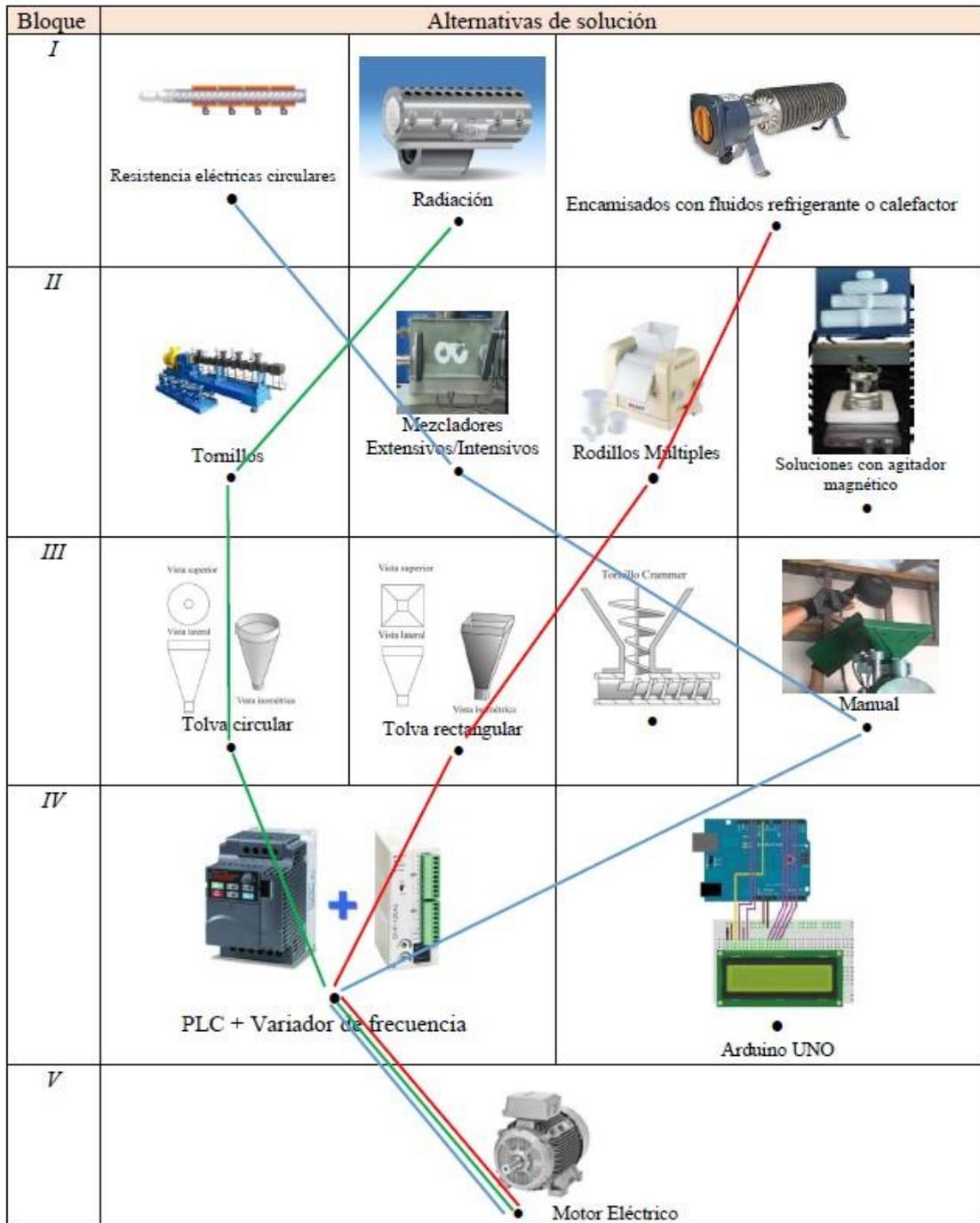


Figura 11. Matriz Morfológica.

Concepto Solución 1: Sistema de extrusión por tornillo.

El sistema de transferencia de calor utiliza un cilindro calefaccionado con resistencias eléctricas circulares. Se plantea una sectorización (al menos en tres zonas) para conseguir un adecuado gradiente de temperatura.

El sistema de mezclado y homogenización es el bloque de mayor importancia, en este caso se adopta un tornillo el cuál permite realizar ajustes en la geometría para adaptarse a los requerimientos de procesamiento.

En el caso del sistema de alimentación, se decide utilizar un sistema de tolva para el ingreso por gravedad del material a procesar.

Un Controlador Lógico Programable (*PLC*) será el encargado controlar todas las variables del proceso, incluido el accionamiento del motor eléctrico acoplado al sistema de tornillo.

En la Figura 12, se presenta un esquema del concepto solución propuesto.

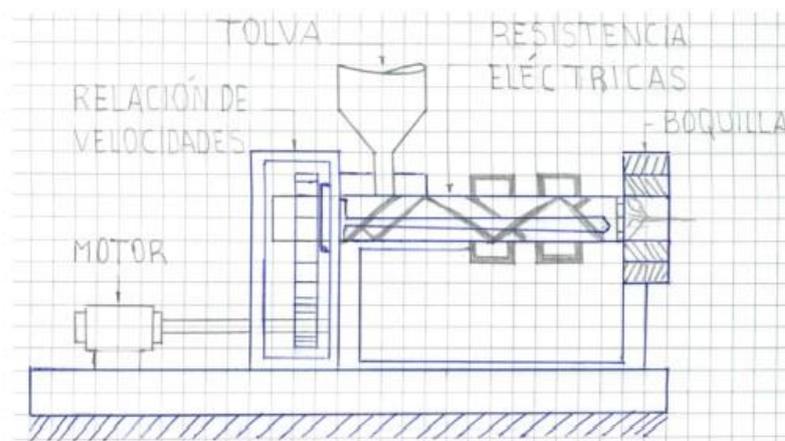


Figura 12. Concepto Solución 1: Sistema de extrusión por tornillo.

Concepto 2: Sistema de mezclado dispersivo.

Al igual que en el concepto anterior, el sistema de transferencia de calor se compone de una serie de resistencias eléctricas circulares en zonas periféricas con posibilidad de ajustar las secuencias de calentamiento según las temperaturas de procesamiento.

En este caso, para el sistema de mezclado y homogenización se selecciona un sistema tipo estator-rotor capaz de generar las tensiones de corte necesarias para un adecuado procesamiento del material (ver Figura 13). Este sistema tiene como principal ventaja la posibilidad de definir un diseño modular que permita instalar diversas geometrías del

conjunto estator-rotor (por ejemplo, tipo: *Roller, Cam, Banbury, Sigma*, entre otras).

En este caso también se adopta un Controlador Lógico Programable (*PLC*) para controlar todas las variables del proceso, encargándose del accionamiento del motor eléctrico acoplado mediante una adecuada transmisión al sistema rotor.

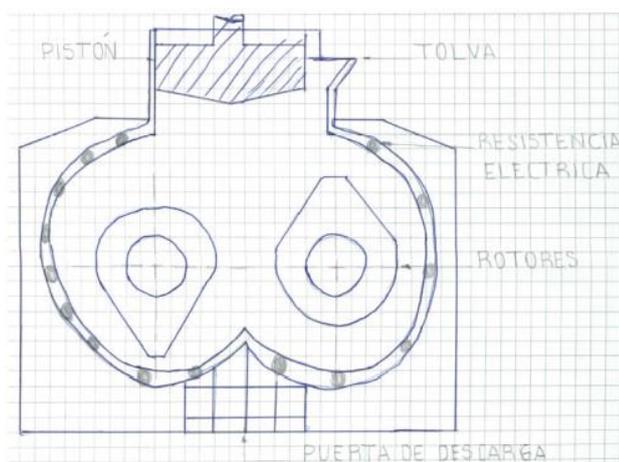


Figura 13. Concepto 2: Sistema de mezclado dispersivo.

Concepto 3: Sistema de rodillos múltiples.

En este caso, el mezclado y homogeneización de la mezcla se realiza por el movimiento de una serie de rodillos, accionados por un motor eléctrico, regulados de forma tal que permitan impartir una adecuada presión (ver Figura 14).

La temperatura en la zona de mezclado se incrementa debido a la transferencia de calor de un fluido calefactor que circula a través de una cámara contigua. El sistema de control empleado es análogo a los dos conceptos solución descriptos anteriormente.

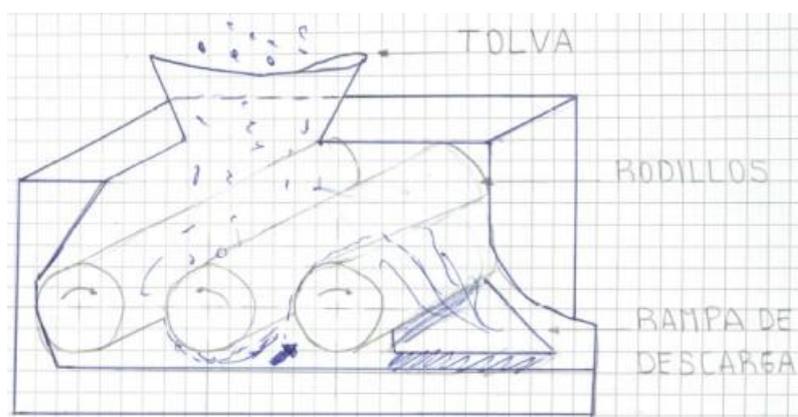


Figura 14. Concepto 3: Sistema de rodillos múltiples.

4.2.6. Selección del Concepto Solución

Para la selección del Concepto Solución se utiliza la matriz de selección de conceptos. Esta metodología, propuesta por (Pugh, 1991), realiza una evaluación relativa de cada uno de los aspectos que el equipo de diseño considera más importantes. Tomando como base un concepto solución de referencia, se comparan los atributos de los restantes conceptos considerando que los atributos son: mejor que (+), igual a (0) o peor que (-). En la Tabla 4 se presenta la matriz con los criterios de selección adoptados y el posicionamiento de cada uno de los conceptos solución.

Tabla 4. Matriz de Selección de Conceptos

Criterio de Selección	Concepto		
	1	2	3
Sistema de Mezcla y Homogeneización	0	+	-
Sistema de Control	0	0	0
Sistema de Calentamiento	0	0	-
Factibilidad de Fabricación	0	-	+
Modularidad	0	+	0
Costo de Fabricación	0	0	+
	0	1	0
Ranking	2	1	3

Cómo puede observarse en la tabla anterior, el Concepto solución 2 es el que ocupa el primer lugar del *ranking*. Si bien las diferentes geometrías que puede adoptar el conjunto rotor-estator presupone una dificultad al momento de fabricar los componentes, el peso relativo de este criterio no se considera determinante. En contraposición, las ventajas asociadas a la mezcla y homogeneización son determinantes junto a la flexibilidad que permite el diseño modular de estos sistemas.

Para usos experimentales en laboratorios, cuenta con la ventaja de poder procesar muestras pequeñas en relación con la geometría de la cámara, regular adecuadamente la velocidad angular y tensiones de corte de forma tal que garantice la exfoliación de los agregados, agentes o *Masterbatch* en la matriz polimérica (Paul y otros, 2004).

También se debe mencionar, como aspecto negativo, que este tipo de diseños no permite obtener productos finales con formas predefinidas, ni siquiera formas simples como pellets o hilos. Esto se debe a que el proceso se aplica a una cantidad fija de material en

un sistema cerrado en régimen estacionario, por lo que para obtener la forma final del producto se recomienda que vaya a otra etapa de postprocesamiento.

A continuación, se presenta una descripción general del funcionamiento de la máquina a partir del concepto solución seleccionado.

4.2.7. Arquitectura de la máquina

La arquitectura de la máquina se comienza a materializar a lo largo de la fase conceptual, de acuerdo a las etapas desarrolladas desde las especificaciones técnicas, análisis funcional y la asignación de los bloques físicos según el Concepto Solución seleccionado. Complementariamente se deben definir las interfases entre los diferentes bloques.

Es de interés, como una primer aproximación, analizar y eventualmente combinar los bloques que presentan cierta afinidad entre sí (ver Figura 15).

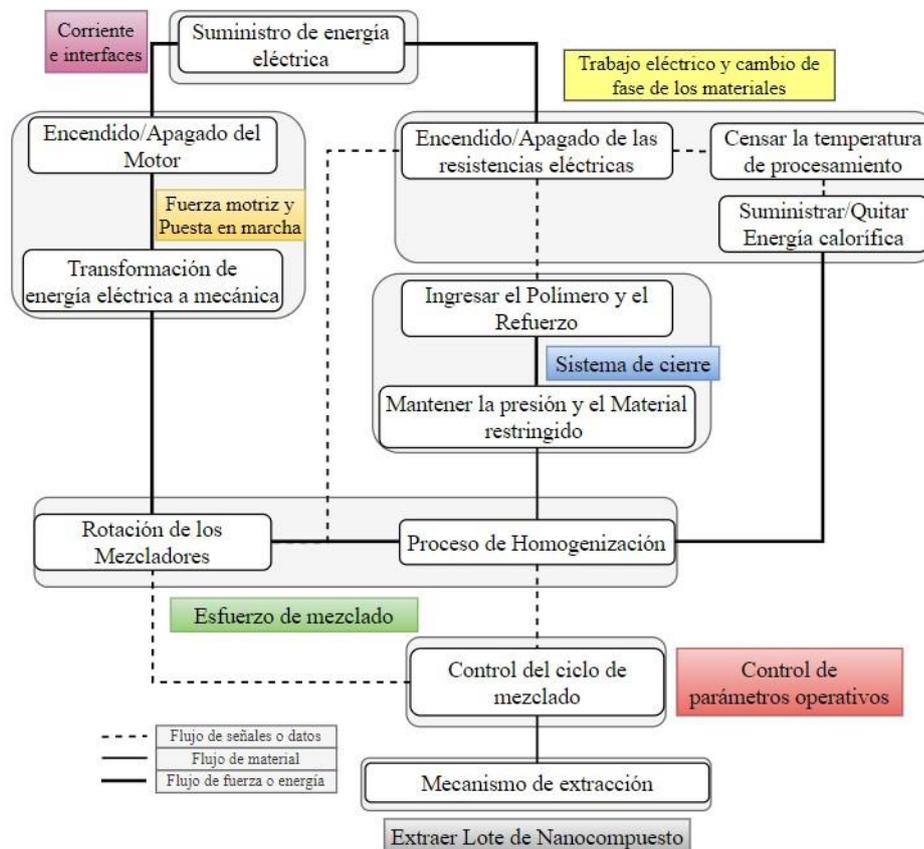


Figura 15. Agrupación de bloques funcionales.

Dado el concepto seleccionado, y la flexibilidad que debe tener la máquina para ser

adaptada fácilmente a diversas condiciones de laboratorio, se opta por una arquitectura modular (Ulrich y Eppinger, 2012). Por lo tanto, la modularidad se debe orientar a un diseño que permita intercambiar diversos tipos de rotores sin realizar cambios sustanciales en los componentes principales de la máquina. De esta forma, se pueden realizar diversas pruebas en el Laboratorio, identificando cuáles son las geometrías que mejor se adecuan al proceso de mezcla para condiciones dadas del proceso.

En la Figura 16 se representa, a través de un diagrama de cajas, una primera aproximación de la distribución espacial de los bloques funcionales de la máquina.

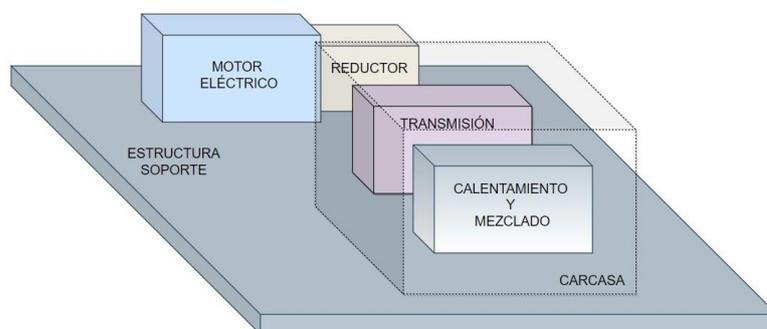


Figura 16. Arquitectura de la máquina - Diagrama de cajas.

A continuación, se expone en la Figura 17 un esquema 2D donde se identifican los bloques físicos principales, según el siguiente detalle:

- Motor eléctrico.
- Reductor.
- Transmisión por engranajes (para sincronizar el giro de los rotores).
- Ejes de rotores.
- Rotores.
- Carcasa principal:
 - Sistema de alimentación.
 - Cámara de mezcla - Estator.
 - Zona de calentamiento (resistencias).

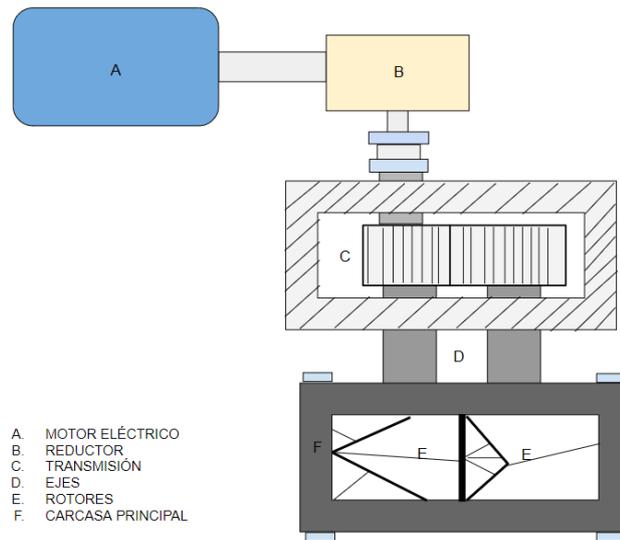


Figura 17. Arquitectura de la máquina - Esquema de bloques principales.

El bloque asignado al sistema de control, si bien no está representado en los bosquejos de la arquitectura, se relaciona con cada uno de los bloques físicos detallados a través de las interfases específicas y el tablero principal.

Para comprender mejor las interfases que deben ser contempladas en el desarrollo de la máquina, se identifican las interacciones conocidas entre los bloques agrupados (ver Figura 18).

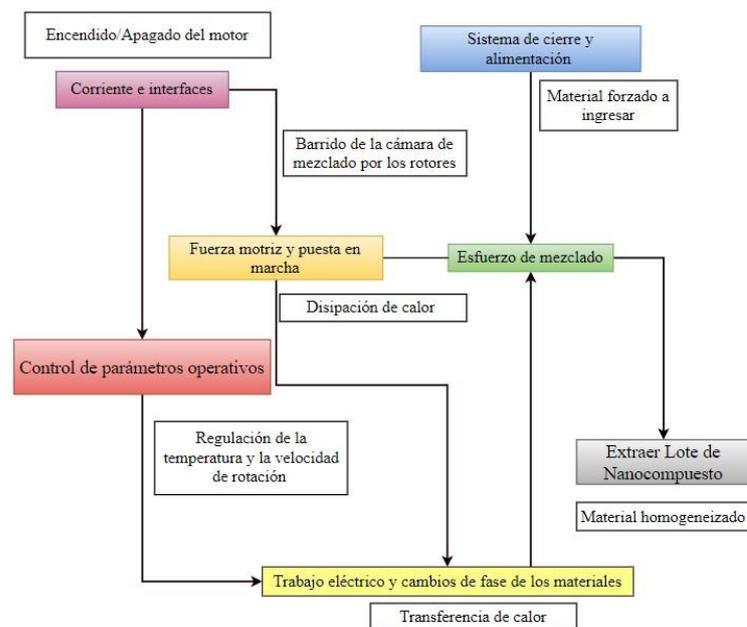


Figura 18. Diagrama de interacciones entre bloques principales.

En el cuadro anterior se distinguen dos categorías de interacciones:

- Fundamentales: son las que corresponden a las líneas del esquema que conectan los bloques entre sí.
- Inicidentales: resultan de la relación física particular de los elementos funcionales o debido al arreglo geométrico de los mismos.

La cámara de mezcla está formada por dos medias cámaras interconectadas. Centrados en los ejes de las medias cámaras, giran los rotores en direcciones opuestas (contra rotación). La Figura 19 ilustra la sección transversal de la cámara del mezclador interno.

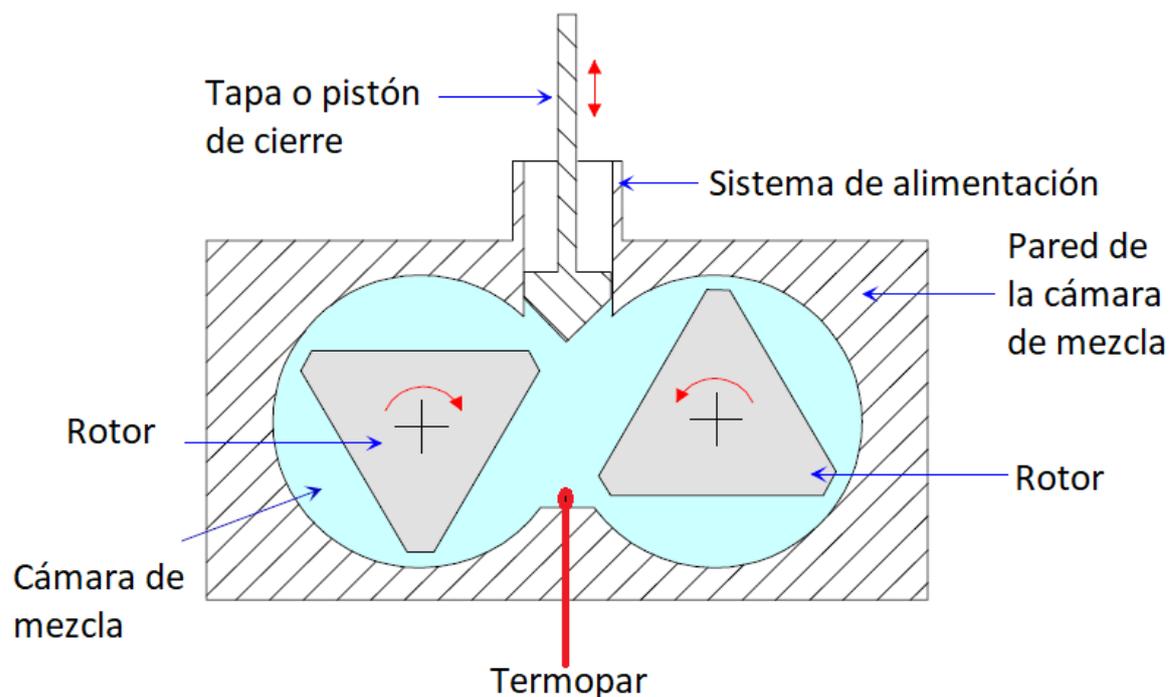


Figura 19. Sección transversal de un mezclador interno de laboratorio con rotores tipo roller (Canedo, 2017).

