



## IND 4.0 2017: E3 - Informe de hoja de ruta



## Índice

Introducción .....	3
Contexto .....	3
Convergencia IT/OT .....	4
Tecnología obsoleta .....	5
Factor humano .....	5
Gestión de datos personales .....	6
Reindustrialización .....	6
Nuevos modelos de negocio .....	6
Estado actual CV .....	7
Metodología de implantación .....	8
Modelo de madurez .....	10
RAMI 4.0 .....	18
Estándares incluidos .....	24
Hoja de ruta .....	27
Pruebas aplicadas a procesos de transformación .....	31
Inyección .....	31
Extrusión .....	69
Compounding .....	103
Conclusiones .....	128

## Introducción

Este informe tiene como finalidad presentar las diferentes implicaciones que supone la irrupción de la industria 4.0 en el sector transformador del plástico, así como proponer una metodología ordenada para la implementación de las posibles soluciones dentro del marco de industria 4.0. En las primeras líneas del presente documento se presentan los orígenes de la industria 4.0 así como el contexto tecnológico en el que se desarrolla esta cuarta revolución industrial y se expone la situación de la Comunitat Valenciana para posteriormente ayudar con el mismo a definir la hoja de ruta propia de cada empresa para la actualización de la industria a los nuevos cánones. Todas estas medidas se han llevado a cabo por medio de las siguientes acciones:

- El análisis del contexto e implicaciones de la actualización de una compañía a la industria 4.0, información que debe ser la prerrogativa para cualquier entidad que desee actualizarse partiendo de un conocimiento limitado de IT
- El análisis de las metodologías para la transformación digital de las empresas en general, así como los modelos de referencia que existen en la actualidad y, considerando las características de los procesos objetivo y se planteó una primera versión del Modelo Industria 4.0.
- Desarrollo de toda la metodología para aplicar el modelo en la empresa, desde la generación de los niveles de madurez digital, hasta la explicación de la arquitectura predominante el marco europeo.
- Definición de los procesos de transformación más significativos dentro del sector transformador del plástico como son Inyección, Extrusión y Compounding. Además, se han identificado un conjunto de variables de proceso, producto, operación y ambientales que pueden tener influencia, a priori, sobre el resultado del mismo.

## Contexto

El concepto de industria 4.0 nace a principios de esta década en Alemania concretamente en la feria de Hannover de 2011, lo que conduce en 2013 a la adopción formal del término por el gobierno alemán. Aunque es cierto que muchos de los conceptos que engloba ya estaban presentes previamente en ferias y exposiciones, como por ejemplo el Internet de las cosas en adelante IoT, es un concepto subyacente de la industria 4.0.

Y si bien el concepto de IoT fue públicamente acuñado en 2009 por un ingeniero del MIT ya tenía presencia desde casi una década atrás en pequeños círculos de investigación principalmente centrados en sistemas de identificación mediante RFID para cadenas de producción.

A pesar de que los orígenes del IoT fueron aplicaciones directas para la industria se ha ido diversificando, por lo que finalmente se acuñó el término Internet industrial de las cosas en adelante IIoT para referirse exclusivamente a sus aplicaciones puramente industriales.

Volviendo a la industria 4.0, no existe una definición estricta de lo que puede ser considerado o no como 4.0, para hacernos una idea aproximada de la dificultad para definir el concepto, solo en 2015 se pudieron recoger 134<sup>1</sup> definiciones para el término. En general puede describirse como la adopción masiva de las nuevas tecnologías con internet a la cabeza, a todos los procesos de una fábrica derivadas de servicios y pueden identificarse 4 principios básicos, que intervienen de forma recursiva en cada una de sus implicaciones:

---

<sup>1</sup> Wolfgang Dorst, director del área de Industria 4.0 de la asociación digital Bitkom, en la II edición "Basque Industry 4.0.(2015)

- **Interoperabilidad:** La capacidad de las máquinas, dispositivos, sensores y personas para conectarse y comunicarse entre sí a través de la IoT o internet de las personas, también llamado IoP.
- **Transparencia de la información:** La capacidad de los sistemas de información para crear una copia virtual del mundo físico mediante el enriquecimiento de modelos de plantas digitales con datos de sensores. Esto requiere la agregación de sensores para captar los datos en bruto.
- **Asistencia técnica:** En primer lugar, la capacidad de los sistemas de asistencia para apoyar a los seres humanos mediante la agregación y visualización de información de manera comprensible para tomar decisiones informadas y resolver problemas urgentes con poca antelación. En segundo lugar, la capacidad de los sistemas ciberfísicos de apoyar físicamente a los seres humanos llevando a cabo una serie de tareas que son desagradables, demasiado agotadoras o inseguras para sus colaboradores humanos.
- **Decisiones descentralizadas:** La capacidad de los sistemas ciberfísicos, de tomar decisiones por sí mismos y realizar sus tareas de la manera más autónoma posible. Sólo en el caso de excepciones, interferencias u objetivos contradictorios, son tareas delegadas a un nivel superior.