El sistema de alimentación situado entre las dos medias cámaras, dotada de un sistema de cierre tipo pistón, permite incorporar el material en la cámara de mezcla antes y durante el procesamiento. El mezclador interno de laboratorio no posee una puerta de descarga. Al final del ciclo de procesamiento el material procesado es retirado de forma manual.

Los parámetros geométricos relevantes, según se indican en la Figura 20, son:

- Diámetro de las medias cámaras D , denominado simplemente diámetro del mezclador.
- Longitud axial de la cámara L . Se recomienda para este tipo de equipos $L \approx 1,2D$.
- Separación entre centros L_C . En la mayoría de los mezcladores $L_C \geq D$.
- En el caso de los rotores se debe tener en cuenta:
 - Diámetro máximo D_{max} .
 - Diámetro del núcleo o Diámetro mínimo D_{min} .
- La geometría de la cámara en conjunto con la de los rotores definen, según las Ecs. (1) y (2):
 - Profundidad máxima del canal H_{max} .
 - Espesor del gap δ_F .

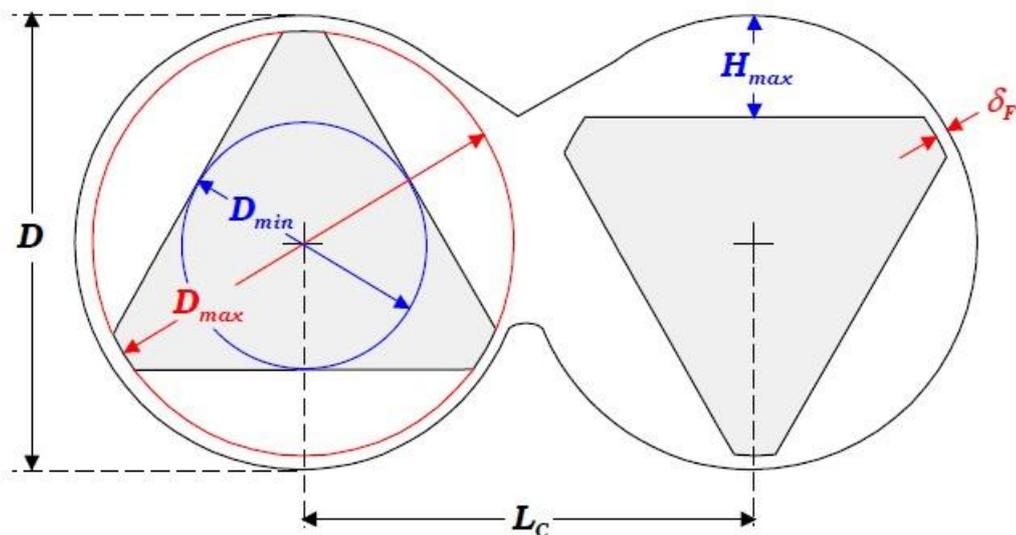


Figura 20. Parámetros geométricos de la sección transversal de un mezclador interno (Canedo, 2017).

$$H_{max} = \frac{1}{2}(D - D_{min}) \quad (1)$$

$$\delta_F = \frac{1}{2}(D - D_{max}) \quad (2)$$

Otro parámetro geométrico de gran importancia es el volumen libre de la cámara de procesamiento V_F (o volumen máximo de material que puede ser procesado). También se requiere, en los modelos de cálculo, una estimación del área A de pared interna de la cámara (esta superficie es a través de la cual el material intercambia calor desde el interior de la cámara hacia el exterior).

La velocidad de rotación de los rotores es una condición operacional; en la mayoría de los mezcladores internos los mismos giran en direcciones opuestas y a diferentes velocidades. La relación de velocidades g es una característica del mezclador. Se recomienda adoptar valores de $g > 1$ para evitar la sucesión geométrica de las puntas de los rotores en la zona de interacción (ver Figura 20). La variación constante en esta configuración a lo largo del ciclo de procesamiento, supuestamente, maximiza el grado de distribución de la mezcla en la cámara de procesamiento.

Comunmente se adopta en los mezcladores de laboratorio una relación $g = 1,5 : 1$, es decir que el rotor más rápido gira a una velocidad un 50 % mayor el rotor más lento. La velocidad nominal de los rotores N se define como la velocidad del rotor más rápido y es también un parámetro operativo.

Este tipo de equipos comunmente es equipado con un sistema de calentamiento encargado de controlar la temperatura de la pared de la cámara T_0 ; en nuestro caso se decidió instalar un sistema de resistencias eléctricas.

Los mezcladores internos se operan con la cámara de mezclado parcialmente completa. La masa m del material a procesar se determina a partir del factor de llenado f (o fracción del volumen libre de la cámara ocupada por el material). Una correcta operación del equipo requiere que f se mantenga durante todo el ciclo de procesamiento en valores próximos a $0,75 \pm 0,15$. La masa de material y el factor de llenado se relacionan a través de la siguiente expresión:

$$m = \rho f V_F \quad (3)$$

Donde ρ es la densidad del material y V_F es el volumen libre de la cámara de procesa-

miento. La densidad depende del estado físico, temperatura y composición del material. Dado que la masa de material procesado y el volumen libre son constantes, el factor de llenado varía durante el procesamiento. Por lo que representa un desafío mantener el valor de f dentro de los límites aconsejados durante todo el ciclo de procesamiento.

Finalmente, el tiempo de procesamiento t_p es otra condición operativa. La posibilidad de extender el procesamiento indefinidamente, con el tiempo de procesamiento limitado solo por la estabilidad térmica del material, es una de las características más importantes de los mezcladores internos, y es el fundamento de que se seleccione este equipo para su uso en investigación y desarrollo de materiales, en situaciones donde se desconoce el tiempo de procesamiento óptimo.

Con esta primer aproximación a la arquitectura de la máquina, se puede pasar a las siguientes etapas del desarrollo del producto, en las cuales aumentará el nivel de detalle del mismo hasta alcanzar su materialización.

4.3. Ingeniería Básica

Una vez que la arquitectura de la máquina ha sido consolidada, con relación a los elementos principales, se procede a la selección de los tipos estandarizados o comerciales, y para aquellos que no cumplen con esta condición, se avanza con el diseño preliminar y predimensionamiento correspondiente, con la definición provisional de materiales y procesos tecnológicos asociados.

4.3.1. Predimensionamiento

A partir de las técnicas de escalabilidad (*scale-up / scale-down*), de datos operativos y de información de diseño de máquinas similares, se pueden determinar las dimensiones geométricas características de la máquina y los requerimientos de suministros de energía necesarios para procesar el polímero (Manas-Zloczower, 2009) (Tadmor y Godos, 2006).

La metodología propuesta se basa en el Teorema de *Buckingham*, el cual permite relacionar variables adimensionales que describen una correlación física específica. Si la correlación física existe entre un número z de parámetros a_i , independientes entre sí, se

tiene:

$$f(a_1, a_2, \dots, a_z) = 0 \quad (4)$$

La expresión anterior se puede reducir a:

$$f(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_p) = 0 \quad (5)$$

Donde p es la cantidad de variables características adimensionales Π_k que son independientes entre sí y resultan del producto de los parámetros a_i de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\Pi_k = a_1^{\xi_1} \cdot a_2^{\xi_2} \dots a_z^{\xi_z} \quad (6)$$

Los exponentes ξ_i deben ser seleccionados de forma tal que se cumpla:

$$[\Pi_k] = 1 \quad (7)$$

La cantidad de variables características viene dada por:

$$p = z - r \quad (8)$$

Donde r es el número de parámetros con dimensiones independientes. Para problemas estáticos y cinemáticos $r = 2$, para problemas dinámicos $r = 3$, y para problemas termodinámicos $r = 4$.

El Teorema de *Buckingham* solamente especifica el número de expresiones adimensionales (números característicos) pero no su forma. En el caso de la aplicación de los métodos *scale-up* o *scale-down*, los números característicos del sistema modelo y del de producción deben ser idénticos. Estos se determinan a partir de ensayos experimentales o análisis teóricos adicionales (por ejemplo: Ley de Conservación de la Energía).

A continuación, se desarrollan las ecuaciones necesarias para modelar los mezcladores internos, y aplicar sobre estas ecuaciones características la metodología de escalabilidad propuesta.

En primer término se define como variable adimensional característica el factor de

llenado f , que se obtiene a partir de la Ec. (3).

Dada la arquitectura modular propuesta, prestando especial atención a la intercambiabilidad de los rotores, se analiza el sistema según la propuesta de (Bousmina y col., 1999) (Bousmina, 2012) en la cual se define un modelo simplificado de mezclador compuesto por dos cavidades cilíndricas idénticas paralelas de radio R_b . Cada una de ellas representa la mitad de la cámara de mezcla. Dentro de las mismas giran a velocidad nominal N dos cilindros coaxiales (rotor modelo) de radio R_e (ver Figura 21).

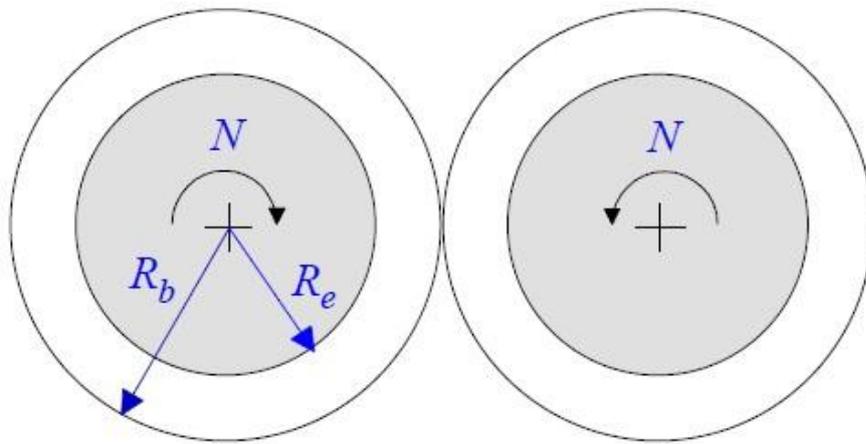


Figura 21. Representación geométrica del modelo de la cámara de mezcla (Bousmina, 2012)

La longitud axial del mezclador modelo L se selecciona de tal forma que el volumen total iguale el volumen ocupado por el mezclador real. Se calcula a partir del factor de llenado y queda definido por:

$$2\pi R_b^2(1 - \kappa^2)L = fV_F \quad (9)$$

Donde:

$$\kappa = R_e/R_b. \quad (10)$$

El flujo estacionario isotérmico de un fluido, que sigue la Ley de Potencias, dentro de la cámara de mezcla puede ser analizado a partir de la tasa de disipación mecánica (Bird

y col., 1987):

$$\dot{E} = A_n(\kappa) f V_F N^{1+n} \frac{\eta_0}{\lambda_0} \exp\{-n\beta(T - T_0)\} \quad (11)$$

Siendo:

$$A_n(\kappa) = \frac{(4\pi)^{1+n} \kappa^2}{n^n (1 - \kappa^{2/n})^n (1 - \kappa^2)} \quad (12)$$

El exponente n se asume independiente de la temperatura. La consistencia de la masa fundida se expresa en términos de la viscosidad de cizalla η_0 y del tiempo característico λ_0 , ambos medidos a una temperatura de referencia T_0 y un coeficiente de temperatura β . Estos parámetros del material pueden ser obtenidos a partir de curvas que relacionan datos experimentales (viscosidad, velocidad de corte y temperatura). La temperatura de referencia (definida de manera arbitraria) se asume igual a la temperatura constante de la pared de la cámara del mezclador.

Bajo las condiciones de velocidad de corte moderada, que se encuentran en las operaciones típicas del mezclador interno, algunos polímeros se funden como fluidos Newtonianos. En este caso, $n=1$ y la Ec. (11) se reduce a:

$$\dot{E} = A_1(\kappa) f V_F N^2 \eta_0 \exp\{-\beta(T - T_0)\} \quad (13)$$

con:

$$A_1(\kappa) = \frac{(4\pi)^2}{(1 - \kappa^2)^2} \quad (14)$$

El parámetro desconocido κ se determina fijando la tasa de disipación de energía en el modelo, Ecs. (11) o (13), igual al valor medido en el sistema real, que puede expresarse en términos del valor nominal del torque Γ y la velocidad del rotor N como:

$$\dot{E} = 2\pi N \Gamma \quad (15)$$

Los mezcladores de laboratorio operan influenciados fuertemente por la fricción, que depende del tipo de rotor, el torque y la velocidad de operación. Sin embargo, la Ec. (15) es válida cuando se utilizan en los cálculos los valores reportados durante el funcionamiento

de la máquina (Canedo y col., 2014).

Si se obtiene un ajuste razonable para κ , independiente de los parámetros del material y condiciones de procesamiento, el modelo se considera apropiado para el mezclador interno de laboratorio en cuestión. En este caso, el *gap* u holgura del mezclador es equivalente a:

$$He = (1 - \kappa)R_b \quad (16)$$

El modelo presentado anteriormente supone una temperatura de fusión uniforme T , que, por supuesto, no es cierta. De todos modos, se considera una muy buena aproximación si se adopta la temperatura promedio \bar{T} del material dentro de la cámara de procesamiento.

Este tipo de mezcladores generalmente funcionan a una temperatura de pared constante muy por encima de la temperatura de fusión del material. Una vez que los materiales se agregan al mezclador, el calor se transfiere desde la pared del mezclador para fundir el material, y la temperatura del material aumenta. Durante este proceso, se suministra energía tanto desde las resistencias dentro del mezclador como desde el calentamiento viscoso generado por la fusión del polímero debido a la rotación de los rotores (Bai y col., 2011).

Después de que la temperatura del material alcanza la temperatura de la pared, la temperatura continúa aumentando debido al calor generado dentro del mezclador por disipación viscosa hasta alcanzar un estado térmico pseudo estable. En este punto, la energía se suministra mediante calentamiento viscoso a la masa fundida y el calor se transfiere desde la masa fundida de polímero a la pared del mezclador. Cuando se alcanza el estado térmico pseudo estable, la velocidad de transferencia de calor a través de la pared es igual a la potencia consumida.

Para mantener la temperatura de la pared constante, el calor proveniente del polímero fundido debe extraerse de la pared del mezclador instantáneamente. Considerando en este caso, que el mezclador a desarrollar es un equipo de Laboratorio (equipo de pequeño volumen), se puede asumir que el mismo es refrigerado por el aire circundante. Es decir, el calor extraído por convección natural es suficiente para mantener la temperatura de la pared constante, teniendo en cuenta que los materiales a mezclar tienen baja viscosidad.

En las condiciones dadas, el balance de energía por unidad de tiempo del sistema, se puede modelar como un sistema cerrado en régimen estacionario:

$$\dot{E}_{\infty} = UA(\bar{T}_{\infty} - T_0) \quad (17)$$

En la expresión anterior, U es el coeficiente de transferencia del calor promedio en el seno del polímero y A es el área de la cámara de mezcla utilizada para definir U , reemplazando en la Ec. (11):

$$A_n(\kappa)fV_F N^{1+n} \frac{\eta_0}{\lambda_n^{1-}} \exp[-n\beta(\bar{T}_{\infty} - T_0)] = UA(\bar{T}_{\infty} - T_0) \quad (18)$$

Por lo tanto, para un polímero fundido Newtoniano, de acuerdo a la Ec. (13), se tiene:

$$A_1(\kappa)fV_F N^2 \eta_0 \exp[-\beta(\bar{T}_{\infty} - T_0)] = UA(\bar{T}_{\infty} - T_0) \quad (19)$$

Una vez que se determina el valor apropiado de κ , la Ec. (18) o la Ec. (19), según corresponda, pueden resolverse numéricamente para obtener el valor promedio de la temperatura de fusión. El procedimiento requiere conocer el coeficiente de transferencia de calor.

Dicho coeficiente de transferencia del calor, fue medido en laboratorio, para diversas combinaciones de cámaras de mezcla/rotor, y se determinó que son independientes del material, grado de llenado y temperatura de procesamiento. Se concluyó que los mismos se ajustan a través de una función linealizada de la raíz cuadrada de la velocidad del rotor:

$$UA \approx c_0 + c_1 \sqrt{N} \quad (20)$$

La expresión anterior surge de los estudios realizados, (Jepson, 1953) (Karwe y Jaluria, 1990) (Marinho y col., 2019), sobre diversos tipos de equipos de procesamiento de polímeros. Teniendo en cuenta la Ec. (20), la Ec. (19) puede ser reducida a:

$$\Phi_1(\Theta_{\infty}) = \Phi_2(\Theta_{\infty}) \quad (21)$$

Donde:

$$\Phi_1 = A_1(\kappa)fV_F \frac{N^2 \sqrt{\eta_0 \exp\{-\beta\Theta_\infty\}}}{c_0 + c_1 N} \quad (22)$$

$$\Phi_2 = \Theta_\infty$$

A los efectos de realizar el análisis de semejanza, se toma como referencia los estudios realizados con una resina PET en un mezclador *Haake Rheomix 3000* con rotores tipo *roller* ($T_0 = 280^\circ\text{C}$ y $f = 0,75$, para diferentes valores de velocidad del rotor) (Canedo, 2017). En función de estos parámetros, en la Figura 22 se presenta la solución gráfica de la Ec. (21).

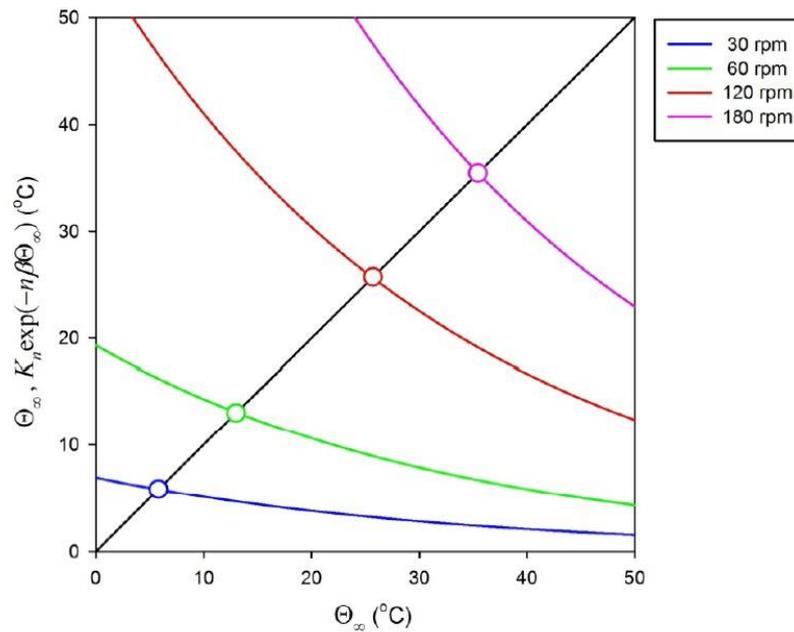


Figura 22. Solución gráfica de la Ec. (21). Los parámetros corresponden a una resina PET procesada en un *Haake Rheomix 3000* con rotores tipo *roller*, $T_0 = 280^\circ\text{C}$ y $f = 0,75$, para diversos valores de velocidad de los rotores (rpm) (Canedo, 2017).

El incremento de la temperatura sobre la pared de la cámara (variable independiente) viene dado por:

$$\Theta_\infty = \bar{T}_\infty - T_0 \quad (23)$$

La relación del incremento de la temperatura sobre la pared con la velocidad del rotor

se gráfica en la Figura 23. La relación para el caso considerado viene dado por:

$$\Theta_{\infty} = \bar{T}_{\infty} - T_0 \approx k^* N \quad (24)$$

con $k^* = 0,20$ para temperaturas en $^{\circ}\text{C}$ y las velocidades del rotor en rpm.

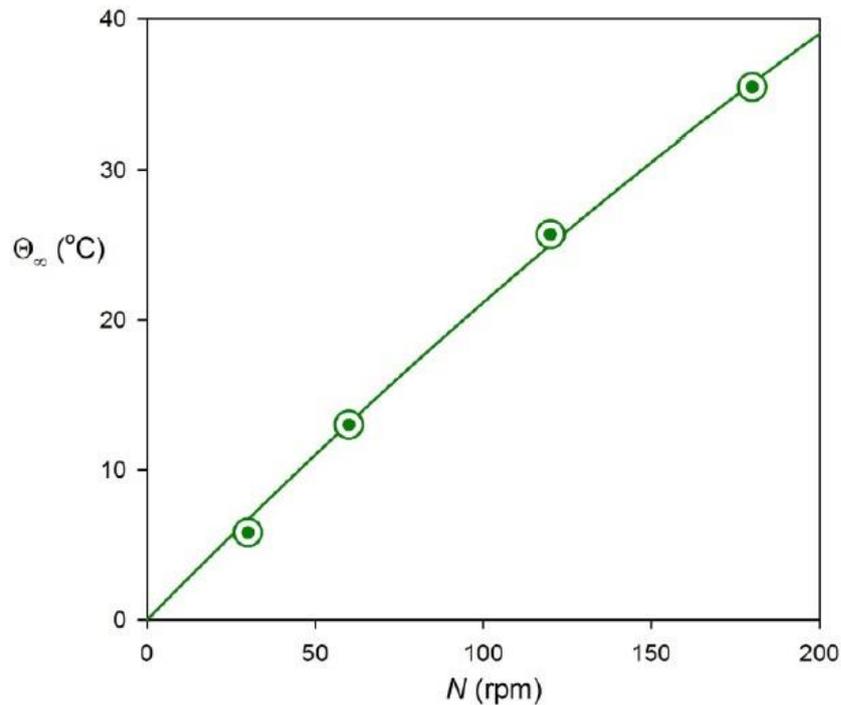


Figura 23. Temperatura sobre la pared (estado estacionario) versus velocidad de los rotors para el caso ejemplificado en la Figura 20 (Canedo, 2017).

La tasa de disipación de energía en la pared se obtiene sustituyendo la Ec. (24) en la Ec. (13):

$$\dot{E}_{\infty} = A_1(\kappa) f V_F N^2 \eta_0 \exp\{-\beta k^* N\} \quad (25)$$

En forma análoga, se determina el torque a partir de la Ec. (15):

$$\dot{\Gamma}_{\infty} = (2\pi)^{-1} A_1(\kappa) f \frac{N^2 \eta_0 \exp\{-\beta k^* N\}}{V_F} \quad (26)$$

El modelo presentado permite a los diseñadores de procesos y productos simular la última etapa del proceso de mezcla, predicción cuantitativa de las dos variables clave medidas, T_{∞} y Γ_{∞} , y su dependencia de la viscosidad de fusión y las condiciones de

funcionamiento (velocidad del rotor, factor de llenado, y temperatura de la pared de la cámara). En la Tabla 5, se detallan los parámetros del modelo *Haake Rheomix 3000*, los mismos se toman como referencia para desarrollar el equipo de laboratorio.

Tabla 5. Parámetros geométricos y técnicos del mezclador interno de laboratorio *Haake Rheomix 3000* con rotores de alta intensidad tipo *roller* (<https://www.thermofisher.com/>)

Parámetro	Valor	Unidad
Diámetro de la cámara de mezcla (D_b)	68,00	<i>mm</i>
Distancia entre ejes (L_c)	71,50	<i>mm</i>
Longitud axial (L)	83,80	<i>mm</i>
Huelgo o gap máximo (H_{max})	13,50	<i>mm</i>
Huelgo o gap mínimo (H_{min})	2,70	<i>mm</i>
Área superficial interna de las paredes de la cámara (A)	300	<i>cm</i> ²
Volumen libre en la cámara de mezcla (V_F)	310	<i>cm</i> ³
Factor de llenado (f)	0,75	Adimensional
Velocidad máxima (nominal) de los rotores (N)	250	<i>rpm</i>
Relación de velocidades (g)	1,5	Adimensional
Torque máximo (total) (Γ_{max})	310	<i>Nm</i>
Temperatura máxima de operación (T_{max})	450	<i>°C</i>
Potencia máxima de calentamiento (Q_{max})	4,2	<i>kW</i>

Cómo mencionamos precedentemente, el parámetro operativo que se toma de referencia para escalar la máquina es el factor de llenado. Con el dato de la masa a procesar m definida en las especificaciones técnicas se obtiene el volumen de la cámara de mezcla y los demás parámetros geométricos relevantes. En función de estos y del parámetro g se determinan los parámetros de operación (los valores obtenidos se presentan en la Tabla 6).

Tabla 6. Parámetros geométricos del mezclador interno de laboratorio.

Parámetro	Valor	Unidad
Diámetro de la cámara de mezcla (D_b)	68	<i>mm</i>
Distancia entre ejes (L_c)	68	<i>mm</i>
Longitud axial (L)	51	<i>mm</i>
Huelgo o gap mínimo (H_{min})	1	<i>mm</i>
Volumen libre en la cámara de mezcla (V_F)	150	<i>cm</i> ³
Factor de llenado (f)	0,75	Adimensional
Velocidad máxima (nominal) de los rotores (N)	150	<i>rpm</i>
Relación de velocidades (g)	1,5	Adimensional
Torque máximo (total) (Γ_{max})	50	<i>Nm</i>
Temperatura máxima de operación (T_{max})	250	<i>°C</i>
Potencia máxima de calentamiento (Q_{max})	3	<i>kW</i>

De los cálculos realizados se pudo determinar la potencia máxima de calentamiento equivalente a $3kW$. En base a este valor se seleccionan cuatro resistencias eléctricas disponibles en el mercado local de 750 W (<https://fareresistencias.com.ar/>).

Para finalizar el predimensionamiento se toma en cuenta el esquema de la Figura 24, según el siguiente detalle:

1. Motor eléctrico - Reductor.
2. Acople.
3. Eje principal (velocidad de giro = N).
4. Eje secundario o conducido.
5. Piñón.
6. Engrane (según relación de giro g).
7. Zona de mezcla (sobre los ejes se montan los rotores).
8. Rodamientos.
9. Bastidor modular de la máquina (incluye: cámara de mezcla, sistema de alimentación y soporte componentes móviles).

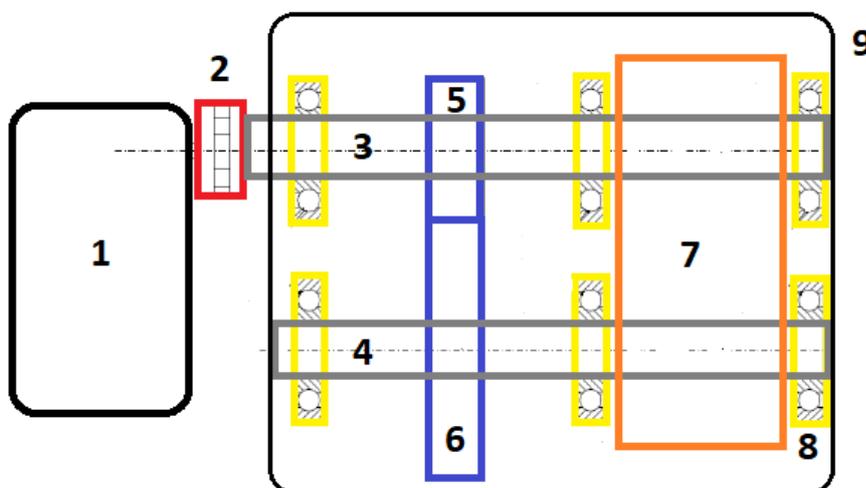


Figura 24. Esquema de componentes mecánicos principales.

■ Motor eléctrico - Reductor:

El motor eléctrico, es el encargado de transformar la energía eléctrica en mecánica, y proporcionar la potencia mecánica necesaria para accionar los rotores con el fin último de generar las tensiones de corte requeridas en el proceso de mezclado.

En primer término se define la potencia necesaria en función del requerimiento de torque explicitado en la Tabla 6:

$$P_{req} = \Gamma \omega = \frac{2\pi}{60} \Gamma N \rightarrow P_{req} = 630 W \quad (27)$$

En base al valor obtenido en la ecuación anterior, se selecciona un motor trifásico con una potencia de 1103 W a 1500 rpm, el mismo se acopla a un reductor tipo sin fin y corona modelo V50H (ver datos técnicos en la Figura 25), a través del cual se alcanza la velocidad nominal máxima establecida. Se define controlar la velocidad del motor con un variador de frecuencia, con el objetivo de regular la velocidad de giro de salida del reductor entre 30 y 150 rpm.

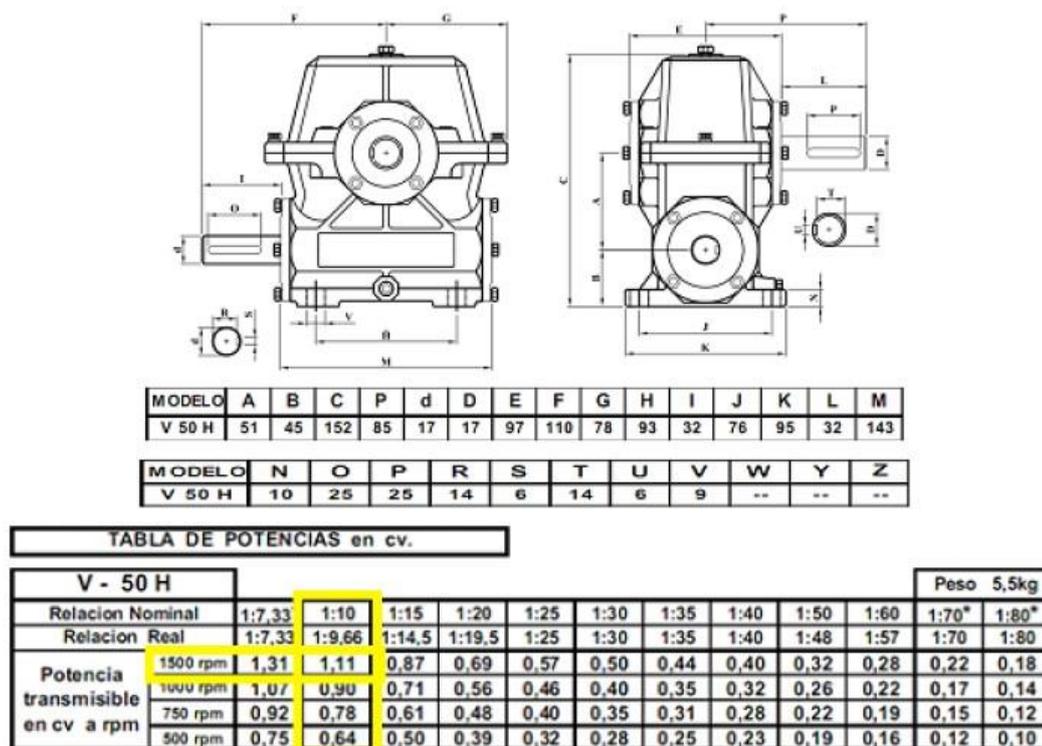


Figura 25. Datos motorreductor V50H (<http://tisatransmisiones.com.ar/>).

▪ **Ejes principal y secundario:**

Para el predimensionamiento de los ejes se siguió la metodología propuesta por ASME (Armah, 2018), de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$d = \sqrt[3]{\frac{16n_f}{\pi} \left[4 \frac{K_t M_a}{S_f} \right]^2 + 3 \left[\frac{T_m}{S_{yt}} \right]^2}^{1/2} \quad (28)$$

Donde:

- n_f : Factor de seguridad.
- S_{yt} : Tensión de Fluencia.
- S_R : Tensión de Rotura.
- S_f : Límite de fatiga (Se adopta $S_f = 0.5 S_R$)
- K_t : Concentrador de tensiones.
- M_a : Momento flector máximo.
- T_m : Momento torsor medio.

Se adopta un material *AISI-SAE 1045* ($S_{yt} = 530$ MPa ; $S_R = 630$ MPa). Reemplazando los valores de solicitaciones y adoptando un coeficiente de seguridad de 2, se obtiene un diámetro de referencia $d = 25$ mm.

▪ **Transmisión por engranajes:**

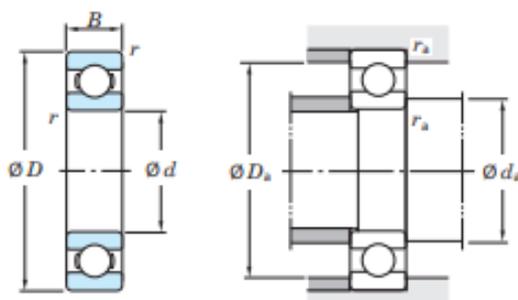
A continuación, se definen las relaciones geométricas principales a partir de la relación de transmisión $g = 1,5$ (Mott, 2006):

- Velocidad del piñón: $N = 150$ rpm.
- Velocidad del engrane: $N_e = N/g = 100$ rpm.
- Módulo: $M = 2$ mm.
- Distancia entre centros: $D = (N + N_e)/(2M) = 68$ mm.
- Número de dientes del piñón: $Z_p = 26$.
- Número de dientes del engrane: $Z_e = 42$.

- Diámetro primitivo del piñón: $D_p = 52 \text{ mm}$.
- Diámetro primitivo del engrane: $D_e = 84 \text{ mm}$.

▪ Rodamientos:

En función del diámetro de referencia de los ejes y la distancia entre centros disponible se seleccionan rodamientos de bolas (tipo *Koyo 6205R*), con sus respectivos porta rodamientos.



Dimensiones principales (mm)				Capacidad de carga básica (kN)		Carga límite de fatiga (kN)	Factor	Limite de velocidad (min ⁻¹)		No. de rodamiento	Dimensiones de montaje (mm)			(Refer.)
d	D	B	r min.	C _r	C _{0r}	C _u	f ₀	lub. con Grasa	lub. con Aceite		d _a min.	D _a max.	r _a max.	Peso (kg)
25	37	7	0.3	5.40	2.95	0.120	16.0	18 000	21 000	6805	27	35	0.3	0.022
	42	9	0.3	8.75	4.55	0.230	15.4	16 000	19 000	6905	27	40	0.3	0.041
	47	8	0.3	11.1	5.60	0.340	15.1	15 000	18 000	16005	27	45	0.3	0.060
	47	12	0.6	12.6	5.85	0.380	14.5	15 000	18 000	6005	29	43	0.6	0.080
	52	15	1	17.5	7.85	0.550	13.9	13 000	15 000	6205	30	47	1	0.128
	52	15	1	22.1	9.30	0.740	12.8	13 000	16 000	6205R	30	47	1	0.138
	62	17	1.1	25.7	11.3	0.860	13.2	11 000	13 000	6305	31.5	55.5	1	0.232
	62	17	1.1	32.7	13.4	1.20	11.9	11 000	14 000	6305R	31.5	55.5	1	0.255
80	21	1.5	45.2	19.4	1.65	12.2	9 100	11 000	6405	33	72	1.5	0.530	

Figura 26. Características técnicas rodamiento 6205R (<https://koyo.jtekt.co.jp/en/>).

▪ Rotores:

En el caso de los rotores, se optó en primera instancia, por el diseño tipo *roller*. La geometría de los mismos a priori representa la configuración más simple de fabricar. Para su predimensionamiento, se tuvo en cuenta las dimensiones de los ejes, de la cámara y el *gap* establecido.

▪ Acople:

Se seleccionó un acoplamiento elástico modelo *A30* en función de la geometría y los requerimientos de torque (ver Figura 27).

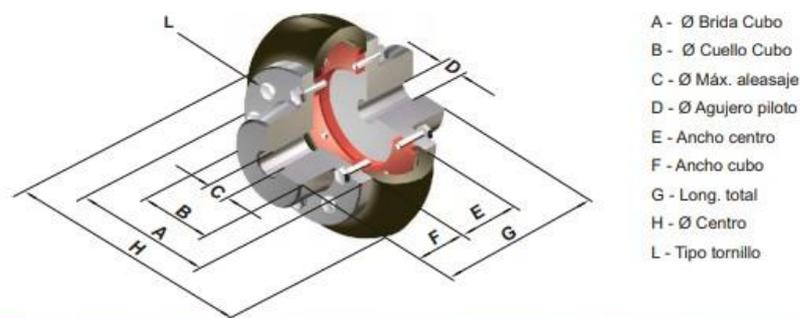


Tabla III

ACOPLE CON CUBO NORMAL													BULONES	
MODELO	Torq. Nom. Nm	Angulo Torsión (°)	Peso (Kg.) ⁽¹⁾	Gd2 (Kg m2)	A	B	C Máx	D Min	E	F	G	H	Nr.	L- Cab. hex.
A-20	38	2°	1.05	0.0017	74	36	20	10	30	25	80	95	12	1/4 x 3/4
A-25	56	5°	1.09	0.0018	74	36	23	10	30	25	80	95	12	1/4 x 3/4
A-30	82	2°	2.40	0.0094	96	49	30	10	40	35	110	127	16	3/16 x 7/8
A-35	113	4°	2.65	0.0098	96	49	32	10	40	35	110	127	16	3/16 x 7/8
A-45	250	3°	5.00	0.0382	127	70	40	15	50	45	140	167	20	3/16 x 1

Figura 27. Características técnicas acople A30 (<http://www.gummiargentina.com/>).

■ Cámara de mezcla:

Como se detalló precedentemente, se parte de la geometría de la cámara para dimensionar todos los otros componentes de la máquina. En la Figura 28 se puede observar la geometría final adoptada y el sistema de alimentación.

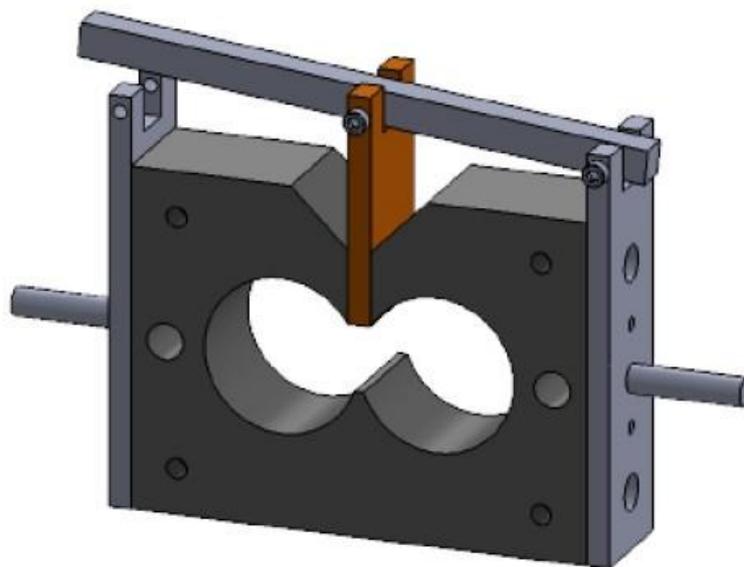


Figura 28. Cámara de mezcla.

Los aspectos que se tuvieron en cuenta al momento del diseño son los siguientes:

- Boca de carga para controlar la dosificación de la mezcla, la misma contempla la eventual incorporación de una tolva.
- Cierre mecánico a través de una barra, que a su vez impulsa la mezcla hacia el interior de la cámara.
- La cámara de mezcla. Es el módulo principal sobre el que se montan, mediante uniones atornilladas, los demás componentes del bastidor encargados de dar soporte a las partes móviles.

4.3.2. Verificación de componentes principales

Tomando como referencia el predimensionamiento realizado en el inciso anterior, se realizó la verificación estructural de los componentes (engranajes, ejes y rodamientos) encargados de transmitir el torque entregado por el motor para que el material sea procesado. A tal fin, se utilizó un software específico que permite realizar el cálculo de:

- Ruedas dentadas cilíndricas rectas: sobre la base de las normas (*ISO, DIN, AGMA, VDI*, entre otras), y también ofrece múltiples herramientas de diseño y optimización.
- Ejes y rodamientos: a partir de la definición de la geometría definida previamente, las condiciones de montaje y las cargas actuantes, se obtienen los diagramas de sollicitaciones, deformaciones elásticas del conjunto, análisis de resistencia del árbol según normas *DIN* o *FKM* y el cálculo de vida útil de los rodamientos.

En la Figura 29 se presenta el modelo 3D de los componentes verificados (según la misma nomenclatura de colores adoptada en la Figura 24). Los resultados obtenidos se presentan en el Anexo III: Memoria de Cálculo (C).

Cabe destacar que los resultados muestran un adecuado comportamiento del sistema en cuanto a resistencia y rigidez de los componentes. Los valores obtenidos para cada una de las piezas situadas en el flujo de fuerza, se ajustan a los requerimientos normativos adoptados para los cálculos.

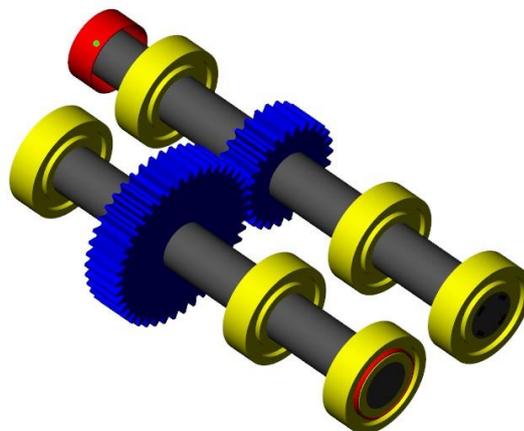


Figura 29. Modelo 3D de los componentes situados en el flujo de fuerza de la máquina.

4.3.3. Sistema de Control

El diseño del sistema de control de la máquina contempla dos bloques principales independientes entre sí:

1. Temperatura - Sistema de Calentamiento:

Se decidió implementar un controlador o regulador *PID*, el cual es un dispositivo que permite controlar un sistema en lazo cerrado para que alcance el estado de salida deseado. El controlador *PID* está compuesto de tres elementos que proporcionan una acción Proporcional, Integral y Derivativa. En la Figura 30 se presenta un esquema del controlador:

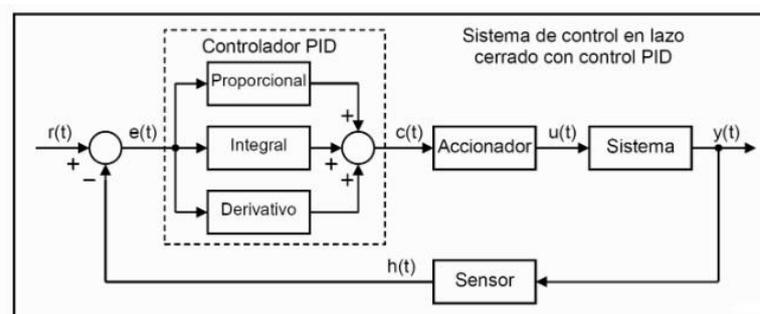


Figura 30. Esquema de un sistema de controlador tipo *PID*, adaptado de (Mandado Pérez y otros, 2010).

La señal $r(t)$ se denomina referencia e indica el estado que se desea conseguir en la salida del sistema $y(t)$. En un sistema de control de temperatura, la referencia

$r(t)$ será la temperatura deseada y la salida $y(t)$ será la temperatura real del sistema controlado.

Como puede verse en el esquema anterior, la entrada al controlador PID es la señal de error $e(t)$. Esta señal indica al controlador la diferencia que existe entre el estado que se quiere conseguir o referencia $r(t)$ y el estado real del sistema medido por el sensor, señal $h(t)$.

Si la señal de error es grande, significa que el estado del sistema se encuentra lejos del estado de referencia deseado. Si por el contrario el error es pequeño, significa que el sistema ha alcanzado el estado deseado.