El surgimiento del nuevo grupo de tecnologías industriales digitales conocida como Industria 4.0, últimamente ha despertado mucho interés desde investigadores, fabricantes y desarrolladores de aplicaciones. El objetivo de Industria 4.0 es conectar e integrar todos los objetos del mundo tradicional de la fábrica para permitir un uso más rápido, más flexible y más eficiente procesos para producir productos de mayor calidad a bajo costo.

Industria 4.0 traerá grandes oportunidades para promover mejoras industriales para aumentar la productividad de fabricación, economía de turnos, crecimiento industrial más rápido e integración de procesos de oferta y demanda entre las fábricas. Esto modificará el perfil de la mano de obra, en última instancia, cambiando la competitividad de las empresas y las regiones. En la industria 4.0, la conexión inalámbrica o los sistemas conectados por cable que se encuentran en diferentes lugares remotos pueden interactuar entre sí utilizando el estándar Protocolos basados en Internet y analizan datos para predecir fallas, configurar ellos mismos y adaptarse a los cambios.

Actualmente, la mayoría de los dispositivos dentro de las fábricas están conectados en base a una infraestructura cableada que funciona en protocolos; sin embargo, las soluciones inalámbricas desempeñan cada vez más un papel complementario a las soluciones por cable. Con este fin, las redes inalámbricas industriales son la tecnología clave que permite el despliegue de la industria 4.0, ya que puede ofrecer una reducción en el consumo de energía, aumentar los beneficios económicos con menos mantenimiento y averías, y permite una producción inteligente. Esto no solo afecta la comunicación máquina a máquina (M2M), sino también tendrá consecuencias de gran alcance para la interacción de los ingenieros y el sistema embebido e inalámbrico tecnologías.

La Industria 4.0 está estrechamente ligada con la Transformación Digital, pero a nivel productivo e industrial a gran escala. Este hecho, que se presenta irreversible y necesario para el avance de las sociedades modernas, lleva consigo una serie de implicaciones que lo hacen profundamente especial. Estas implicaciones, que se detallan a continuación son principalmente la convergencia IT/OT, la reindustrialización y los nuevos modelos de negocio.

Una vez tratadas las implicaciones de seguridad de la Convergencia IT/OT podemos entrar a comentar las oportunidades que brinda a la industria de países ya desarrollados.

### Convergencia IT/OT

Hasta hace poco, los sistemas de tecnologías de la información (IT) servían para relacionar los datos con personas, mientras que los sistemas de tecnologías de operación (OT) se utilizaban para relacionar las personas con los dispositivos electromecánicos.

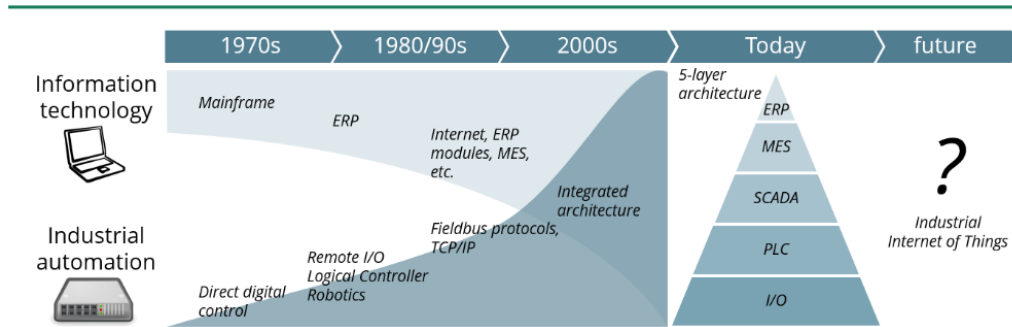


Figura 1. Convergencia OT/IT Fuente: LNS Reseach.