En este caso, para supervisar y adquirir los valores de temperatura se instalan cinco termocuplas tipo K (NiCr-Ni, rangos de temperaturas 0...1000 °C, diámetro del alambre 2 mm y F.e.m en mV 0...41,3) ubicadas espacialmente en el plano inferior de la cámara de mezcla.

El controlador se implementa a través de una placa Arduino UNO, y la programación se realizó a partir de códigos bases de libre acceso (<https://playground.arduino.cc/>). El objetivo final es el de tener un control puntual de las resistencias eléctricas y evitar la degradación de la mezcla. En la Figura 31, se presenta el circuito eléctrico dispuesto.

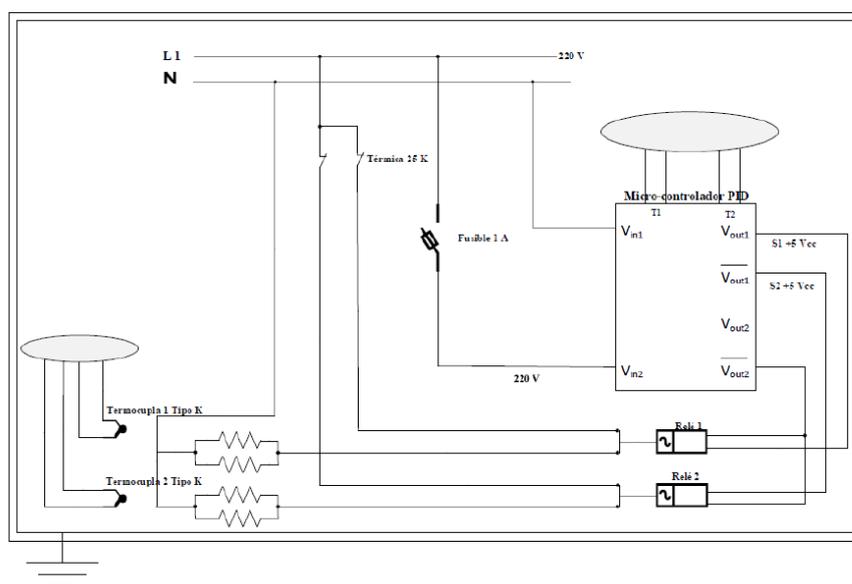


Figura 31. Esquema eléctrico sistema de control de temperatura.

2. Sistema de Homogeneización:

En este sistema es necesario controlar el motor eléctrico trifásico que, como detallamos precedentemente, es el encargado del accionamiento de la máquina. Para regular la velocidad de giro se conecta el mismo a un variador de velocidad disponible en el laboratorio.

Un parámetro importante que debe ser controlado y registrado es el torque en función del tiempo de procesamiento. A tal fin, se selecciona un Transductor de Par Modelo *T21WN* de la firma *HBM* compatible con el equipamiento de adquisición disponible en el laboratorio (<https://www.hbm.com/>).

4.4. Ingeniería de Detalle

En esta etapa del proyecto se generó toda la documentación técnica para la fabricación de las piezas no estandarizadas y el ensamble de la máquina. Se emitieron los planos de cada uno de los componentes, indicando las dimensiones y sus tolerancias, tipo de material, cantidad y ubicación en el conjunto armado, ver Anexo IV: Planos (D).

Esta actividad requirió interactuar en forma directa con proveedores de componentes y personal técnico de una reconocida firma metalmecánica de la zona, encargada de los mecanizados.

Se puso especial atención en que todas las piezas puedan ser fabricadas sin incrementar sensiblemente los costos asociados y que se minimicen y simplifiquen las tareas de montaje. En este sentido cobraron real importancia las técnicas *Design for* aplicadas desde etapas tempranas del proyecto.

El diseño de los rotores representó un desafío significativo, dado que si bien se seleccionó la geometría tipo *roller*, debido a que es la más simple en comparación de las otras analizadas, en consultas tempranas a especialistas en mecanizado de nuestra zona no se mostró interés en desarrollar las piezas solicitadas. Debido a esto, se optó por diseñar un sistema de rotores a partir de diversos perfiles de levas que se montan directamente sobre el eje. La posición de cada una de ellas queda definida por la ubicación del chavetero en la leva. La configuración adoptada genera el mismo efecto que si la pieza fuese mecanizada en forma integral (ver Figura 32).

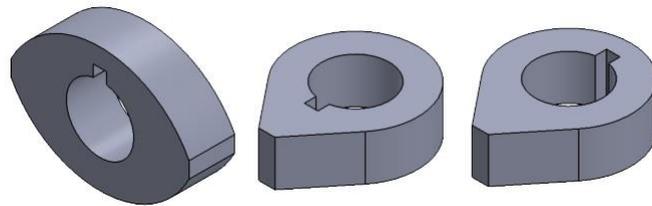


Figura 32. Perfiles de leva que conforman el rotor.

4.5. Fabricación

Una vez finalizada la Ingeniería de Detalle, y revisado lo actuado en dicha etapa, se inició el proceso de fabricación de la máquina. Las tareas desarrolladas involucraron diversas operaciones tecnológicas: corte de chapa en pantógrafo, soldadura, taladrado, roscado, fresado, mecanizados en torno paralelo y en CNC, entre otras.

A continuación, se exponen imágenes del proceso de fabricación y de las piezas terminadas según el siguiente detalle:

- Mecanizado de la cámara de mezcla (Figura 33).
- Cámara de mezcla: tapas frontal y trasera (Figura 34).
- Instalación y pruebas preliminares sistema de calentamiento (Figura 35).
- Ejes y Engranajes de transmisión (Figura 36).
- Caja porta engranajes (Figura 37).
- Detalle rotores (Figura 38).

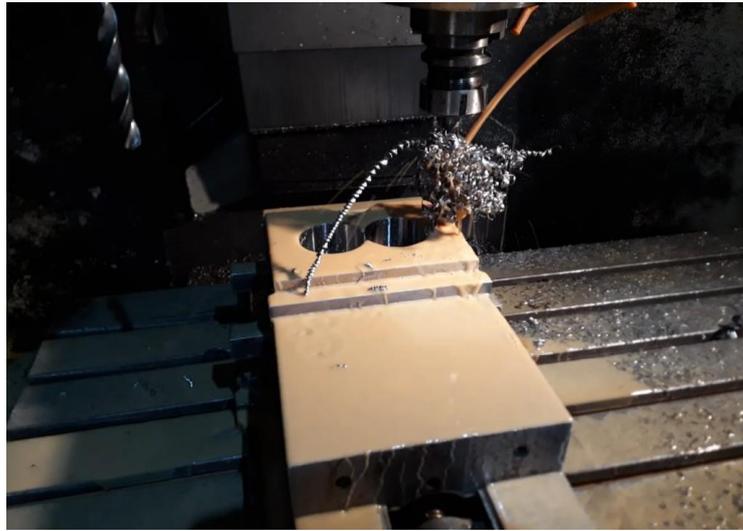


Figura 33. Mecanizado cámara de mezcla.



Figura 34. Cámara de mezcla - Tapas Frontal y Trasera.



Figura 35. Cámara de mezcla: montaje de resistencias.



Figura 36. Ejes y Engranajes de transmisión.

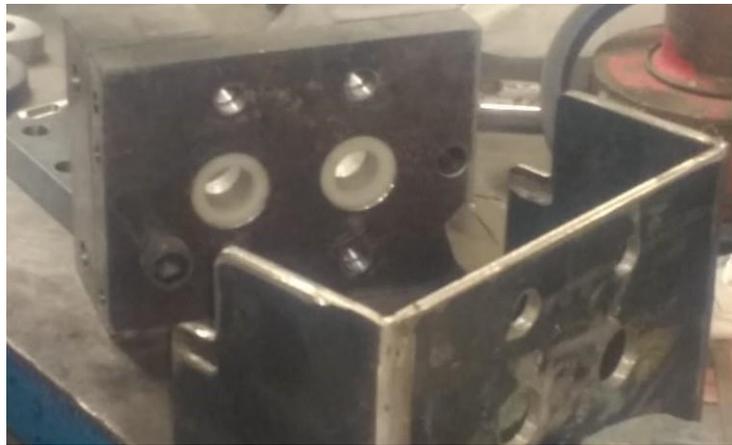


Figura 37. Caja porta engranajes



Figura 38. Detalle Rotores.

En la Figura 39 se muestra la máquina ensamblada instalada en el Laboratorio:

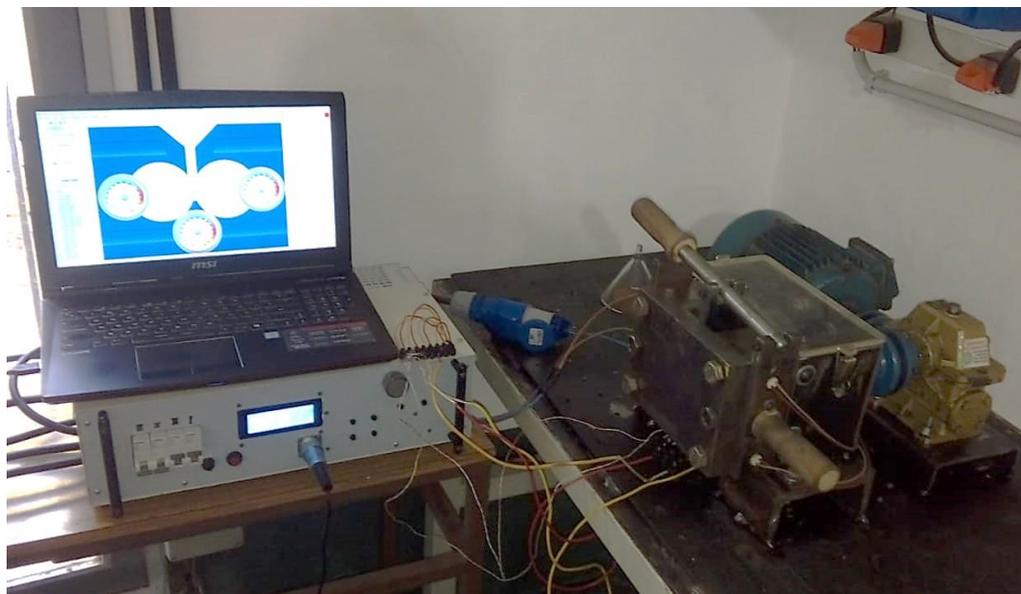


Figura 39. Equipo de Laboratorio para el Estudio de Procesamiento de Termoplásticos.

4.6. Pruebas

Una vez terminado el montaje y verificados los sistemas de supervisión y control del Equipo, se realizó una prueba en vacío para verificar el correcto funcionamiento del mismo a diversas velocidades de giro y temperaturas de trabajo. Esta primer prueba se completó de forma satisfactoria.

La primer prueba de procesamiento se realizó a un 50 % de la capacidad total de la cámara de mezcla. Se ingresó un polipropileno típico (previamente lavado con acetona) con un *masterbatch* colorante comercialmente conocido como *Remafin Rosa PE 0330* (<https://www.clariant.com/>). Este pigmento, posee una fuerte capacidad de nucleación general y una selectividad moderada. El proceso contempló la siguiente secuencia:

1. Calentamiento del equipo hasta alcanzar una temperatura de $180^{\circ} C$. Se setea la velocidad de giro nominal en $72 rpm$, se introducen los primeros $20 gr$ de polipropileno con dos pellets de *Remafin Rosa PE 0330*.
2. Se modifica el *input*, para que la temperatura del mezclador llegue a $200^{\circ} C$ y la velocidad de giro a $100 rpm$. Luego, se introducen los últimos $20 gr$ y tres pellets de *Remafin Rosa PE 0330*.

3. Se establece la temperatura en 220°C y la velocidad de giro en 120 rpm , finalmente se agregan dos pellets de *Remafin Rosa PE 0330*.
4. El tiempo de procesamiento se fija arbitrariamente en 15 minutos.

Las pruebas realizadas, utilizando un colorante específico, permitieron tener una primer aproximación al grado de homogeneización que permite alcanzar la máquina. En función de esto, la evaluación del sistema resulta satisfactoria dado que, como puede observarse en la Figura 40, se obtuvo un producto adecuadamente homogeneizado.



Figura 40. Muestra obtenida luego de procesar una mezcla de Polipropileno y *Remafin Rosa PE 0330*.

4.7. Líneas futuras de trabajo

Realizadas las primeras pruebas operativas, se consideran a continuación algunos aspectos que se deberían profundizar o completar para mejorar la funcionalidad del equipo:

- Instalar el transductor de torque especificado en la Ingeniería Básica. El mismo, hasta el momento no fue instalado debido a limitaciones económicas del proyecto. Contar con este instrumento es de vital importancia para realizar un adecuado estudio reológico de la mezcla, sobre el particular se debe recordar que el torque junto con la temperatura permiten validar los modelos de mezcla a través de su dependencia con la viscosidad del material fundido y las condiciones de funcionamiento (Campanelli y col., 2004) (Cheng, 2010) (Goodrich y Porter, 1967) (Marić y Macosko, 2001) (Marquez y col., 1996).

- Aprovechar el diseño modular y la intercambiabilidad de la cámara de mezcla para montar diversas geometrías de rotores, y analizar de esta forma la influencia que tiene la geometría sobre el proceso de mezcla ([Salahudeen y col., 2011](#)) ([Zhang y col., 2017](#)).
- Mejorar el sistema de lubricación de la caja de engranajes, dado que sí no se tienen suficientes recaudos el aceite puede contaminar la mezcla.
- Una vez que el equipo esté completamente instrumentado, ajustar las prácticas de laboratorio a lo especificado en las normas de aplicación ([ASTM-D2538-18, 2018](#)).

5. CONCLUSIONES

Los objetivos planteados en el presente trabajo se cumplieron, dentro de los plazos establecidos, dado que el Equipo de Laboratorio para el Estudio de Procesamiento de Termoplásticos se encuentra operativo conforme a las previsiones de diseño. Quedan pendientes, tal lo señalado precedentemente, implementar diversas configuraciones geométricas y completar el sistema de adquisición de datos.

El desarrollo del trabajo, requirió planificar y coordinar actividades con personal del Laboratorio y los proveedores de productos y de los servicios de fabricación. La experiencia resultó un valioso aprendizaje para desempeñarme, a futuro, desde el punto de vista profesional. También tuve la oportunidad de supervisar los procesos de fabricación y participar activamente en el proceso de montaje y puesta a punto de la máquina.

A título personal, debo destacar que el desarrollo de este trabajo me permitió integrar, en un caso de aplicación real, los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera. Las temáticas abordadas se relacionaron con: materiales, tecnologías de fabricación, diseño mecánico y sistemas de control.

Referencias

- Armah, S. K. (2018). Preliminary Design of a Power Transmission Shaft under Fatigue Loading Using ASME Code. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11, 227-244. <https://doi.org/10.3844/ajeassp.2018.227.244>
- Askeland, D. (1998). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Thomson.
- ASTM-D2396-94. (2012). Standard Test Methods for Powder-Mix Time of Poly(Vinyl Chloride) (PVC) Resins Using a Torque Rheometer. *ASTM-International*. <https://doi.org/10.1520/D2396-94R12>
- ASTM-D2538-18. (2018). Standard Practice for Fusion of Poly(Vinyl Chloride) (PVC) Compounds Using a Torque Rheometer. *ASTM-International*. <https://doi.org/10.1520/D2538-18>
- ASTM-D3182-16. (2016). Standard Practice for Rubber—Materials, Equipment, and Procedures for Mixing Standard Compounds and Preparing Standard Vulcanized Sheets. *ASTM-International*. <https://doi.org/10.1520/D3182-16>
- Bai, Y., Sundararaj, U. & Nandakumar, K. (2011). Nonisothermal modeling of heat transfer inside an internal batch mixer. *AIChE Journal*, 57(10), 2657-2669.
- Beltrán, M. & Marcilla, A. (2012). *Tecnología de Polímeros*. Universidad de Alicante Servicio de publicaciones.
- Bird, R., Armstrong, R. & Hassager, O. (1987). *Dynamics of Polymeric Liquids, Vol. 1*. Wiley.
- Bousmina, M. (2012). Determination of thermal conductivity of liquids and polymers from batch mixer data. *Rheologica Acta*, 51. <https://doi.org/10.1007/s00397-012-0654-6>
- Bousmina, M., Ait-Kadi, A. & Faisant, J. (1999). Determination of Shear Rate and Viscosity From Batch Mixer Data. *Journal of Rheology - J RHEOL*, 43, 415-433. <https://doi.org/10.1122/1.551044>
- Brinson, H. F. & Brinson, C. L. (2008). *Polymer Engineering Science and Viscoelasticity an Introduction*. Springer.
-

-
- Campanelli, J. R., Gurer, C., Rose, T. L. & Varner, J. E. (2004). Dispersion, temperature and torque models for an internal mixer. *Polymer Engineering & Science*, 44(7), 1247-1257.
- Canedo, E. (2017). *Processamento de Polímeros no Misturador Interno de Laboratório 2E*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.23644.64647>
- Canedo, E., Alves, T., Silva Neto, J. & Carvalho, L. (2014). Engineering modeling of laboratory internal mixer.
- Cheng, C.-C. (2010). Real-time diagnosis of melting and mixing processes in internal mixer by ultrasound. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(4), 675-683.
- Goodrich, J. E. & Porter, R. S. (1967). A rheological interpretation of torque-rheometer data. *Polymer Engineering & Science*, 7(1), 45-51.
- Jepson, C. H. (1953). Future Extrusion Studies. *Industrial & Engineering Chemistry*, 45(5), 992-993. <https://doi.org/10.1021/ie50521a037>
- Karwe, M. V. & Jaluria, Y. (1990). Numerical Simulation of Fluid Flow and Heat Transfer in a Single-Screw Extruder for Non-Newtonian Fluids. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 17(2), 167-190. <https://doi.org/10.1080/10407789008944738>
- Manas-Zloczower, I. (2009). *Mixing and Compounding of Polymers: Theory and Practice*. Carl Hanser Verlag.
- Mandado Pérez, E. & otros. (2010). *Sistemas de automatización y Autómatas programables*. Marcombo.
- Marić, M. & Macosko, C. W. (2001). Improving polymer blend dispersion in mini-mixers. *Polymer Engineering & Science*, 41(1), 118-130.
- Marinho, V. A., Cesario, L. V., Costa, A. R. M., Carvalho, L. H., Almeida, T. G. & Canedo, E. L. (2019). Heat transfer coefficient in internal mixers for different polymers and processing conditions. *Chemical Engineering Research and Design*, 152, 466-473. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.09.025>
- Marquez, A., Quijano, J. & Gaulin, M. (1996). A calibration technique to evaluate the power-law parameters of polymer melts using a torque-rheometer. *Polymer Engineering & Science*, 36(20), 2556-2563.
- Mott, R. (2006). *Diseño de Elementos de Máquinas*. Pearson Education.
-

- Pahl, G. & Beitz, W. (2007). *Engineering Design - A Systematic Approach*. Springer-Verlag London.
- Paul, E. & otros. (2004). *Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice*. John Wiley Sons.
- Pugh, S. (1991). *Total Design: Integrated Methods for Successful Product Engineering*. Addison-Wesley Longman Publishing Co.
- Riba, C. (2010). *Diseño Concurrente*. Ediciones UPC.
- Saad, A., Jlassi, K., Omastová, M. & Chehimi, M. (2017). Chapter 6 - Clay/Conductive Polymer Nanocomposites, En *Clay-Polymer Nanocomposites*. Elsevier.
- Salahudeen, A., Elleithy, R., AlOthman, O. & AlZahrani, S. (2011). Comparative study of internal batch mixer such as cam, banbury and roller: Numerical simulation and experimental verification. *Chemical Engineering Science*, 66(12), 2502-2511.
- Shih, C.-K., Tynan, D. G. & Denelsbeck, D. A. (1991). Rheological properties of multicomponent polymer systems undergoing melting or softening during compounding. *Polymer Engineering & Science*, 31(23), 1670-1673.
- Spendolini, M. (1994). *Benchmarkin*. AMACOM.
- Tadmor, Z. & Gogos, C. G. (2006). *Principles of polymer processing*. Wiley.
- Ullman, D. (2010). *The Mechanical Design Process*. McGraw-Hill.
- Ulrich, K. & Eppinger, S. (2012). *Product Design and Development*. McGraw-Hill/Irwin.
- Zhang, G., Wu, T., Lin, W., Tan, Y., Chen, R., Huang, Z., Yin, X. & Qu, J. (2017). Preparation of polymer/clay nanocomposites via melt intercalation under continuous elongation flow. *Composites Science and Technology*, 145, 157-164.
-

A. Anexo I: Identificación de Necesidades

A continuación, se transcribe la entrevista realizada al responsable del *GEPSyN*.

1. ¿Cuál es el objetivo del proyecto?

El equipo tiene que permitir obtener muestras de pequeño volumen de mezclado.

2. ¿Cuál es la función básica del prototipo?

Mezclar y homogeneizar, generar tensiones de corte altas para que la arcilla se delamine.

3. ¿Cuáles son los recursos para la realización del proyecto?

El presupuesto asignado al proyecto ronda los \$300.000 (parte del dinero del proyecto FITR INDUSTRIA 15/2013), en este sentido problema no vamos a tener. Un lapso de tiempo lógico, sería fantástico tenerlo en marcha en Mayo/Junio del año 2018. Por otro lado, tengo un contacto de un ingeniero que me presupuestó \$300.000 por una extrusora monohusillo.

4. ¿Qué aspectos se deben tener en cuenta en el diseño?

Típicamente va a ser un bastidor con un motor de determinada potencia que va a mover los elementos que sirvan para mezclar. Se le tiene que sumar el sistema calefactor con un perfil de temperaturas máximas de procesamiento entre 220 – 240 ° C. Se necesita un poco de espacio extra, en el caso de una extrusora con cabezal pelletizador al final, luego el producto tiene que pasar por una batea de enfriamiento y entrar a la cortadora de pellet. En el caso de otro tipo de máquina como en las mezcladoras tipo Banbury, se mete el material se lo deja trabajar un tiempo y se lo saca manualmente, con un pos-procesamiento.

5. ¿Existen en el mercado productos/equipos similares?