Hasta ahora los dos mundos IT y OT, habían permanecido aislados, independientes, con desarrollos paralelos. Ahora los grandes proveedores del mundo IT quieren interactuar con los dispositivos físicos y están ofreciendo soluciones que en muchos aspectos pueden ya competir con la oferta tradicional de los sistemas SCADA.

Con el uso más generalizado de tecnologías de IT a nivel operacional, las cosas están cambiando desde un punto de vista técnico. Algunos ejemplos simples incluyen el uso de la tecnología con la adopción continua de bases de datos SQL para recopilar y analizar datos de producción y proceso; La rápida adopción de protocolos de comunicación basados en Ethernet a nivel de máquina; la rápida difusión de interfaces de usuario basadas en web; Y la creciente popularidad de las soluciones móviles para acceder a los datos y realizar tareas que requieren redes Wi-Fi a nivel de planta.

Comúnmente el mundo OT mucho más físico y específico según el área de aplicación presentaba siempre unos costes más elevados y mantenía sus barreras de entrada gracias a protocolos de comunicación exclusivos, los grandes fabricantes eran los que imponían sus leguajes y protocolos. Estas barreras están cayendo gracias a la estandarización de los protocolos. Ahora cada vez son más los sistemas físicos que admiten comunicación vía Ethernet/IP u otros derivados de EtherNet (EtherCAT, Profinet ...).

Si bien es cierto que supondrá una clara reducción de costes y opciones de interoperabilidad sin precedentes, surgen problemas de seguridad que es conveniente conocer:

### Tecnología obsoleta

A diferencia de los sistemas de IT que se actualizan de forma constante y a menudo automática con los service packs, las nuevas versiones y las correcciones de errores, en la mayoría de las empresas los dispositivos OT suelen ejecutar el mismo software que utilizaron cuando se instalaron inicialmente, que en muchos casos puede tener entre 10 y 15 años. Además, estos dispositivos prácticamente no tienen capacidad de seguridad porque se instalaron en un momento en que se consideraba "seguros" o con una separación física de los sistemas informáticos.

### Factor humano

La seguridad de la infraestructura de IT de una empresa también depende del factor humano. En virtud de su estado como usuarios de sistemas de IT corporativos, los empleados tienen acceso a dichos sistemas. Esto puede dar lugar a un error humano involuntario, negligencia o mala conducta intencional, por un lado. Y por otro lado, la influencia delictiva podría ocasionar un daño significativo y también un riesgo para la seguridad de los datos personales. Comportamiento humano típico como la curiosidad o la falta de atención son explotados por los agentes delictivos como un medio de atacar los sistemas de IT. Los puntos débiles típicos incluyen:

- **Seguridad insuficiente:** Debido al uso de contraseñas que son demasiado simples.
- **Estafas de phishing,** Es decir, mensajes de correo electrónico falsificados o sitios web falsificados que lo hacen posible para obtener acceso no autorizado a un sistema o para obtener datos.

- **Ingeniería social:** Es decir, obtención de datos confidenciales por medios ilícitos, haciendo contacto con los empleados y pretender ser una persona diferente o pretender tener una posición particular.

Es especialmente difícil estimar las consecuencias de los ataques motivados por motivos delictivos. Las compañías por lo tanto se enfrentan a la tarea de formular reglas y códigos de conducta que rigen el uso del sistema de IT de la compañía y el manejo de datos confidenciales.

En primer lugar, los sistemas de software deben diseñarse para ayudar a los usuarios a percibir los riesgos y determinar cómo responder adecuadamente a ellos. Esto requiere sesiones de información e instrucción para enseñar a los empleados a reconocer los riesgos y ataques en una etapa temprana y a comportarse de una manera que proteja la seguridad. Además, para crear conciencia sobre estos temas, debería haber una campaña que involucre a todos los empleados que tienen acceso al sistema IT.

### Gestión de datos personales

También es importante ser consciente de la importancia a la hora de realizar la gestión de datos de carácter personal, que a pesar de existir normativa al respecto como la ISO 27001 o la NIST 800-53, su implantación está todavía muy poco extendida, a nivel europeo más del 40% de las empresas (2017) aseguran no estar acogiéndose a ningún estándar. Y en este ámbito hay que destacar que el reglamento europeo de protección de datos GDPR que será de obligatorio cumplimiento en mayo de 2018.