Si, se conoce el estilo de máquina que se necesita, hay diversos tipos de equipos. En particular, las extrusoras de doble husillo son las que introducen las mayores tensiones de corte dentro de las mezclas. La máquina monohusillo sería una alternativa más barata y rápida de construir.

6. **¿Quiénes son los grupos afectados al desarrollo de este proyecto?**

La demanda es básicamente del equipo CeCiTeMA, en ese caso el interlocutor es Eduardo Santarelli e inclusive la empresa Zoxi Neuquén.

7. **¿Se conocen en la zona usuarios de este tipo de equipos?**

Dentro de dicha empresa existe personal con experiencia en el uso de estas máquinas, vamos a encontrar información aproximada de cómo se usa la extrusora y con qué perfil de temperatura trabaja. Por otro lado, en Roca hay una casa que se dedica hacer productos en caucho, habría que ver qué tipo de equipamiento tienen.

8. **¿Qué propiedades mecánicas se buscan mejorar, en comparación con los materiales usados actualmente en las aplicaciones específicas?**

Mínimamente uno de los materiales va a pasar el estado líquido/pastoso. Las cantidades a procesar están limitadas a 1 Kg de polímero como máximo. Los aditivos que se le aplican son extremadamente caros. El porcentaje de arcilla no va a pasar el 5 % suponiendo un máximo de 10 %. Y los otros aditivos por lo general vienen en forma de Masterbatch. El resultado que se busca, de las arcillas que se pretenden utilizar, básicamente es mejorar el módulo elástico del material. Fundamentalmente, mejorar su permanencia con la temperatura.

9. **¿Qué operaciones posteriores se le realizarán al producto obtenido a la salida del equipo?**

El producto normalmente va a ir a un moldeo por compresión, para después obtener plaquitas que nos permitan derivar probetas o inclusive en otra etapa de prueba se puede ingresar el material a otra extrusora para obtener un pedazo de tubo.

10. **¿Qué grado de automatización e instrumentación debería tener el equipo?**

Se podría automatizar, por ejemplo, la dosificación de la muestra. Otra opción es colocar la mezcla pre dosificada dentro de la máquina. Además, debe contar con instrumentos de medición de torque, temperatura y desplazamiento/volumen.

11. **¿Con qué frecuencia se utilizará el equipo?**

Se pretende realizar procesamientos cada dos meses aproximadamente.

B. Anexo II: Benchmarking

B.1. Molino de rodillos 80E- Exakt

Descripción:

El molino de rodillos triples de origen alemán, modelo *EXAKT 80E* (<https://exaktusa.com/>), está especialmente diseñado para la fabricación de:

- Nano tubos de carbono (*CNT*).
- Dispersión de dióxido de titanio u óxido de zinc en carpetas.
- Dispersión de pigmento utilizado por ejemplo en la fabricación de batón.
- Dispersión de pigmentos en la fabricación de tintas especiales.
- Células combustibles.
- Lámparas fluorescentes.
- Lubricantes de alto rendimiento.
- Pasta de recubrimiento de monitores y pantallas.
- Tecnología *Thick-film*.
- Flux pasta.

Equipo ideal para la homogeneización de los productos de alta viscosidad y pegajosidad, permite mezclar productos líquidos y sólidos, además de micronizar o desagregar partículas sólidas en la suspensión. Las aplicaciones varían desde la refinación de urea en la industria farmacéutica hasta la dispersión de nano partículas en la industria electrónica.

Reducción del tamaño de partícula con extraordinaria precisión y reproducibilidad notable son sorprendentes características de los modelos electrónicos. El molino EXAKT 80E tiene un controlador electrónico con pantalla que permite un mayor control y parámetro, repetitividad de los procesos y almacena hasta 99 programas. Incluye función limpieza que establece una brecha entre los rodillos y bajo torque aumentando la seguridad de procesos.

El controlador permite fijar dos parámetros de proceso independientes por rodillos, siendo el primero por separación entre rodillos (MODO GAP) y el segundo por fuerza aplicada por los rodillos directamente en el producto (Modo de Fuerza). Dispone de función de calibración automática, que permite ajustes en el equipo antes de comenzar el trabajo, eliminando los posibles fallos debido a la dilatación del material o mala posición de los rodillos.

Cuenta con sistema de circulación de fluido a través de los rodillos para calentarlos o enfriarlos y raspador con alineación automática.



Figura 41. Molino de rodillos 80E- *Exakt*

Especificaciones del producto:

- Capacidad de producción: de 0.02 a 20 Litros.
- Operación: 3x400 voltios/60 Hz.
- Control de velocidad: hasta 600 RPM.
- Relación de velocidad de los rodillos: 9: 3: 1.
- Potencia del motor: 1,1 KW.
- Permite el control de potencia entre rollos: hasta 47 N/mm.
- Material de los rodillos: cromo duro, óxido de aluminio, silicio carbite (SiC).

- Longitud de los rodillos: 200 mm.
- Diámetro de los rodillos: 80 mm.
- Ajuste de la textura del producto final: de 1 a 100 uM.
- Peso neto: 70 kg.
- Dimensiones (LxPxH): 720x550x550 mm.
- Garantía: 12 meses.

B.2. *Three Roll Mills*

Descripción:

La serie de equipos *Three Roll Mills* (<https://www.threerollmill.com/>) se utilizan principalmente para dispersar, mezclar, refinar y homogeneizar pastas viscosas de todo tipo, es decir, pinturas y tintas de impresión, chocolate, colores de artista, crayones para colorear, maquillaje para ojos, lápiz labial y productos para el cuidado de la piel, jabones finos, compuestos de revestimiento pigmentados, plástico, pastas, mazapán, glaseados de goma laca, quesos procesados, entre otros. El efecto se logra mediante un sistema de tres rodillos horizontales que producen una muy alta fuerza de corte.



Figura 42. Molino de rodillos 80 *Three Roll Mills*

Especificaciones del producto:

- Diámetro del rodillo: 2.5"(65mm).

- Largo del rodillo: 5"(136mm).
- Velocidad de cada Rodillo (aproximada):
 - 108 (rpm).
 - 216 (rpm).
 - 432 (rpm).
- Potencia del motor: 0,55 KW.
- Peso neto: 165 lb.
- Dimensiones (LxPxH): 24" x 14" x 15" (588 mm x 355,6 mm x 381 mm).

El modelo básico viene con placas finales de latón, rodillos de acero fundido endurecido en frío, rodillos con núcleo para enfriamiento / calentamiento, placa de alimentación niquelada, motor eléctrico montado sobre rodamientos.

B.3. *Productos CT*

La firma *Chareon Tut Co. LTD.* (<http://www.chareontut.com/>) fabrica diversos productos para el procesamiento de diferentes materiales. A continuación, se describen los equipos de referencia analizados:

1. *CT Internal Mixer.*

Descripción:

Esta máquina realiza una mezcla íntima de aditivos de polímeros y químicos o entre diferentes tipos de polímeros con una amplia gama de velocidades de corte, patrones de flujo y temperaturas.

- Las cámaras de mezcla son intercambiables: tipo sin entremezcla y tipo entremezclado.
 - Los rotores para el mezclador interno *CT* son intercambiables: tipo rodillo, tipo leva, tipo *Banbury*, tipo *CTEM* y tipo *CTEF*.
 - La placa frontal y la cámara de mezcla se pueden separar tirando de las asas laterales.
-

- Es apropiada para obtener compuestos poliméricos dado que genera una adecuada dispersión.



ROTOR TYPES



Figura 43. *CT Internal Mixer (Chareon Tut Co. LTD).*

Especificaciones del producto:

Se toma como referencia el modelo *MX75*

- Calentamiento: Resistencias eléctricas controladas por un Controlador Lógico de Temperatura (PID).
- Temperatura máxima de operación: 300 ° C.
- Volumen libre de la cámara del mezclador con rotores *CAM* o *CTEF* montados: 75 ml.
- Carga sugerida al 70 % del total (Densidad específica = 1) = 54 g
- Velocidad del rotor ajustable por *Inverter* (visualización por pantalla): 0 a 140 rpm
- Potencia motor eléctrico: 3,7 kW.
- Suministro de energía: CA Trifásica / 380-440 V / 50-60 Hz.

2. *CT Single-Screw Extruder.*

Descripción: Esta máquina es una extrusora de tornillo a escala de laboratorio.

- La extrusora se puede equipar con diversos accesorios auxiliares relevantes, es decir, cabezal de troquel y cortador de velocidad ajustable, para producir distintos productos.
- Las funciones de la máquina pueden ser diseñadas para aplicaciones específicas.
- El diseño permite escalar la máquina según las dimensiones principales del tornillo y el cilindro (relación L/D - Largo/Diámetro), ajustando el mismo a diversas aplicaciones.
- El tornillo y cilindro puede ser fabricado en diversos materiales según la aplicación (acero nitrurado, acero inoxidable, etc.).



Figura 44. *CT Single-Screw Extruder*(Chareon Tut Co. LTD).

Especificaciones del producto:

Se toma como referencia el modelo *SE-D25 Series*

- Diámetro del tornillo: 25 mm.
- Temperatura máxima de operación: 300 ° C.
- Relación L/D: 25 - 50.
- Velocidad máxima del tornillo: 140 a 600 rpm.
- Zonas de calentamiento: 3 - 15.

3. *CT Twin-Screw Extruder.*

Descripción:

- Extrusora con una caja reductora diseñada para aplicaciones de alto torque.
- Adecuada para ser utilizada con plásticos.
- Visualización y ajuste en pantalla del % de torque, protección contra sobre torque.
- El extrusor está equipado con una matriz redonda que tiene un diámetro de orificio de 2.5 mm para producir filamentos de plástico.



Figura 45. *CT Twin-Screw Extruder*(Chareon Tut Co. LTD).



Figura 46. *CT Twin-Screw Extruder*: los tornillos son diseñados para diversas aplicaciones de materiales (Chareon Tut Co. LTD).

Especificaciones del producto:

Se toma como referencia el modelo *SE-D25 Series*

- Capacidad: 4 kg/h.

- Diámetro del tornillo: 15,75 mm.
- Temperatura máxima de operación: 280 ° C.
- Calentamiento / Enfriamiento: Resistencias eléctricas / Enfriamiento por agua.
- Velocidad del tornillo ajustable por *Inverter* (visualización por pantalla): 0 a 300 rpm.
- Potencia motor eléctrico principal: 0,75 kW.
- Suministro de energía: CA Trifásica / 380-440 V / 50-60 Hz.

4. *CT Two-Roll Mill*.

Descripción:

- El molino tiene dos rodillos de acero cromado.
- Posee un panel eléctrico.
- La transmisión de potencia a los rodillos se realiza a través de dos engranajes rectos.
- Una de las características más importante que se puede apreciar en esta máquina son los aspectos relacionados con la seguridad. Posee barreras físicas para evitar atrapamientos de las manos y dedos del operador, topes manuales, parada de emergencia, corte por sobrecarga e interruptor de giro de dirección inversa.



Figura 47. *CT Two-Roll Mill*(Chareon Tut Co. LTD).

Especificaciones del producto:

Se toma como referencia el modelo *ML-D4L10-HT-INV*

- Longitud del rodillo: 10 inch.
 - Diámetro del rodillo: 4 inch.
 - Temperatura máxima de operación: 250 ° C.
 - Calentamiento: Resistencias eléctricas.
 - Relación de fricción entre rodillos: 1,17 a 1.
 - Potencia motor eléctrico principal: 2,2 kW.
 - Suministro de energía: CA Trifásica / 380-440 V / 50-60 Hz.
-

C. Anexo III: Memoria de Cálculo

O.GB.GearPair_const1.GearPair_const1_calc

KISSsoft Release 03/2016 A

Team-SolidSQUAD

Archivo

Nombre : ~~Módulo de Cálculo~~ Equipo de Laboratorio Procesamiento de Polímeros.
Modificado por: Diseño Mecánico día: 18.05.2020 hora: 14:23:11

CÁLCULO DE UN PAR DE RUEDAS CILÍNDRICAS RECTAS CON DENTADO RECTO

No. de plano o de artículo:

Rueda 1: z1(GearPair_const1)

Rueda 2: z2(GearPair_const1)

Método de cálculo DIN 3990:1987 Método B

----- RUEDA 1 ----- RUEDA 2 --

Potencia (W)	[P]	425.000	
Velocidad (1/min)	[n]	150.0	92.9
Momento torsor (Nm)	[T]	27.1	43.7
Factor de aplicación de carga	[KA]		1.25
Duración de vida exigida (h)	[H]	20000.00	
Rueda impulsora (+) / impulsada (-)		+	-
Flanco de trabajo rueda 1: Flanco derecho			

1. GEOMETRÍA DEL DIENTE Y MATERIAL

(Cálculo de la geometría según ISO 21771:2007, DIN ISO 21771)

----- RUEDA 1 ----- RUEDA 2 --

Distancia entre centros (mm)	[a]	68.000	
Tolerancia de distancia entre centros ISO 286:2010 desviación js			
Módulo normal (mm)	[mn]	2.0000	
Ángulo de presión normal (°)	[alfn]	20.0000	
Ángulo de hélice en el círculo primitivo (°)	[beta]	0.0000	
Número de dientes	[z]	26	42
Ancho del diente (mm)	[b]	20.63	20.63
Sentido helicoidal			Dentado recto
Calidad del dentado	[Q-DIN 3961:1978]	6	6
Diámetro interior (mm)	[di]	20.00	20.00
Diámetro interior de la corona (mm)	[dbi]	0.00	0.00

Material

Rueda 1: C45 (2), Acero bonificado, endurecido por templado/ind.

ISO 6336-5 Imagen 11/12 (MQ)

Rueda 2: C45 (2), Acero bonificado, endurecido por templado/ind.

ISO 6336-5 Imagen 11/12 (MQ)

----- RUEDA 1 ----- RUEDA 2 --

Endurecimiento superficial		HRC 57	HRC 57
Resistencia a la fatiga, presión en el pie (N/mm ²)			
	[σFlim]	370.00	370.00
Resistencia a la fatiga, presión hertziana (N/mm ²)			
	[σHlim]	1220.00	1220.00
Resistencia a la rotura (N/mm ²)	[σB]	700.00	700.00



Limite elástico (N/mm ²)	[σS]	490.00	490.00
Módulo de elasticidad (N/mm ²)	[E]	206000	206000
Número de Poisson	[ν]	0.300	0.300
Valor de rugosidad medio Ra, flanco (μm)	[RAH]	0.60	0.60
Valor de rugosidad medio Ra, pie (μm)	[RAF]	3.00	3.00
Profundidad media de rugosidad Rz, flanco (μm)	[RZH]	4.80	4.80
Profundidad media de rugosidad Rz, pie (μm)	[RZF]	20.00	20.00

Perfil de referencia de rueda

1 :

Perfil de referencia	1.25 / 0.38 / 1.0 ISO 53.2:1997 Perfil A		
Coefficiente de altura del pie	[hfP*]	1.250	
Coefficiente del radio del pie	[rhofP*]	0.380 (rhofPmax*=0.472)	
Coefficiente de altura de cabeza	[haP*]	1.000	
Factor de radio de la cabeza	[rhoaP*]	0.000	
Coefficiente de altura de protuberancia	[hprP*]	0.000	
Ángulo de la protuberancia	[alfprP]	0.000	
Factor de altura de la forma de la cabeza	[hFaP*]	0.000	
Ángulo de flanco de chaflán	[alfKP]	0.000	
		no topping	

Perfil de referencia de rueda

2 :

Perfil de referencia	1.25 / 0.38 / 1.0 ISO 53.2:1997 Perfil A		
Coefficiente de altura del pie	[hfP*]	1.250	
Coefficiente del radio del pie	[rhofP*]	0.380 (rhofPmax*=0.472)	
Coefficiente de altura de cabeza	[haP*]	1.000	
Factor de radio de la cabeza	[rhoaP*]	0.000	
Coefficiente de altura de protuberancia	[hprP*]	0.000	
Ángulo de la protuberancia	[alfprP]	0.000	
Factor de altura de la forma de la cabeza	[hFaP*]	0.000	
Ángulo de flanco de chaflán	[alfKP]	0.000	
		no topping	

Resumen del perfil de referencia de las ruedas dentadas:

Altura del pie del perfil de referencia	[hfP*]	1.250	1.250
Radio del pie del perfil de referencia	[rofP*]	0.380	0.380
Altura de la cabeza del perfil de referencia	[haP*]	1.000	1.000
Coefficiente de altura de protuberancia	[hprP*]	0.000	0.000
Ángulo de la protuberancia (°)	[alfprP]	0.000	0.000
Factor de altura de la forma de la cabeza	[hFaP*]	0.000	0.000
Ángulo de flanco de chaflán (°)	[alfKP]	0.000	0.000

Tipo de corrección de perfil: ninguna (sólo valor de rodaje)

Despulla de cabeza (μm)	[Ca]	3.4	3.4
-------------------------	------	-----	-----

Tipo de lubricación Lubricación por barboteo de aceite

Tipo de aceite Aceite: ISO-VG 220

Lubricación de base Base de aceite mineral

Viscosidad nominal cinemática. Aceite a 40 °C (mm ² /s)	[nu40]	220.00	
Viscosidad nominal cinemática. Aceite a 100 °C (mm ² /s)	[nu100]	17.50	
Densidad específica a 15 °C (kg/dm ³)	[roOil]	0.895	
Temperatura, aceite (°C)	[TS]	70.000	

		----- RUEDA 1 -----		RUEDA 2 --	
Relación total	[itot]			-1.615	
Relación número de dientes	[u]			1.615	
Módulo transversal (mm)	[mt]			2.000	
Ángulo de presión, círculo primitivo (°)	[alfi]			20.000	
Ángulo de presión en funcionamiento (°)	[alfwt]			20.000	
	[alfwt.e/i]			20.035 /	9.965
Ángulo de engrane de servicio en corte normal (°)	[alfwn]			20.000	
Ángulo de hélice en la circunferencia primitiva de funcionamiento (°)	[betaw]			0.000	
Ángulo de base de la hélice (°)	[betab]			0.000	
Distancia entre centros de referencia = 0 (mm)	[ad]			68.000	
Suma de los coeficientes de corrección del perfil	[Summexi]			0.0000	
Coeficiente de corrección del perfil	[x]			0.3548	-0.3548
Espesor del diente (Arc) (módulo) (módulo)	[sn*]			1.8291	1.3125
Modificación de la altura de cabeza (mm)	[k*mn]			0.000	0.000
Diámetro primitivo de referencia (mm)	[d]			52.000	84.000
Diámetro de base (mm)	[db]			48.864	78.934
Diámetro de la circunferencia de cabeza (mm)	[da]			57.419	86.581
(mm)	[da.e/i]	57.419 /	57.409	86.581 /	86.571
Desviaciones de la circunferencia de cabeza (mm)	[Ada.e/i]	0.000 /	-0.010	0.000 /	-0.010
Diámetro circunferencia de la forma de cabeza (mm)	[dFa]			57.419	86.581
(mm)	[dFa.e/i]	57.419 /	57.409	86.581 /	86.571
Diámetro de la cabeza activo (mm)	[dNa]			57.419	86.581
Diámetro de la cabeza activo (mm)	[dNa.e/i]	57.419 /	57.409	86.581 /	86.571
Diámetro primitivo de funcionamiento (mm)	[dw]			52.000	84.000
(mm)	[dw.e/i]	52.011 /	51.989	84.019 /	83.981
Diámetro de fondo (mm)	[df]			48.419	77.581
Factor de desplazamiento de perfil de rodamiento	[xE.e/i]	0.3067 /	0.2793	-0.4029 /	-0.4304
Circunferencia de pie generado con xE (mm)	[df.e/i]	48.227 /	48.117	77.388 /	77.278
Juego en el fondo teórico (mm)	[c]			0.500	0.500
Juego en el fondo efectivo (mm)	[c.e/i]	0.671 /	0.581	0.671 /	0.581
Diámetro del círculo utilizable del pie (mm)	[dNf]			50.074	80.612
(mm)	[dNf.e/i]	50.098 /	50.054	80.634 /	80.594
Diámetro de la forma del pie (mm)	[dFf]			49.925	79.979
(mm)	[dFf.e/i]	49.813 /	49.752	79.890 /	79.841
Reserve (dNf-dFf)/2 (mm)	[cF.e/i]	0.173 /	0.121	0.396 /	0.352
Altura de cabeza (mm)	[ha=mn*(haP*+x+k)]			2.710	1.290
(mm)	[ha.e/i]	2.710 /	2.705	1.290 /	1.285
Altura del pie (mm)	[hf=mn*(hfP*-x)]			1.790	3.210
(mm)	[hf.e/i]	1.887 /	1.941	3.306 /	3.361
Ángulo di rodadura de dF (°)	[xsi_dFa.e/i]	35.358 /	35.335	25.823 /	25.805
Ángulo de rodadura para dNa (Cabeza) (°)	[xsi_dNa.e/i]	35.358 /	35.335	25.823 /	25.805
Ángulo de rodadura para dNf (Talón) (°)	[xsi_dNf.e/i]	12.958 /	12.724	11.953 /	11.812
Ángulo di rodadura de dFf (°)	[xsi_dFf.e/i]	11.348 /	10.971	8.945 /	8.711
Altura de diente (mm)	[h]			4.500	4.500
Número virtual de dientes	[zn]			26.000	42.000
Espesor del diente normal en la circunferencia exterior (mm)	[san]			1.209	1.636
(mm)	[san.e/i]	1.137 /	1.087	1.568 /	1.522
Espesor del diente normal en la circunferencia de la forma de cabeza (mm)	[sFan]			1.209	1.636
(mm)	[sFan.e/i]	1.137 /	1.087	1.568 /	1.522
Entrediente normal en la circunferencia de pie (mm)	[efn]			0.000	0.000