### Reindustrialización

Por supuesto hay que también conocer los aspectos positivos, si bien con la globalización originalmente los efectos fueron descentralización de la fabricación y fuertes economías de escala, con la industria 4.0 gracias a la reducción del factor humano a través de la integración de las nuevas tecnologías (p.ej robótica colaborativa) y las nuevas técnicas de fabricación (p.ej fabricación aditiva), se da pie a nuevos modelos de negocio en los que la fabricación está **más cerca del punto de consumo**, lo que no solo supone una reducción del gasto asociado al transporte también una menor huella de carbono y unos plazos de entrega mejorados. Esto además brinda al sector del plástico valenciano una oportunidad sin precedentes a la hora de competir con los fabricantes de países emergentes.

### Nuevos modelos de negocio

Además, gracias a la conectividad entre las características más destacables de la industria 4.0 es la cantidad de información que dispone el fabricante acerca de clientes y proveedores, así como favorecer mucho. Las implicaciones de esto son incontables. Van desde la posibilidad de reducción de la capacidad de almacenes a fabricación en tiempo real bajo demanda en lotes de una sola unidad y anticipación al mercado.

## Estado actual CV

En este apartado se tratan brevemente los resultados del estudio acerca del estado actual de digitalización en el sector transformador del plástico de la Comunitat Valenciana llevado a cabo por AIMPLAS en el tercer trimestre del año 2017. Para acceder a información más detallada se recomienda consultar el informe de resultados del estudio AIMPLAS 4.0.

Entre las empresas participantes destacamos el siguiente porcentaje de participación por sector, 49,2% de empresas pertenecientes al sector de la inyección y un 19,7% pertenecientes al sector de la extrusión, hay presencia de otros sectores, pero no tienen un peso significativo.

En lo referente al nivel de la implantación de la industria 4.0 el 36% de las empresas encuestadas afirmaron estar concienciados y tener una estrategia de transformación a la industria 4.0. Lo que pone al sector del plástico ligeramente por debajo de la media intersectorial española es del 38% según el estudio llevado a cabo por Roland Berger y Siemens en 2016.

En lo referente al tema de gestión el 78,7% de los encuestados afirmó tener un sistema ERP implantado, aunque solo el 13,1% lo tiene en la modalidad cloud computing. En contraste con el informe de Roland Berger que sitúa el nivel de uso del servicio de computación en nube a nivel intersectorial en un 20%.

El 49% de las empresas encuestadas tienen implantados controladores lógicos programables, el 39% tienen implantado sistemas robotizados y el 41% se valen de máquinas programables (control numérico).

El nivel de inteligencia actual de los sistemas implementados, el 23% del sector del plástico tiene un nivel de inteligencia únicamente descriptivo. Un 46% llegan a nivel de diagnóstico mientras que un 23% consideran que su nivel de inteligencia alcanza el nivel predictivo.

Solo el 26,2% de las empresas transformadoras del plástico afirmo disponer de servicio de venta online, ligeramente por debajo de la media intersectorial.

A pesar de ello la tendencia general a la digitalización es innegable, en 4 años se ha pasado del 75% a más del 93% de empresas con página web, el fuerte auge de las redes sociales como medio de las empresas para interactuar con el cliente que se ha triplicado también en este periodo.

Mas de un 42% de los encuestados ha asegurado disponer actualmente de soluciones enfocadas a la trazabilidad del producto y el 62% afirmo disponer de wearables lectores de códigos, dos datos que se entienden mejor juntos. El seguimiento mediante códigos inteligentes se postula como una de las soluciones 4.0 con mejor entrada en el sector.

La implantación de dispositivos móviles en el sector empresarial a nivel nacional 65% está por encima de la media europea 61%, nuestros datos casan con este estudio, donde un 65,6% de los encuestados aseguro disponer en planta de dispositivos móviles facilitados por la empresa.

Un fuerte contraste con lo mencionado es el comercio online, al no disponer de unos datos de referencia relacionados exclusivos del sector del plástico, resulta difícil medir la progresión de este. Pero de los datos obtenidos no se ve ningún avance significativo, se trata pues uno de los puntos con mayor margen de mejora potencial.

A nivel nacional el 70% de los consumidores realizan búsquedas online antes de comprar, unos puntos por debajo de la media europea y solo el 13% venden online bastante lejos de la media europea intersectorial donde es el 23%.

## Metodología de implantación

Una vez definido el estado actual de la Comunitat Valenciana, para facilitar el desarrollo por parte de las empresas de su propia hoja de ruta, definiremos el modelo de implantación a seguir propuesto para actualización a la industria 4.0.