	(mm)	[efn.e/i]	0.000 /	0.000	0.000 /	0.000	
Velocidad máx. de deslizamiento en la cabeza (m/s)		[vga]		0.157		0.087	
Deslizamiento específico, en la cabeza		[zetaaa]		0.664		0.503	
Deslizamiento específico, en el pie		[zetaf]		-1.013		-1.977	
Deslizamiento específico medio		[zetam]			0.607		
Factor de deslizamiento, en la cabeza		[Kga]		0.385		0.213	
Factor de deslizamiento, en el pie		[Kgf]		-0.213		-0.385	
Paso transversal (mm)		[pt]			6.283		
Círculo de base transversal (mm)		[pbt]			5.904		
Círculo de base real (mm)		[pet]			5.904		
Longitud de la línea de contacto (mm)		[ga, e/i]		9.608 (	9.651 /	9.542)	
Longitud T1-A, T2-A (mm)		[T1A, T2A]	5.470(	5.426/	5.526)	17.788(	17.788/ 17.776)
Longitud T1-B (mm)		[T1B, T2B]	9.173(	9.173/	9.163)	14.084(	14.041/ 14.138)
Longitud T1-C (mm)		[T1C, T2C]	8.893(	8.876/	8.909)	14.365(	14.338/ 14.392)
Longitud T1-D (mm)		[T1D, T2D]	11.374(	11.330/	11.430)	11.883(	11.883/ 11.871)
Longitud T1-E (mm)		[T1E, T2E]	15.077(	15.077/	15.068)	8.180(	8.136/ 8.234)
Longitud T1-T2 (mm)		[T1T2]		23.257 (	23.213 /	23.301)	
Diámetro en el punto de contacto simple B (mm)		[d-B]	52.194(	52.194/	52.188)	83.810(	83.780/ 83.846)
Diámetro en el punto de contacto simple D (mm)		[d-D]	53.900(	53.863/	53.947)	82.435(	82.435/ 82.428)
Recubrimiento en la Cabeza		[eps]	1.047(	1.050/	1.043)	0.580(	0.584/ 0.573)
Línea de contacto (mm)		[Lmin]			20.630		
Relación de contacto aparente		[eps_a]			1.627		
Relación de contacto aparente con desviaciones		[eps_a.e/m/i]		1.635 /	1.625 /	1.616	
Coefficiente de recubrimiento		[eps_b]			0.000		
Relación de contacto total		[eps_g]			1.627		
Relación de contacto total con desviaciones		[eps_g.e/m/i]		1.635 /	1.625 /	1.616	

2. FACTORES GENERALES DE INFLUENCIA

		----- RUEDA 1 -----	RUEDA 2 --
Fuerza circunferencial nominal en el círculo primitivo (N)	[Ft]		1040.6
Fuerza axial (N)	[Fa]		0.0
Fuerza radial (N)	[Fr]		378.8
Fuerza normal (N)	[Fnorm]		1107.4
Fuerza circunferencial nominal por mm (N/mm)	[w]		50.44
Sólo informativo: Fuerzas en la circunferencia primitiva de funcionamiento:			
Fuerza circunferencial nominal (N)	[Ftw]		1040.6
Fuerza axial (N)	[Faw]		0.0
Fuerza radial (N)	[Frw]		378.8
Velocidad periférica circunferencia primitiva (m/s)	[v]		0.41
Velocidad periférica circunferencia primitiva de funcionamiento (m/s)	[v(dw)]		0.41
Valor de rodaje (µm)	[yp]		0.5
Valor de rodaje (µm)	[yf]		0.4
Factor de corrección	[CM]		0.800
Factor cuerpo de rueda	[CR]		1.000
Factor perfil de referencia	[CBS]		0.975
Factor material	[E/Est]		1.000
Rigidez individual del diente (N/mm/µm)	[c']		8.317
Rigidez del engrane (N/mm/µm)	[cg]		12.230
Masa reducida (kg/mm)	[mRed]		0.00686
Nº. de rotaciones de resonancia (min-1)	[nE1]		15513
Nº. de rotaciones de referencia (-)	[N]		0.010
Zona subcrítica			

Valor de rodaje (μm)	[ya]		0.5
Distancia entre apoyos l del árbol de piñón (mm)	[l]		41.300
Distancia s del árbol de piñón (mm)	[s]		4.130
Diámetro exterior del árbol de piñón (mm)	[dsh]		20.650
Esfuerzo según figura 6.8, DIN 3990-1:1987 [-]		4	
(0:6.8a, 1:6.8b, 2:6.8c, 3:6.8d, 4:6.8e)			
Factor K' según figura 6.8, DIN 3990-1:1987 [K']		-1.00	
Sin efecto de soporte			
Desviación activa de la línea de flanco (μm)	[Fby]		4.97
De la deformación de los árboles (μm)	[fsh*B1]		0.49
(fsh (μm) = 0.49, B1 = 1.00, fHb5 (μm) = 6.50)			
Diente sin corrección de la línea de flanco			
Posición del contacto: favorable			
De las tolerancias de fabricación (μm)	[fma*B2]		9.00
(B2=1.00)			
Desviación teórica de la línea de flanco (μm)	[Fbx]		5.85
Valor de rodaje (μm)	[yb]		0.88
Factor dinámico	[KV]		1.006
Factor anchura - Flanco	[KHb]		1.479
- Pie del diente	[KFb]		1.360
- Gripado	[KBb]		1.479
Factor transversal - flanco	[KH a]		1.007
- Pie del diente	[KF a]		1.007
- Gripado	[KB a]		1.007
Factor de ángulo de hélice Gripado	[Kbg]		1.000
Número de ciclos de carga (en mill.)	[NL]	180.000	111.429

3RESISTENCIA DEL PIE

Cálculo de los factores de perfil de diente según método: B

----- RUEDA 1 ----- RUEDA 2 --

Calculada con desplazamiento del perfil de fabricación

	[xE.e]	0.3067	-0.4029
Factor perfil de diente	[YF]	1.24	1.80
Factor corrección de tensión	[YS]	2.17	1.67
Ángulo de presión de la fuerza aplicada ($^{\circ}$)	[alfFen]	21.87	17.85
Brazo de palanca de flexión (mm)	[hF]	1.96	2.35
Espesor del pie (mm)	[sFn]	4.33	3.98
Radio del pie (mm)	[roF]	0.93	1.31
(hF* = 0.978/1.174 sFn* = 2.165/1.992 roF* = 0.465/0.657)			
(dsFn (mm) = 48.932/78.332 alfsFn($^{\circ}$) = 30.00/30.00 qs = 2.328/1.516)			

Factor de recubrimiento	[Yeps]		1.000
Factor de ángulo de hélice	[Ybet]		1.000
Ancho de diente determinante (mm)	[beff]	20.63	20.63
Tensión nominal del pie del diente (N/mm ²)	[sigF0]	67.56	75.79
Tensión del pie del diente (N/mm ²)	[sigF]	116.33	130.50
Presión admisible en el pie, de la rueda de prueba			
Factor sensibilidad de entalladura	[YdreIT]	0.998	0.990

Factor de superficie	[YRrelT]	0.957	0.957	
Factor de tamaño (pie)	[YX]	1.000	1.000	
Factor de resistencia a la fatiga limitada	[YNT]	1.000	1.000	
	[YdrelT*YRrelT*YX*YNT]	0.955	0.947	
Coefficiente de flexión alternada (factor de influencia de tensión media)				[YM] 1.000 1.000
Factor corrección de tensión	[Yst]		2.00	
Yst*sigFlim (N/mm ²)	[sigFE]	740.00	740.00	
Tensión admisible de la raíz del diente (N/mm ²)				
	[sigFP=sigFG/SFmin]	504.87	500.54	
Resistencia límite de la raíz del diente (N/mm ²)	[sigFG]	706.82	700.76	
Seguridad nominal	[SFmin]	1.40	1.40	
Factor de seguridad, tensión del pie	[SF=sigFG/sigF]	6.08	5.37	
Potencia transmisible (W)	[WRating]	1844.56	1630.14	

4 SEGURIDAD DEL FLANCO (PICADURA)

		----- RUEDA 1 -----	RUEDA 2 --
Factor zona	[ZH]		2.495
Factor de elasticidad ($\sqrt{N/mm}$)	[ZE]		189.812
Factor de recubrimiento	[Zeps]		0.889
Factor de ángulo de hélice	[Zbet]		1.000
Ancho de diente determinante (mm)	[beff]		20.63
Presión de flancos nominal (N/mm ²)	[sigH0]		527.73
Presión en el flanco en la circunferencia primitiva de funcionamiento (N/mm ²)			
	[sigHw]		722.27
Factor de contacto individual	[ZB,ZD]	1.00	1.00
Presión de contacto en el flanco (N/mm ²)	[sigHB, sigHD]	722.27	722.27
Factor de lubricante (en NL)	[ZL]	1.020	1.020
Factor de velocidad (en NL)	[ZV]	0.946	0.946
Factor de rugosidad (en NL)	[ZR]	0.953	0.953
Factor de control de material (en NL)	[ZW]	1.000	1.000
Factor de resistencia a la fatiga limitada	[ZNT]	1.000	1.000
	[ZL*ZV*ZR*ZNT]	0.920	0.920
Pequeña cantidad de picaduras admisible:		no	
Factor de tamaño (flanco)	[ZX]	1.000	1.000
Presión de flanco admisible (N/mm ²)	[sigHP=sigHG/SHmin]	1121.84	1121.84
Resistencia límite de las picaduras (N/mm ²)	[sigHG]	1121.84	1121.84
Seguridad nominal	[SHmin]	1.00	1.00
Seguridad para la presión de flanco en la circunferencia primitiva de funcionamiento			
	[SHw]	1.55	1.55
Seguridad para la presión, contacto individual	[SHBD=sigHG/sigHBD]	1.55	1.55
(Seguridad respecto al momento torsor transmisible)			
	[(SHBD)^2]	2.41	2.41
Potencia transmisible (W)	[WRating]	1025.29	1025.29

5. MICROPITTING (punteados grises) SEGÚN

ISO/TR15144-1:2014

No se realiza el cálculo. (Lubricante: No se conoce el nivel de carga prueba de micropitting)

5. RESISTENCIA AL GRIPADO

Método de cálculo según DIN 3990:1987

Factor de lubricación (para el tipo de lubricación)

	[XS]	1.000	
Prueba de agarrotamiento y nivel de carga	[FZGtest]	FZG - Test A / 8.3 / 90 (ISO 14635 - 1)	12
Factor estructura, relativo (Gripado)	[XWrelT]	1.000	
Coeficiente de contacto térmico (N/mm/s ^{0.5} /K)	[BM]	13.780	13.780
Despulla de cabeza decisiva (µm)	[Ca]	3.40	3.40
Despulla de cabeza óptima (µm)	[Ceff]	7.58	
Ca tomado como óptimo en el cálculo (0=no, 1=sí)		0	0
Ancho de diente determinante (mm)	[beff]	20.630	
Fuerza circunferencial / ancho de diente determinante (N/mm)	[wBt]		94.486
Factor ángulo (ε1:1.047, ε2:0.580)	[Xalfbet]	0.978	

Criterio de temperatura instantánea

Temperatura de masa (°C)	[theMB]	72.88
theMB = theoil + XS*0.47*theflamax	[theflamax]	6.14
Temperatura de gripado (°C)	[theS]	408.58

Coordenada gamma (punto con temperatura más elevada)

	[Gamma]	0.279
[Gamma.A]=-0.385 [Gamma.E]=0.695		
Temperatura de contacto más elevada. (°C)	[theB]	79.02
Factor instantáneo (°K*N ^{-0.75} *s ^{0.5} *m ^{-0.5} *mm)	[XM]	50.058
Factor geometría	[XB]	0.160
Factor de repartición de carga	[XGam]	1.000
Viscosidad dinámica (mPa*s)	[etaM]	37.44 (70.0 °C)
Coeficiente de fricción	[mym]	0.116
Seguridad nominal	[SBmin]	2.000
Factor de seguridad contra el gripado (temperatura instantánea)	[SB]	37.498

Criterio de temperatura integral

Temperatura de masa (°C)	[theMC]	72.42
theMC = theoil + XS*0.70*theflaint	[theflaint]	3.46
Temperatura integral de gripado (°C)	[theSint]	408.58
Factor instantáneo (°K*N ^{-0.75} *s ^{0.5} *m ^{-0.5} *mm)	[XM]	50.058
Factor de recubrimiento	[Xeps]	0.237
Viscosidad dinámica (mPa*s)	[etaOil]	41.90 (70.0 °C)
Coeficiente medio de fricción	[mym]	0.116
Factor geometría	[XBE]	0.404
Factor engrane	[XQ]	1.000
Factor despulla de cabeza	[XCa]	1.063
Temperatura integral del flanco (°C)	[theint]	77.60
Seguridad nominal	[SSmin]	1.800
Factor seguridad contra el gripado (T.-int.)	[SSint]	5.265
Seguridad para el momento transferido (T.-int.)	[SSL]	44.527

6. MEDIDAS DE PRUEBA PARA EL ESPESOR DE DIENTE

----- RUEDA 1 ----- RUEDA 2 --

Tolerancia del espesor del diente	DIN 3967 cd25	DIN 3967 cd25
Desviación, espesor del diente en sección normal (mm)	[As.e/i]	-0.070 / -0.110 -0.070 / -0.110

Número de dientes medidos	[k]	4.000	4.000
Medida entre dientes, sin huelgo (mm)	[Wk]	21.879	21.356
Medida entre dientes efectivo (mm)	[Wk.e/i]	21.813 / 21.775	21.290 / 21.253
(mm)	[ΔWk.e/i]	-0.066 / -0.103	-0.066 / -0.103
Diámetro, círculo de medida (mm)	[dMWk.m]	53.504	81.750
Diámetro de los medidores teórico. (mm)	[DM]	3.688	3.307
Diámetro efectivo. de los medidores (mm)	[DMeff]	3.750	3.500
Medida radial, en una bola, sin holgura (mm)	[MrK]	29.449	43.841
Medida en una bola radial (mm)	[MrK.e/i]	29.378 / 29.337	43.745 / 43.690
Diámetro, círculo de medida (mm)	[dMMr.m]	53.352	82.810
Medida diametral entre dos bolas, sin juego (mm)	[MdK]	58.898	87.681
Medida diametral en dos rollos (mm)	[MdK.e/i]	58.756 / 58.673	87.490 / 87.380
Medida sobre dos rodillos, sin juego (mm)	[MdR]	58.898	87.681
Medida diametral, entre rodillos según DIN 3960 (mm)	[MdR.e/i]	58.756 / 58.673	87.490 / 87.380
Medida entre 3 rodillos (axial) según AGMA 2002 (mm)	[dk3A.e/i]	58.756 / 58.673	87.490 / 87.380
Cuerda de espesor de diente, sin holgura (mm)	[sc]	3.655	2.625
Cuerda de espesor de diente, efectiva (mm)	[sc.e/i]	3.585 / 3.545	2.555 / 2.515
Altura por encima de la cuerda a partir de da.m (mm)	[ha]	2.771	1.308
Espesor del diente (Arc) (mm)	[sn]	3.658	2.625
(mm)	[sn.e/i]	3.588 / 3.548	2.555 / 2.515
Distancia entre centros sin juego (mm)	[aControl.e/i]	67.806	/ 67.692
Distancia entre centros sin juego, desviaciones (mm)	[jta]	-0.194 /	-0.308
dNf.i con aControl (mm)	[dNf0.i]	49.706	80.260
Reserva (dNf0.i-dFf.e)/2 (mm)	[cF0.i]	-0.054	0.185
Juego en el fondo	[c0.i(aControl)]	0.289	0.289
Desviación distancia entre centros (mm)	[Aa.e/i]	0.015 /	-0.015
Juego de circunferencia de Aa (mm)	[jtw_Aa.e/i]	0.011 /	-0.011
Juego radial (mm)	[jrw]	0.323 /	0.179
juego de circunferencia (sección transversal) (mm)	[jtw]	0.231 /	0.129
Ángulo de torsión con rueda retenida 1 (°)		0.3150 / 0.1761	
Juego de engrane normal (mm)	[jnw]	0.217 /	0.121

7. TOLERANCIAS DEL DENTADO

----- RUEDA 1 ----- RUEDA 2 --

Según	DIN 3961:1978		
Calidad del dentado	[Q-DIN3961]	6	6
Desviación, forma del perfil (μm)	[ff]	6.00	6.00
Desviación, ángulo del perfil (μm)	[fHa]	5.00	5.00
Desviación total del perfil (μm)	[Ff]	8.00	8.00
Desviación, forma de línea de flanco (μm)	[fbf]	5.50	5.50
Desviación, ángulo de la forma de línea de flanco (μm)	[fHb]	9.00	9.00
Desviación total de la forma de línea de flanco (μm)	[Fb]	10.00	10.00
Desviación, paso base (μm)	[fpe]	7.00	7.00
Desviación individual del paso (μm)	[fp]	7.00	7.00
Salto de paso (μm)	[fu]	9.00	9.00
Desviación total del paso (μm)	[Fp]	25.00	25.00
Errores de círculos de paso acumulados sobre z/8 (μm)	[Fpz/8]	15.00	15.00
Desviación de la concentricidad (μm)	[Fr]	16.00	16.00

Variación del espesor de diente (μm)	[Rs]	10.00	10.00
Error compuesto tangencial (μm)	[Fi']	26.00	26.00
Salto tangencial (μm)	[fi']	11.00	11.00
Error compuesto radial (μm)	[Fi'']	20.00	20.00
Salto radial (μm)	[fi'']	8.00	8.00

Según DIN 58405:1972 (Feinwerktechnik):

Longitud de recubrimiento (μm)	[fi''']	9.00	9.00
Error de rodadura (μm)	[Fi''']	25.00	25.00
Error de paralelismo de los ejes (μm)	[fp]	11.56	11.56
Error de dirección de flancos (μm)	[fbeta]	5.00	5.00
Desviación de la concentricidad (μm)	[Trk, Fr]	24.00	24.00

Tolerancias de la alineación de los ejes (recomendación según ISO TR 10064:1992, calidad 6)

Valor máximo para desviación del eje (μm)	[fSigbet]	12.01 (Fb=12.00)
Valor máximo para error de inclinación (μm)	[fSigdel]	24.02

8 . DATOS COMPLEMENTARIOS

Máxima distancia entre centros posible (eps_a=1.0)

	[aMAX]	69.354	
Masa - calculada con da (kg)	[Mass]	0.368	0.900
Masa total (kg)	[Mass]	1.268	

Momento de inercia (sistema con respecto a la Rueda 1):

Cálculo, sin tener en cuenta el perfil de diente exacto

Ruedas, individualmente, $((da+df)/2...di)$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)

	[TraeghMom]	0.0001207	0.0007129
System $((da+df)/2...di)$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	[TraeghMom]	0.0003938	
Rigidez a la torsión (MNm/rad)	[cr]	0.2	0.4
Coefficiente medio de fricción (según Niemann)	[mum]	0.102	
Deslizamiento de desgaste según Niemann	[zetw]	0.987	
Potencia disipada en el dentado por la carga en el diente (W)	[PVZ]	6.812	
(Rendimiento del dentado (%))	[etaz]	98.397	

9 . DETERMINACION DEL PERFIL DE DIENTE

Datos para el cálculo del perfil del diente:

Datos no existentes.

0 . VIDA, DAÑOS

Seguridad nominal pie del diente	[SFmin]	1.40
Seguridad nominal flanco	[SHmin]	1.00

Vida (calculada con seguridades nominales):

Vida sistema (h)	[Hatt]	> 1000000
------------------	--------	-----------

Vida pie del diente (h)	[HFatt]	1e+006	1e+006
Vida flanco (h)	[HHatt]	1e+006	1e+006

Nota: La indicación 1e+006 h significa que la vida es > 1.000.000 h.

Daños calculados en base a la duración de vida nominal [H] (20000.0 h)

F1%	F2%	H1%	H2%
0.00	0.00	0.00	0.00

OBSERVACIONES:

- Datos con [.e/i] significan: valores máximos [e] y mínimos [i] considerando todas las tolerancias

Las indicaciones con [.m] significan: promedio en la tolerancia

- En el movimiento muerto entre flancos se tienen en cuenta las tolerancias entre centros y las dimensiones del espesor del diente . Se indica el juego máximo y mínimo según las desviaciones más grandes o más pequeñas.

Se ejecuta el cálculo para la circunferencia primitiva de funcionamiento..

- Detalles del método de cálculo:

cg según método B

KV según método B

KHb, KFb según método C

KHa, KFa según método B

Final del protocolo

Lineas:

528

O.GB.Shaft1.Shaft1_calc

KISSsoft Release 03/2016 A

Team-SolidSQUAD

Archivo

Nombre : sin denominación

Modificado por: Diseño Mecánico

día: 18.05.2020

hora: 14:23:12

Nota importante: En el cálculo han aparecido advertencias:

1-> Rodamiento núm. Árbol 'Shaft1', Rodamientos 'RollerBearing3':

¡No se alcanza la carga mínima del cojinete!