El **modelo de implantación** propuesto parte definiendo **3 niveles**, el primero es un análisis de las tecnologías disponibles aplicables en la industria, esto es conocer por parte de la empresa las diferentes tecnologías habilitadoras, las implicaciones de éstas, **concienciación** por parte de la empresa desde la dirección a los operarios para minimizar reticencias al cambio, paso necesario antes de efectuar cualquier acción posterior. Posteriormente en el segundo nivel aplica madurez digital de cada una de las áreas de la empresa.

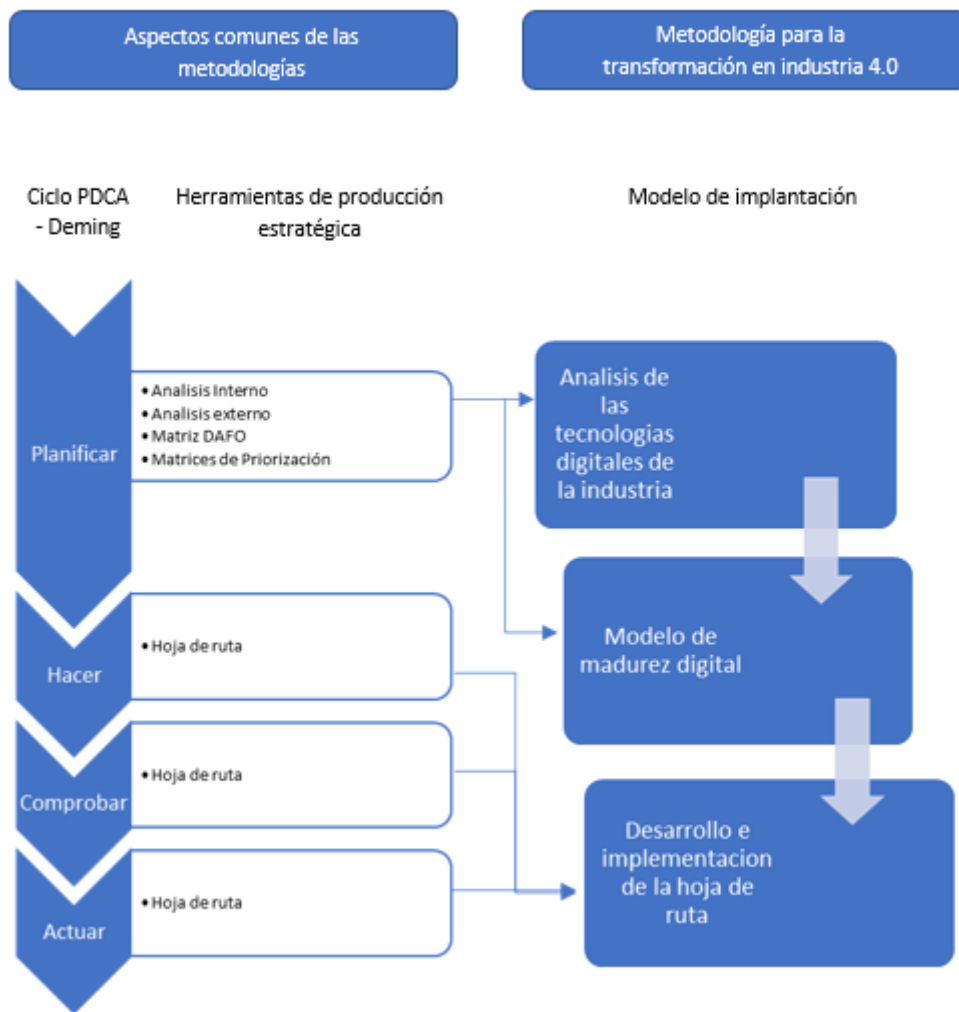


Figura 2. Comparativa estructura modelo de implantación.

Una vez ubicado el punto de partida concreto de forma que permita conocer las capacidades de la empresa para adoptar las posibles soluciones digitales y que sistemas o procesos serán necesarios para su implantación futura. Herramientas como el HADA o las tablas de madurez presentadas más adelante pueden ayudarle a acelerar este proceso, finalmente la realización la matriz de priorización por parte de la empresa el último paso antes de pasar al siguiente nivel en el modelo de implantación. El tercer nivel es la definición y ejecución de las acciones de implementación de digitalización de la hoja de ruta propiamente dicha. Es necesario destacar que ésta debe ser realizada de forma **individualizada** atendiendo a las particularidades de la compañía, para asistir a la empresa en este nivel se definen los

diferentes estándares existentes a nivel global y se profundiza en la arquitectura predominante a nivel europeo RAMI4.0.