(P = 0.1 kN, Pmin = 0.2 kN, condición: P/C > 1.000 %)

Cálculo de árboles, ejes y vigas

Datos de entrada

Sistema de coordenadas del árbol: véase Fig. W-002

Denominación	Shaft1
Plano	
Posición de inicio (mm)	0.000
Longitud (mm)	260.000
Velocidad (1/min)	150.00
Sentido de giro: en el sentido de las agujas del reloj	
Material	C45 (1)
Módulo de elasticidad (N/mm ²)	206000.000
Número de Poisson un	0.300
Densidad (kg/m ³)	7830.000
Coefficiente de dilatación térmica (10 ⁻⁶ /K)	11.500
Temperatura (°C)	20.000
Peso del árbol (kg)	0.999
Peso del árbol, incluidas masas adicionales (kg)	0.999
Momento de inercia de masa (kg*mm ²)	78.072
Momento de inercia GD2 (Nm ²)	0.003

El peso no se tendrá en cuenta

Las deformaciones por cizallamiento se tendrán en cuenta

Factor de corrección del cizallamiento 1.100

No se tendrá en cuenta el ángulo de presión de rodamientos

Situación de tolerancia: Valor medio

Temperatura de referencia (°C) 20.000

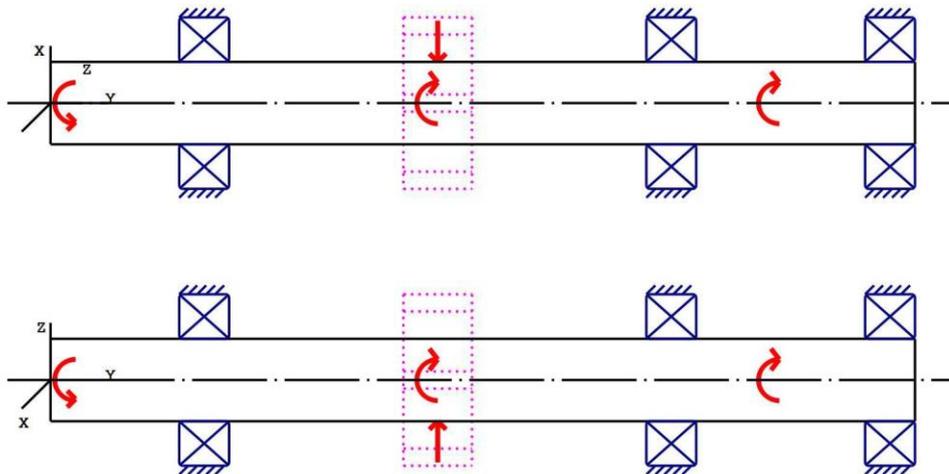


Figura: Introducciones de carga

Definición del árbol

(Shaft1)

Contorno exterior

Cilindro (Cylinder)		0.000mm ... 260.000mm
Diámetro (mm)	[d]	25.0000
Longitud (mm)	[l]	260.0000
Rugosidad (μm)	[Rz]	8.0000
Ranura de chaveta (Ranura de chaveta)		106.300mm ... 126.300mm
l=20.00 (mm), Rz=8.0, Girado (Ra=3.2 μm /125 μin)		
Ranura de chaveta (Ranura de chaveta)		205.000mm ... 235.000mm
l=30.00 (mm), Rz=8.0, Girado (Ra=3.2 μm /125 μin)		

Fuerzas

Tipo del elemento de fuerza	Acoplamiento	
Denominación en el modelo	Coupling1 (Input)	
Posición en el árbol (mm)	[ylocal]	7.5000
Posición en el sistema global (mm)	[yglobal]	7.5000
Diámetro activo (mm)		35.0000
Factor de fuerza radial (-)		0.0000
Sentido de la fuerza radial (°)		0.0000
Factor de fuerza axial (-)		0.0000
Longitud de la aplicación de la fuerza (mm)		15.0000
Potencia (kW)		0.8500 accionado (accionamiento)
Momento torsor (Nm)		54.1127
Fuerza axial (N)		0.0000

Fuerza transversal X (N)	0.0000
Fuerza transversal Z (N)	0.0000
Momento flector X (Nm)	0.0000
Momento flector Z (Nm)	0.0000
Masa (kg)	0.0000
Momento de inercia de masa Jp (kg*m ²)	0.0000
Momento de inercia de masa Jxx (kg*m ²)	0.0000
Momento de inercia de masa Jzz (kg*m ²)	0.0000
Excentricidad (mm)	0.0000

Tipo del elemento de fuerza		Potencia disipada
Denominación en el modelo		PowerLoss1
Posición en el árbol (mm)	[Ylocal]	219.2000
Posición en el sistema global (mm)	[Yglobal]	219.2000
Potencia perdida (kW)		0.4250
Par equivalente (Nm)		-27.0563
Longitud de la aplicación de la fuerza (mm)		50.8000

Tipo del elemento de fuerza		Engrane recto
Denominación en el modelo		z1(GearPair_const1)
Posición en el árbol (mm)	[Ylocal]	116.4500
Posición en el sistema global (mm)	[Yglobal]	116.4500
Diámetro primitivo de funcionamiento (mm)		52.0000
Dentado recto		
Ángulo de engrane de servicio en corte normal (°)		20.0000
Posición del engrane (°)		-0.0000
Longitud de la aplicación de la fuerza (mm)		20.6300
Potencia (kW)		0.4250 impulsor (salida)
Momento torsor (Nm)		-27.0563
Fuerza axial (N)		0.0000
Fuerza transversal X (N)		-378.7578
Fuerza transversal Z (N)		1040.6285
Momento flector X (Nm)		0.0000
Momento flector Z (Nm)		0.0000

Cojinetes

Denominación en el modelo		RollerBearing1
Tipo de cojinete		Koyo 6205NR
Tipo de cojinete		Rodamientos de bolas (de efecto doble) (de una hilera)
Posición del cojinete (mm)	[Ylocal]	46.200
Posición del cojinete (mm)	[Yglobal]	46.200
Fijación del anillo exterior		Cojinete fijo colocado a la derecha
Diámetro interior (mm)	[d]	25.000
Diámetro exterior (mm)	[D]	52.000
Ancho (mm)	[b]	15.000
Radio angular (mm)	[r]	1.000
Capacidad de carga estática	[C ₀]	7.850
Capacidad de carga dinámica	[C]	17.500
Capacidad de carga fatiga	[C _U]	0.550
Valores para la geometría aproximada:		
Capacidad de carga dinámica (kN)	[C _{theo}]	0.000
Capacidad de carga estática (kN)	[C _{0theo}]	0.000

Denominación en el modelo	RollerBearing2
Tipo de cojinete	Koyo 6205NR

Tipo de cojinete		Rodamientos de bolas (de efecto doble) (de una hilera)
Posición del cojinete (mm)	[Ylokal]	186.700
Posición del cojinete (mm)	[Yglobal]	186.700
Fijación del anillo exterior		Cojinete fijo colocado a la derecha
Diámetro interior (mm)	[d]	25.000
Diámetro exterior (mm)	[D]	52.000
Ancho (mm)	[b]	15.000
Radio angular (mm)	[r]	1.000
Capacidad de carga estática	[C ₀]	7.850
Capacidad de carga dinámica	[C]	17.500
Capacidad de carga fatiga	[C _U]	0.550
Valores para la geometría aproximada:		
Capacidad de carga dinámica (kN)	[C _{theo}]	0.000
Capacidad de carga estática (kN)	[C _{0theo}]	0.000

Denominación en el modelo		RollerBearing3
Tipo de cojinete		Koyo 6205NR
Tipo de cojinete		Rodamientos de bolas (de efecto doble) (de una hilera)
Posición del cojinete (mm)	[Ylokal]	252.500
Posición del cojinete (mm)	[Yglobal]	252.500
Fijación del anillo exterior		Cojinete fijo colocado a la derecha
Diámetro interior (mm)	[d]	25.000
Diámetro exterior (mm)	[D]	52.000
Ancho (mm)	[b]	15.000
Radio angular (mm)	[r]	1.000
Capacidad de carga estática	[C ₀]	7.850
Capacidad de carga dinámica	[C]	17.500
Capacidad de carga fatiga	[C _U]	0.550
Valores para la geometría aproximada:		
Capacidad de carga dinámica (kN)	[C _{theo}]	0.000
Capacidad de carga estática (kN)	[C _{0theo}]	0.000

Resultados

Árbol

Flexión máxima (mm)	0.021
Posición del máximo (mm)	116.450
Gravicentro de masa (mm)	130.000
Suma del esfuerzo axial (N)	0.000
Deformación bajo momento torsor (°)	-0.164

Cojinetes

Probabilidad de fallo	[n]	10.00	%
Juego axial	[u _A]	10.00	µm
Rodamientos clásicos (considerar el ángulo de presión)			

Árbol 'Shaft1' Rodamientos 'RollerBearing1'

Posición (coordinada Y)	[Y]	46.20	mm
Esfuerzo equivalente	[P]	0.49	kN
Esfuerzo equivalente	[P ₀]	0.49	kN
Factor de probabilidad de fallo	[a ₁]	1.000	
Vida nominal rodamiento	[L _{nh}]	> 1000000	h
Factor de seguridad estático	[S ₀]	15.91	
Fuerza de reacción del cojinete	[F _x]	0.169	kN
Fuerza de reacción del cojinete	[F _y]	0.000	kN
Fuerza de reacción del cojinete	[F _z]	-0.464	kN
Fuerza de reacción del cojinete	[F _r]	0.493	kN (-70°)
Par de reacción de cojinete	[M _x]	-0.00	Nm
Par de reacción de cojinete	[M _y]	0.00	Nm
Par de reacción de cojinete	[M _z]	0.00	Nm
Par de reacción de cojinete	[M _r]	0.00	Nm (179.24°)
Nivel de aceite	[H]	0.000	mm
Momento de fricción independiente de la carga[M ₀]		0.004	Nm
Momento de fricción dependiente de la carga[M ₁]		0.004	Nm
Momento de fricción de los rodamientos de rodillos cilíndricos[M ₂]			0.000Nm
Momento de fricción de juntas determinado según el catálogo principal 4000/IV T DE:1994			
Momento de rozamiento	[M _{loss}]	0.009	Nm
Potencia disipada	[P _{loss}]	0.135	W
El momento de fricción se calcula con datos del catálogo SKF 1994.			
Desplazamiento de cojinete	[u _x]	-2.138	µm
Desplazamiento de cojinete	[u _y]	0.000	µm
Desplazamiento de cojinete	[u _z]	5.873	µm
Desplazamiento de cojinete	[u _r]	6.250	µm (110°)
Inclinación de cojinete	[r _x]	0.277	mrad (0.95')
Inclinación de cojinete	[r _y]	-0.689	mrad (-2.37')
Inclinación de cojinete	[r _z]	0.101	mrad (0.35')
Inclinación de cojinete	[r _r]	0.294	mrad (1.01')

Árbol'Shaft1' Rodamientos 'RollerBearing2'

Posición (coordinada Y)	[Y]	186.70	mm
Esfuerzo equivalente	[P]	0.74	kN
Esfuerzo equivalente	[P ₀]	0.74	kN
Factor de probabilidad de fallo	[a ₁]	1.000	
Vida nominal rodamiento	[L _{nh}]	> 1000000	h
Factor de seguridad estático	[S ₀]	10.56	
Fuerza de reacción del cojinete	[F _x]	0.254	kN
Fuerza de reacción del cojinete	[F _y]	0.000	kN
Fuerza de reacción del cojinete	[F _z]	-0.698	kN
Fuerza de reacción del cojinete	[F _r]	0.743	kN (-70°)
Nivel de aceite	[H]	0.000	mm
Momento de fricción independiente de la carga[M ₀]		0.004	Nm
Momento de fricción dependiente de la carga[M ₁]		0.008	Nm
Momento de fricción de los rodamientos de rodillos cilíndricos[M ₂]			0.000Nm
Momento de fricción de juntas determinado según el catálogo principal 4000/IV T DE:1994			
Momento de rozamiento	[M _{loss}]	0.012	Nm
Potencia disipada	[P _{loss}]	0.192	W
El momento de fricción se calcula con datos del catálogo SKF 1994.			
Desplazamiento de cojinete	[u _x]	-2.138	µm
Desplazamiento de cojinete	[u _y]	0.000	µm
Desplazamiento de cojinete	[u _z]	5.873	µm
Desplazamiento de cojinete	[u _r]	6.250	µm (110°)
Inclinación de cojinete	[r _x]	-0.226	mrad (-0.78')
Inclinación de cojinete	[r _y]	-2.566	mrad (-8.82')

Inclinación de cojinete	[r _z]	-0.082	mrad (-0.28')
Inclinación de cojinete	[r _r]	0.241	mrad (0.83')

Árbol'Shaft1' Rodamientos 'RollerBearing3'

Posición (coordinada Y)	[y]	252.50	mm
Esfuerzo equivalente	[P]	0.13	kN
Esfuerzo equivalente	[P ₀]	0.13	kN
Factor de probabilidad de fallo	[a ₁]	1.000	
Vida nominal rodamiento	[L _{nh}]	> 1000000	h
Factor de seguridad estático	[S ₀]	60.81	
Fuerza de reacción del cojinete	[F _x]	-0.044	kN
Fuerza de reacción del cojinete	[F _y]	0.000	kN
Fuerza de reacción del cojinete	[F _z]	0.121	kN
Fuerza de reacción del cojinete	[F _r]	0.129	kN (110°)
Nivel de aceite	[H]	0.000	mm
Momento de fricción independiente de la carga[M ₀]		0.004	Nm
Momento de fricción dependiente de la carga[M ₁]		0.001	Nm
Momento de fricción de los rodamientos de rodillos cilíndricos[M ₂]			0.000Nm
Momento de fricción de juntas determinado según el catálogo principal 4000/IV T DE:1994			
Momento de rozamiento	[M _{loss}]	0.005	Nm
Potencia disipada	[P _{loss}]	0.077	W
El momento de fricción se calcula con datos del catálogo SKF 1994.			
Desplazamiento de cojinete	[u _x]	2.138	µm
Desplazamiento de cojinete	[u _y]	0.000	µm
Desplazamiento de cojinete	[u _z]	-5.873	µm
Desplazamiento de cojinete	[u _r]	6.250	µm (-70°)
Inclinación de cojinete	[r _x]	-0.160	mrad (-0.55')
Inclinación de cojinete	[r _y]	-2.855	mrad (-9.82')
Inclinación de cojinete	[r _z]	-0.058	mrad (-0.2')
Inclinación de cojinete	[r _r]	0.170	mrad (0.58')

[H] (20000.000)

No.	B1	B2	B3
1	2.00	2.00	2.00

Σ 2.00 2.00 2.00

[H] (20000.000)

B1	B2	B3
27.14	27.14	27.14

B1: RollerBearing1

B2: RollerBearing2

B3: RollerBearing3

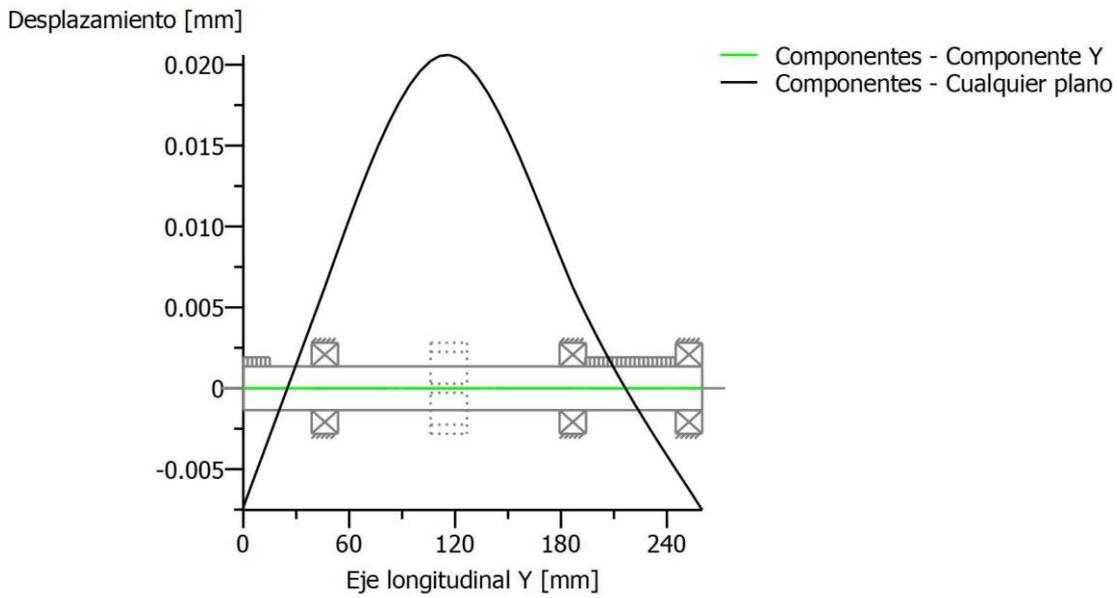
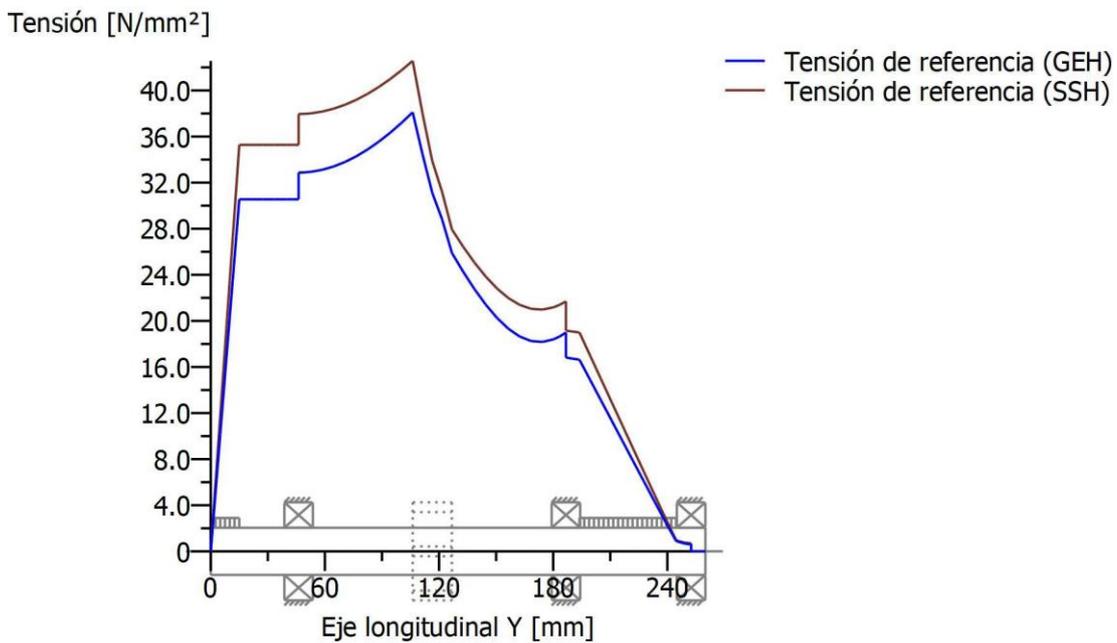


Figura: Deformación (líneas de flexión, etc.) (Cualquier plano 110 120)



Tensiones nominales, sin tener en cuenta las concentraciones de tensión
 GEH(von Mises): $\sigma_V = ((\sigma_B + \sigma_Z, D)^2 + 3 * (\tau_T + \tau_S)^2)^{1/2}$
 SSH(Tresca): $\sigma_V = ((\sigma_B - \sigma_Z, D)^2 + 4 * (\tau_T + \tau_S)^2)^{1/2}$

Figura: Tensión de referencia

O.GB.Shaft2.Shaft2_calc

KISSsoft Release 03/2016 A

Team-SolidSQUAD

Archivo

Nombre : sin denominación

Modificado por: Diseño Mecánico

día: 18.05.2020

hora: 14:23:13

Nota importante: En el cálculo han aparecido advertencias:

1-> Rodamiento núm. Árbol 'Shaft2', Rodamientos 'RollerBearing6':

¡No se alcanza la carga mínima del cojinete!

(P = 0.0 kN, Pmin = 0.2 kN, condición: P/C > 1.000 %)

Cálculo de árboles, ejes y vigas

Datos de entrada

Sistema de coordenadas del árbol: véase Fig. W-002

Denominación	Shaft2
Plano	
Posición de inicio (mm)	0.000
Longitud (mm)	221.300
Velocidad (1/min)	92.86
Sentido de giro: en sentido contrario a las agujas del reloj	
Material	C45 (1)
Módulo de elasticidad (N/mm ²)	206000.000
Número de Poisson un	0.300
Densidad (kg/m ³)	7830.000
Coefficiente de dilatación térmica (10 ⁻⁶ /K)	11.500
Temperatura (°C)	20.000
Peso del árbol (kg)	0.851
Peso del árbol, incluidas masas adicionales (kg)	1.851
Momento de inercia de masa (kg*mm ²)	66.451
Momento de inercia GD2 (Nm ²)	0.003

El peso no se tendrá en cuenta

Las deformaciones por cizallamiento se tendrán en cuenta

Factor de corrección del cizallamiento 1.100

No se tendrá en cuenta el ángulo de presión de rodamientos

Situación de tolerancia: Valor medio

Temperatura de referencia (°C) 20.000

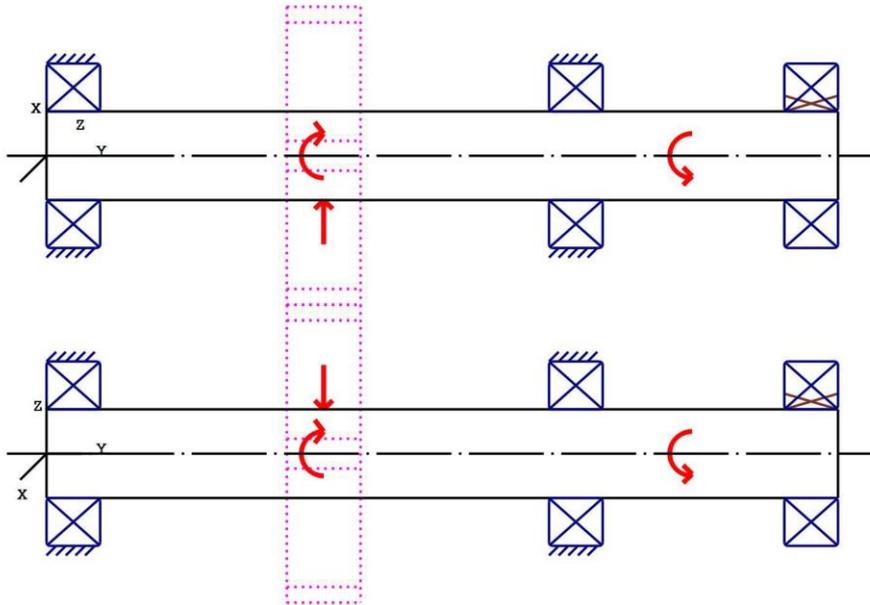


Figura: Introducciones de carga

Definición del árbol

(Shaft2)

Contorno exterior

Cilindro (Cylinder)		0.000mm ...	221.300mm
Diámetro (mm)	[d]	25.0000	
Longitud (mm)	[l]	221.3000	
Rugosidad (µm)	[Rz]	8.0000	
Ranura de chaveta (Ranura de chaveta)		67.500mm ...	87.500mm
l=20.00 (mm), Rz=8.0, Girado (Ra=3.2µm/125µin)			
Ranura de chaveta (Ranura de chaveta)		165.000mm ...	195.000mm
l=30.00 (mm), Rz=8.0, Girado (Ra=3.2µm/125µin)			