El modelo de implantación propuesto presentado tiene una serie de etapas generales. Y propone un enfoque similar al de la metodología **PDCA**, comúnmente utilizada en sistemas de gestión (Calidad, Medioambiental, I+D+i, etc.), y utilizan algunas herramientas comúnmente utilizadas en proyectos de planificación estratégica.

En la figura 2, se muestra un esquema de dichas correspondencias identificadas entre ambas metodologías, y aquellos aspectos que recuerdan al **círculo PDCA**, figura 3, así como a algunas herramientas típicas de **planificación estratégica**, como son el análisis DAFO y las matrices de priorización. Todo esto en relación la metodología propuesta para la transformación a la industria 4.0.

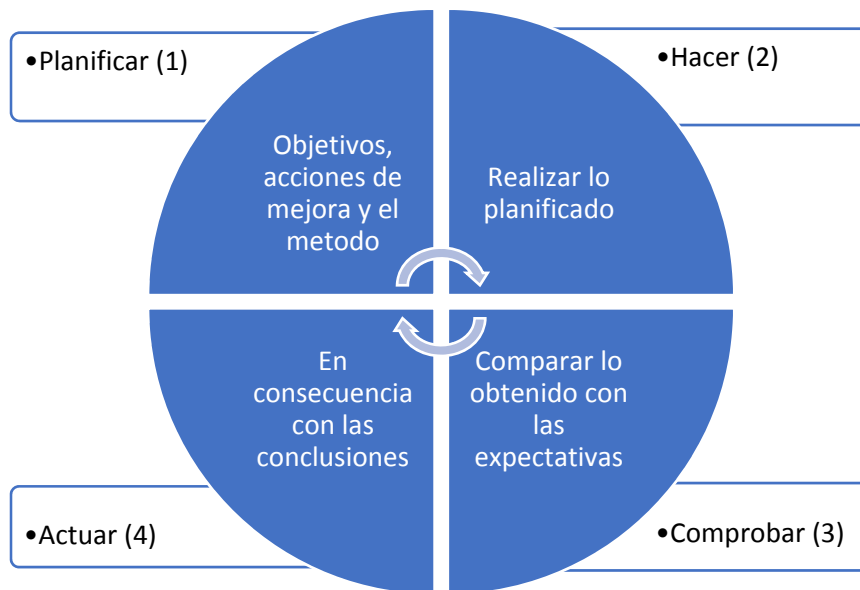


Figura 3. Circulo PDCA

- **Planificar:** Se establecen las actividades del proceso, necesarias para obtener el resultado esperado. Al basar las acciones en el resultado esperado, la exactitud y cumplimiento de las especificaciones a lograr se convierten también en un elemento a mejorar. Cuando sea posible conviene realizar pruebas de preproducción o pruebas para probar los posibles efectos.
- **Hacer:** Se realizan los cambios para implantar la mejora propuesta. Generalmente conviene hacer una prueba piloto para probar el funcionamiento antes de realizar los cambios a gran escala.
- **Comprobar:** Pasado un periodo previsto de antemano, los datos de control son recopilados y analizados, comparándolos con los requisitos especificados inicialmente, para saber si se han cumplido y, en su caso, evaluar si se ha producido la mejora esperada.
- **Actuar:** A partir de los resultados obtenidos en la fase anterior se procede a recopilar lo aprendido y a ponerlo en marcha. También suelen aparecer recomendaciones y observaciones que suelen servir para volver a la fase inicial de planificación y así el círculo nunca dejará de fluir.

## Modelo de madurez

Del estudio realizado se puede evidenciar que son muchas las empresas que han empezado a digitalizar su negocio, pero a menudo el proceso ha comenzado en pequeños ámbitos organizacionales, en lugar de a través de un enfoque holístico. Resulta vital tomarse el tiempo necesario para evaluar el nivel de madurez en todas las áreas de Industria 4.0 para que entender qué fortalezas es posible desarrollar, y qué sistemas o procesos que puede necesitar para integrar en futuras soluciones.

El objetivo final es convertirse en una empresa en **mejora continua** y con **ágil adaptación a un entorno cambiante**. El modelo de madurez proporciona a las empresas orientación para llevar a cabo esta transformación.

Desde AMPLAS instamos a que las empresas desarrollen su enfoque más allá de la técnica de implementación y consideren qué impacto podrían tener las nuevas aplicaciones en cadena de valor, relaciones con proveedores y clientes, así como la mejorar la accesibilidad de sus clientes.

En la hoja de ruta la empresa tendrá que considerar futuros cambios en el comportamiento del cliente y cómo será su relación con ellos. Porque al final las compañías que aspiren a alcanzar el máximo nivel de digitalización deben embarcarse en un viaje que comienza con pequeñas mejoras, pero que terminan en última instancia, en una transformación del negocio central.

A continuación, se presentarán algunos ejemplos de distintos modelos de madurez propuestos, en base las características, los niveles de madurez propuestos y las dimensiones (o pilares) del mismo.

	PwC	Acatech	AIMPLAS
Modelo	Modelo de madurez de las capacidades de la industria 4.0.	Índice de madurez para la industria 4.0.	Modelo de madurez de industria 4.0.
Características	Se basa en las conclusiones sacadas de un estudio con 2000 participantes, representantes de nuevos sectores industriales y 26 países. Además de la experiencia de trabajar con empresas líderes.	El índice se basa en el marco de producción y gestión. El marco divide los aspectos internos de una empresa en la estructura corporativa, procesos corporativos y corporativos desarrollo.	Se basa en los pilares y palancas para el autodiagnostico propuestos por el ministerio (HADA).
Niveles de madurez	Principiante digital, Integrador vertical, colaborador horizontal, campeón digital.	Computerización, conectividad, visibilidad, transparencia, capacidad predictiva, adaptabilidad.	Niveles de madurez del 1 al 5.
Dimensiones	Digitalización de producto y servicio ofertado, modelos de negocio digitales y accesibilidad al cliente, análisis de datos, digitalización e integración de las cadenas de valor, arquitectura la tecnología de la información, conformidad, seguridad y normativa, organización, empleados y cultura.	Recursos, sistemas de información, estructura organizativa, cultura de empresa.	Estrategia de negocio, procesos, organización y personas, infraestructuras, productos y servicios.

Figura 4. Comparativa de los diferentes modelos de madurez.

El modelo propuesto por Acatech<sup>2</sup> resulta interesante por la diferenciación que hace entre la digitalización y la industria 4.0. Una dicotomía entre digitalización, las 2 fases más tempranas e industria 4.0 que comprende las 4 últimas etapas. El objetivo general de este índice es proporcionar un medio para establecer el estado o etapa actual de madurez de Industria 4.0, así como de identificar las medidas concretas para ayudar a alcanzar un estado superior de madurez y así maximizar los beneficios económicos que brindan la Industria 4.0 y digitalización. La evaluación de los procesos actuales y la posterior identificación de áreas de acción es para proporcionar a las empresas una orientación específica y práctica para dar forma a su transformación digital.

El enfoque metodológico de este modelo se basó en una combinación de talleres y **estudios de casos** (figura 5). Los estudios de casos investigan un fenómeno contemporáneo dentro de su contexto en la vida real y se utilizan cuando los límites entre el fenómeno y el contexto no son claramente evidentes. Según Acatech esta fue metodología elegida para este índice porque, desde una perspectiva académica, el campo de Industria 4.0 es un fenómeno reciente que carece de límites claros y que aún no está suficientemente estandarizado y extendido.



Figura 5. Proceso para el Estudio de caso.

Los 6 niveles de madurez propuestos por este modelo pueden verse en la figura 4 y se describen de la siguiente manera:

<sup>2</sup>[http://www.acatech.de/fileadmin/user\\_upload/Baumstruktur\\_nach\\_Website/Acatech/root/de/Publikationen/Projektberichte/acatech\\_STUDIE\\_Maturity\\_Index\\_eng\\_WEB.pdf](http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Publikationen/Projektberichte/acatech_STUDIE_Maturity_Index_eng_WEB.pdf)