Fuerzas

Tipo del elemento de fuerza	Acoplamiento	
Denominación en el modelo	Coupling2(Output)	
Posición en el árbol (mm)	[ylocal]	213.8000
Posición en el sistema global (mm)	[yglobal]	213.8000
Diámetro activo (mm)		35.0000
Factor de fuerza radial (-)		0.0000
Sentido de la fuerza radial (°)		0.0000
Factor de fuerza axial (-)		0.0000
Longitud de la aplicación de la fuerza (mm)		15.0000
Potencia (kW)		0.0000
Momento torsor (Nm)		0.0000
Fuerza axial (N)		0.0000

Fuerza transversal X (N)	0.0000
Fuerza transversal Z (N)	0.0000
Momento flector X (Nm)	0.0000
Momento flector Z (Nm)	0.0000
Masa (kg)	1.0000
Momento de inercia de masa Jp (kg*m ²)	0.0000
Momento de inercia de masa Jxx (kg*m ²)	0.0000
Momento de inercia de masa Jzz (kg*m ²)	0.0000
Excentricidad (mm)	0.0000

Tipo del elemento de fuerza		Potencia disipada
Denominación en el modelo		PowerLoss2
Posición en el árbol (mm)	[Ylocal]	180.5000
Posición en el sistema global (mm)	[Yglobal]	180.5000
Potencia perdida (kW)		0.4250
Par equivalente (Nm)		43.7064
Longitud de la aplicación de la fuerza (mm)		50.8000

Tipo del elemento de fuerza		Engrane recto
Denominación en el modelo		z2(GearPair_const1)
Posición en el árbol (mm)	[Ylocal]	77.5000
Posición en el sistema global (mm)	[Yglobal]	77.5000
Diámetro primitivo de funcionamiento (mm)		84.0000
Dentado recto		
Ángulo de engrane de servicio en corte normal (°)		20.0000
Posición del engrane (°)		180.0000
Longitud de la aplicación de la fuerza (mm)		20.6300
Potencia (kW)		0.4250 accionado (accionamiento)
Momento torsor (Nm)		-43.7064
Fuerza axial (N)		0.0000
Fuerza transversal X (N)		378.7578
Fuerza transversal Z (N)		-1040.6285
Momento flector X (Nm)		-0.0000
Momento flector Z (Nm)		-0.0000

Cojinetes

Denominación en el modelo		RollerBearing4
Tipo de cojinete		Koyo 6205NR
Tipo de cojinete		Rodamientos de bolas (de efecto doble) (de una hilera)
Posición del cojinete (mm)	[Ylocal]	7.500
Posición del cojinete (mm)	[Yglobal]	7.500
Fijación del anillo exterior		Cojinete fijo
Diámetro interior (mm)	[d]	25.000
Diámetro exterior (mm)	[D]	52.000
Ancho (mm)	[b]	15.000
Radio angular (mm)	[r]	1.000
Capacidad de carga estática	[C ₀]	7.850
Capacidad de carga dinámica	[C]	17.500
Capacidad de carga fatiga	[C _U]	0.550
Valores para la geometría aproximada:		
Capacidad de carga dinámica (kN)	[C _{theo}]	0.000
Capacidad de carga estática (kN)	[C _{0theo}]	0.000

Denominación en el modelo	RollerBearing5
Tipo de cojinete	Koyo 6205NR

Tipo de cojinete		Rodamientos de bolas (de efecto doble) (de una hilera)
Posición del cojinete (mm)	[ylokal]	148.000
Posición del cojinete (mm)	[yglobal]	148.000
Fijación del anillo exterior		Cojinete fijo
Diámetro interior (mm)	[d]	25.000
Diámetro exterior (mm)	[D]	52.000
Ancho (mm)	[b]	15.000
Radio angular (mm)	[r]	1.000
Capacidad de carga estática	[C ₀]	7.850
Capacidad de carga dinámica	[C]	17.500
Capacidad de carga fatiga	[C _U]	0.550
Valores para la geometría aproximada:		
Capacidad de carga dinámica (kN)	[C _{theo}]	0.000
Capacidad de carga estática (kN)	[C _{0theo}]	0.000

Denominación en el modelo		RollerBearing6
Tipo de cojinete		Koyo 6205NR
Tipo de cojinete		Rodamientos de bolas (de efecto doble) (de una hilera)
Posición del cojinete (mm)	[ylokal]	213.800
Posición del cojinete (mm)	[yglobal]	213.800
Fijación del anillo exterior		Cojinete axial
Diámetro interior (mm)	[d]	25.000
Diámetro exterior (mm)	[D]	52.000
Ancho (mm)	[b]	15.000
Radio angular (mm)	[r]	1.000
Capacidad de carga estática	[C ₀]	7.850
Capacidad de carga dinámica	[C]	17.500
Capacidad de carga fatiga	[C _U]	0.550
Valores para la geometría aproximada:		
Capacidad de carga dinámica (kN)	[C _{theo}]	0.000
Capacidad de carga estática (kN)	[C _{0theo}]	0.000

Resultados

Árbol

Flexión máxima (mm)	0.023
Posición del máximo (mm)	77.500
Gravicentro de masa (mm)	110.650
Suma del esfuerzo axial (N)	0.000
Deformación bajo momento torsor (°)	0.085

Cojinetes

Probabilidad de fallo	[n]	10.00	%
Juego axial	[u _A]	10.00	µm
Rodamientos clásicos (considerar el ángulo de presión)			

Árbol 'Shaft2' Rodamientos 'RollerBearing4'

Posición (coordinada Y)	[y]	7.50	mm
Esfuerzo equivalente	[P]	0.56	kN
Esfuerzo equivalente	[P ₀]	0.56	kN
Factor de probabilidad de fallo	[a ₁]	1.000	
Vida nominal rodamiento	[L _{nh}]	> 1000000	h
Factor de seguridad estático	[S ₀]	14.13	
Fuerza de reacción del cojinete	[F _x]	-0.190	kN
Fuerza de reacción del cojinete	[F _y]	0.000	kN
Fuerza de reacción del cojinete	[F _z]	0.522	kN
Fuerza de reacción del cojinete	[F _r]	0.556	kN (110°)
Nivel de aceite	[H]	0.000	mm
Momento de fricción independiente de la carga[M ₀]		0.003	Nm
Momento de fricción dependiente de la carga[M ₁]		0.005	Nm
Momento de fricción de los rodamientos de rodillos cilíndricos[M ₂]			0.000Nm
Momento de fricción de juntas determinado según el catálogo principal 4000/IV T DE:1994			
Momento de rozamiento	[M _{loss}]	0.008	Nm
Potencia disipada	[P _{loss}]	0.080	W
El momento de fricción se calcula con datos del catálogo SKF 1994.			
Desplazamiento de cojinete	[u _x]	2.138	µm
Desplazamiento de cojinete	[u _y]	0.000	µm
Desplazamiento de cojinete	[u _z]	-5.873	µm
Desplazamiento de cojinete	[u _r]	6.250	µm (-70°)
Inclinación de cojinete	[r _x]	-0.323	mrad (-1.11')
Inclinación de cojinete	[r _y]	0.000	mrad (0')
Inclinación de cojinete	[r _z]	-0.117	mrad (-0.4')
Inclinación de cojinete	[r _r]	0.343	mrad (1.18')

Árbol'Shaft2' Rodamientos 'RollerBearing5'

Posición (coordinada Y)	[y]	148.00	mm
Esfuerzo equivalente	[P]	0.55	kN
Esfuerzo equivalente	[P ₀]	0.55	kN
Factor de probabilidad de fallo	[a ₁]	1.000	
Vida nominal rodamiento	[L _{nh}]	> 1000000	h
Factor de seguridad estático	[S ₀]	14.23	
Fuerza de reacción del cojinete	[F _x]	-0.189	kN
Fuerza de reacción del cojinete	[F _y]	0.000	kN
Fuerza de reacción del cojinete	[F _z]	0.518	kN
Fuerza de reacción del cojinete	[F _r]	0.552	kN (110°)
Nivel de aceite	[H]	0.000	mm
Momento de fricción independiente de la carga[M ₀]		0.003	Nm
Momento de fricción dependiente de la carga[M ₁]		0.005	Nm
Momento de fricción de los rodamientos de rodillos cilíndricos[M ₂]			0.000Nm
Momento de fricción de juntas determinado según el catálogo principal 4000/IV T DE:1994			
Momento de rozamiento	[M _{loss}]	0.008	Nm
Potencia disipada	[P _{loss}]	0.080	W
El momento de fricción se calcula con datos del catálogo SKF 1994.			
Desplazamiento de cojinete	[u _x]	2.138	µm
Desplazamiento de cojinete	[u _y]	0.000	µm
Desplazamiento de cojinete	[u _z]	-5.873	µm
Desplazamiento de cojinete	[u _r]	6.250	µm (-70°)
Inclinación de cojinete	[r _x]	0.322	mrad (1.11')
Inclinación de cojinete	[r _y]	1.014	mrad (3.49')
Inclinación de cojinete	[r _z]	0.117	mrad (0.4')
Inclinación de cojinete	[r _r]	0.343	mrad (1.18')

Árbol 'Shaft2' Rodamientos 'RollerBearing6'

Posición (coordinada Y)	[y]	213.80	mm
Esfuerzo equivalente	[P]	0.00	kN
Esfuerzo equivalente	[P ₀]	0.00	kN
Factor de probabilidad de fallo	[a ₁]	1.000	
Vida nominal rodamiento	[L _{nh}]	> 1000000	h
Factor de seguridad estático	[S ₀]	9999.99	
Fuerza de reacción del cojinete	[F _x]	0.000	kN
Fuerza de reacción del cojinete	[F _y]	0.000	kN
Fuerza de reacción del cojinete	[F _z]	0.000	kN
Fuerza de reacción del cojinete	[F _r]	0.000	kN
Nivel de aceite	[H]	0.000	mm
Momento de fricción independiente de la carga[M ₀]		0.002	Nm
Momento de fricción dependiente de la carga[M ₁]		0.000	Nm
Momento de fricción de los rodamientos de rodillos cilíndricos[M ₂]			0.000Nm
Momento de fricción de juntas determinado según el catálogo principal 4000/IV T DE:1994			
Momento de rozamiento	[M _{loss}]	0.002	Nm
Potencia disipada	[P _{loss}]	0.018	W
El momento de fricción se calcula con datos del catálogo SKF 1994.			
Desplazamiento de cojinete	[u _x]	-5.575	µm
Desplazamiento de cojinete	[u _y]	0.000	µm
Desplazamiento de cojinete	[u _z]	15.317	µm
Desplazamiento de cojinete	[u _r]	16.300	µm (110°)
Inclinación de cojinete	[r _x]	0.322	mrاد (1.11')
Inclinación de cojinete	[r _y]	1.482	mrاد (5.09')
Inclinación de cojinete	[r _z]	0.117	mrاد (0.4')
Inclinación de cojinete	[r _r]	0.343	mrاد (1.18')

Daños (%) [H] (20000.000)

No.	B1	B2	B3
1	2.00	2.00	2.00

Σ	2.00	2.00	2.00

Utilización (%) [H] (20000.000)

B1	B2	B3
27.14	27.14	27.14

- B1: RollerBearing4
- B2: RollerBearing5
- B3: RollerBearing6

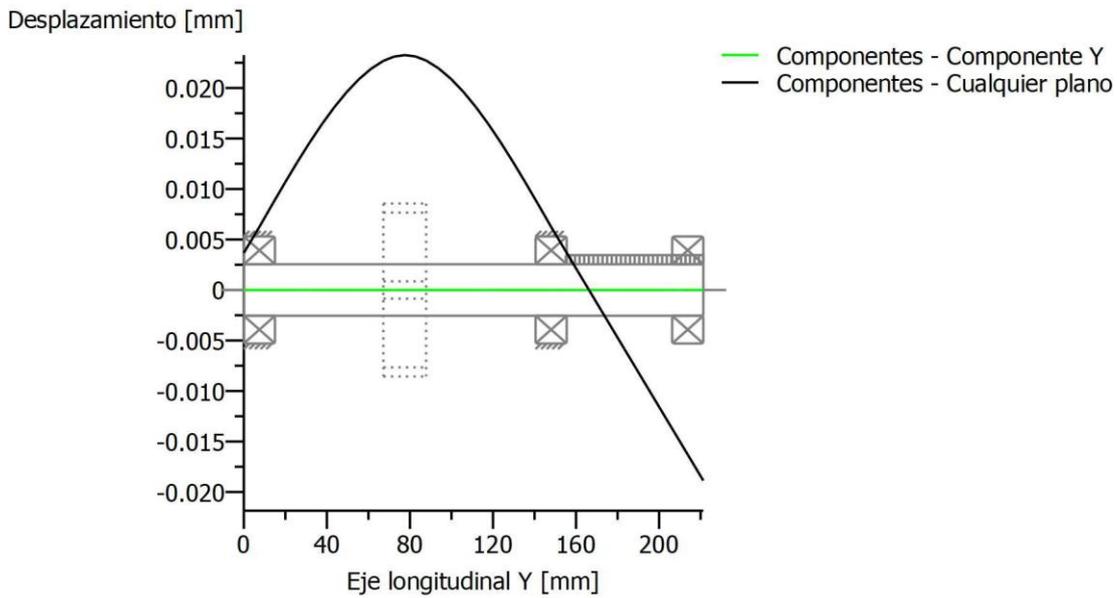
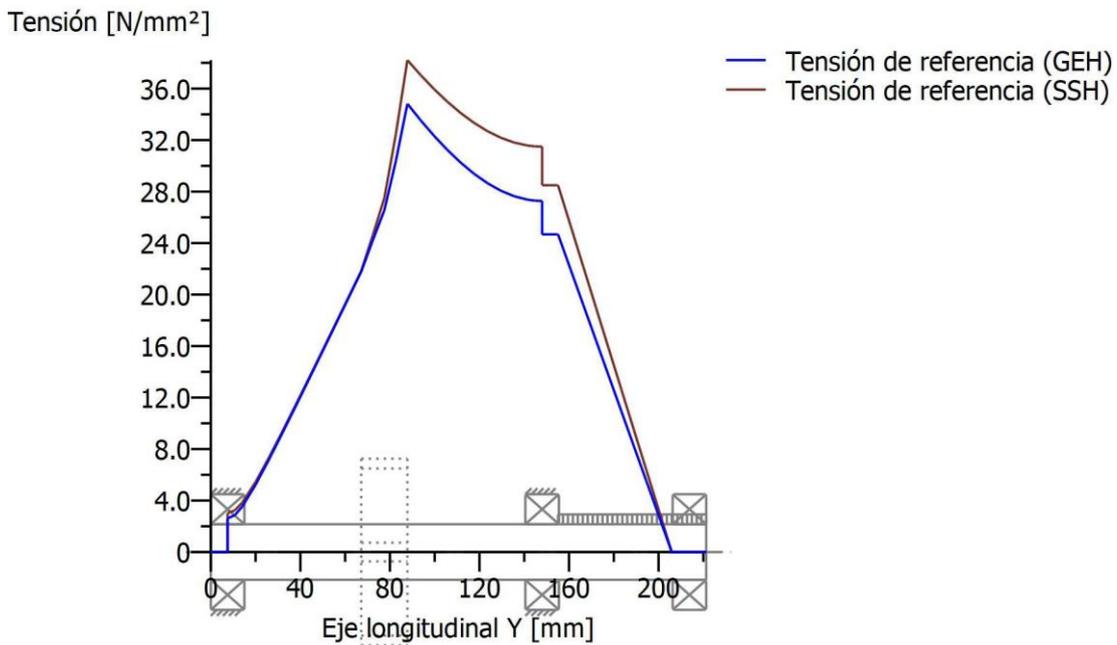


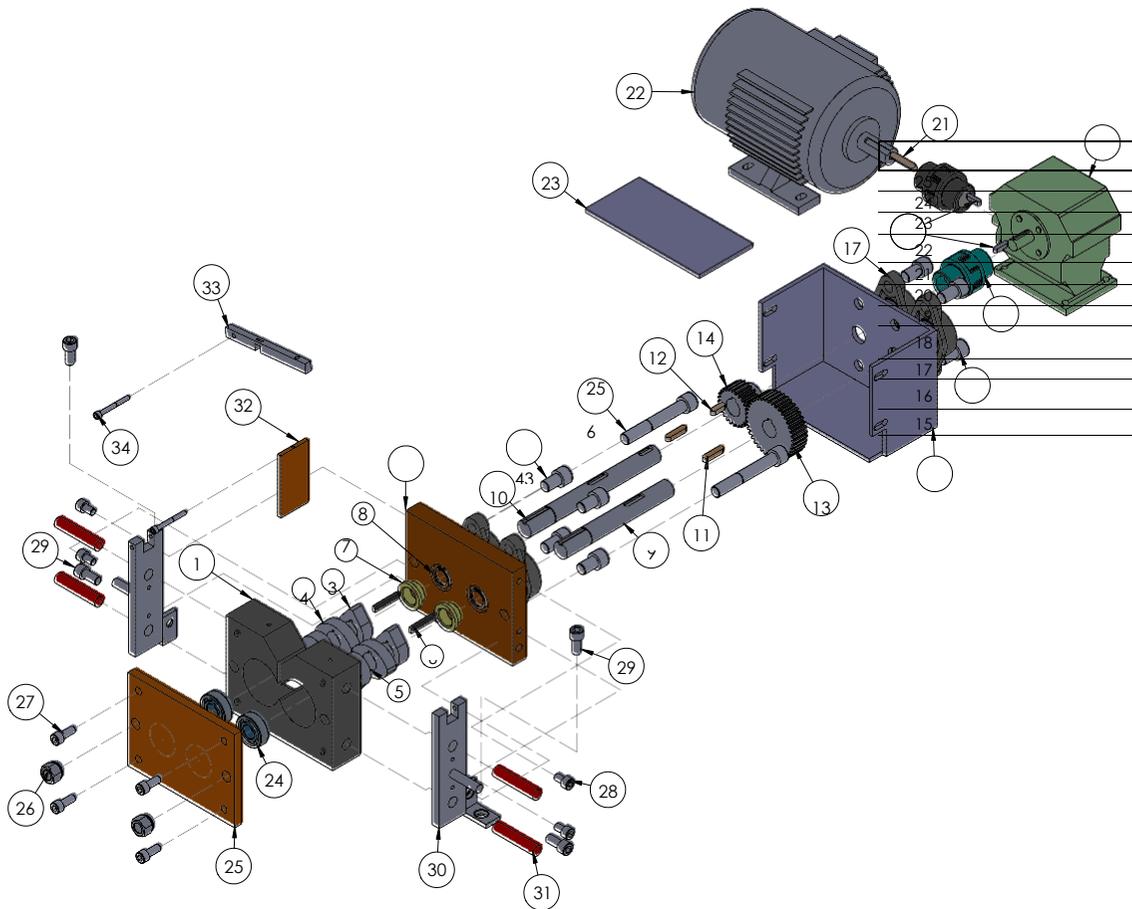
Figura: Deformación (líneas de flexión, etc.) (Cualquier plano 290 120)



Tensiones nominales, sin tener en cuenta las concentraciones de tensión
 GEH(von Mises): $\sigma_V = ((\sigma_B + \sigma_Z, D)^2 + 3 * (\tau_T + \tau_S)^2)^{1/2}$
 SSH(Tresca): $\sigma_V = ((\sigma_B - \sigma_Z, D)^2 + 4 * (\tau_T + \tau_S)^2)^{1/2}$

Figura: Tensión de referencia

D. Anexo IV: Plano



34	Bulón	DIN 912-M6x1-55mm	2	----
33	Barra	-----	1	ASTM A36
32	Tapa	-----	1	ASTM A36
31	Resistencia	∅ 5/8"x3"	4	----
30	Agarradera	-----	2	AISI 4140
29	Bulón	DIN 912-M12x1,5-25mm	4	----
28	Bulón	DIN 912-M10x1,5-16mm	4	----
27	Bulón	DIN 912 M10x1,5-25 mm	4	----
26	Tuerca	DIN 6924 M16x1,5-12 mm	2	----
Pared front	-----	-----	1	AISI 4140
Rodamient	Koyo 6205NR	-----	2	-----
Tapa	-----	-----	1	----
Motor Eléc	380V 1450 RPM	-----	1	-----
Chaveta	DIN 6886 8x7x45 mm	-----	1	AISI 4140
Reductor	V50H	-----	1	-----
Chaveta	DIN 6886 6x6x25 mm	-----	2	AISI 4140
ACcoplami	Tipo Gummi A-30	-----	2	----
Rodamient	Koyo 6205NR	-----	4	-----
Bulón	DIN 912 M16x1,5-25 mm	-----	8	----
Carter	-----	-----	1	ASTM A36
14	Piñón	-----	1	C45 (TEMPLADO/IND. SEGÚN ISO 6336-5)
13	Engrane	-----	1	C45 (TEMPLADO/IND. SEGÚN ISO 6336-5)
12	Chaveta	Eje Acople	2	AISI 4140
11	Chaveta	Eje Engrane	2	AISI 4140
10	Eje R	-----	1	AISI 1045
9	Eje L	-----	1	AISI 1045
8	Seeger	221760-25 mm	2	----
7	Cojinete	-----	2	TEFLÓN
6	Chaveta	-----	2	AISI 4140
5	Rotor cam 3	-----	2	AISI 4140
4	Rotor cam 2	-----	2	AISI 4140
3	Rotor cam 1	-----	2	AISI 4140
2	Pared posterior	-----	1	ASTM A36
1	Cámara de mezcla	-----	1	ASTM A36
POS.	DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	MATERIAL

REALIZO	G. DAVIES	19/05/2020	FRM.A	FACULTAD DE INGENIERÍA DPTO. MECÁNICA APLICADA <small>UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE</small> <small>1915</small>	NP - 01 REV.: 0 Reempl. a: Reempl. por:
REVISÓ	D. CAMPOS	19/05/2020			
APROBÓ	D. CAMPOS	19/05/2020			
ESC. 1:5				EQUIPO DE LABORATORIO PARA EL ESTUDIO DE PROCESAMIENTO DE TERMOPLÁSTICOS	
A3					