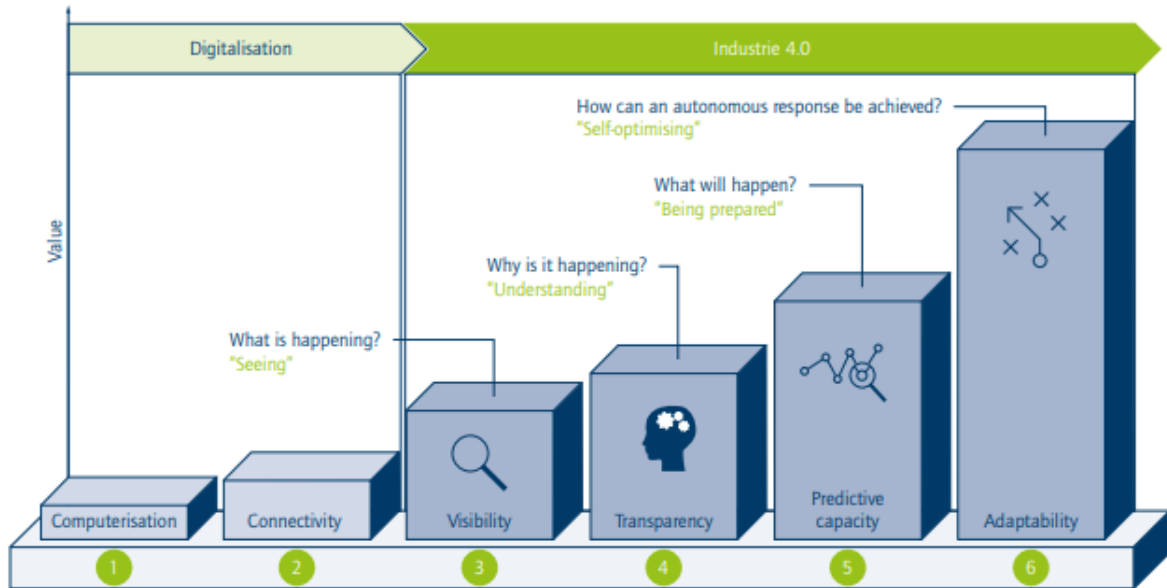


Figura 6. Etapas de desarrollo para la industria 4.0. Fuente: Acatech.

- **Computarización:** La primera etapa en la ruta de desarrollo es la informatización, ya que esto proporciona la base para la digitalización. En esta etapa, las diferentes tecnologías de la información se utilizan de forma aislada una de otra dentro de la empresa. La informatización ya está muy avanzada en la mayoría de las empresas y se utiliza principalmente para realizar tareas repetitivas de manera más eficiente. La informatización brinda importantes beneficios por ejemplo permitiendo una fabricación más barata a con mayores estándares de calidad y con un grado de precisión sin el cual sería imposible hacer muchos productos modernos. Sin embargo, todavía es posible encontrar muchas máquinas sin un sistema de interfaz digital. Esto es especialmente cierto en maquinaria con ciclos largos o máquinas que se usan de forma completamente manual. En estos casos, a menudo se utilizan terminales (CPS) para proporcionar la conexión que falta entre aplicaciones de negocios y máquinas.
- **Conectividad:** En la etapa de conectividad, los focos aislados de información son reemplazados por componentes conectados. Las aplicaciones comerciales usadas pasan a estar conectadas entre sí y reflejar los procesos de negocio centrales de la compañía. Partes de los sistemas OT brindan conectividad e interoperabilidad, pero no hay integración completa con entre las capas IT y OT.
- **Visibilidad:** En esta etapa los sensores ya permiten capturar procesos de principio a fin con grandes cantidades de puntos de recogida de datos. La caída de los precios de los sensores, microchip y la tecnología de red significan que los eventos y los estados ahora pueden ser registrados en tiempo real en toda la compañía. Esto hace posible mantener un modelo digital actualizado de la fábrica en todo momento.
- **Transparencia:** La etapa anterior implicaba crear una copia digital de la situación actual de la empresa. La siguiente etapa es para que la compañía pueda entender por qué algo está pasando y usar este entendimiento para extraer conocimiento por medio de análisis de la causa. Para identificar e interpretar las interacciones en el mundo digital, los datos capturados deben analizarse aplicando análisis de datos.
- **Capacidad predictiva:** En esta etapa, la compañía es capaz de simular diferentes escenarios futuros e identifica los más probables. Esto implica proyectar la copia digital hacia el futuro con el fin de representar una variedad de escenarios que luego se puedan evaluar en términos de la

probabilidad de que se produzca. Como resultado, las empresas pueden anticipar futuro desarrollos para que se puedan tomar decisiones e implementar las medidas apropiadas a tiempo. Mientras que las contramedidas aún deben llevarse a cabo manualmente, los plazos de entrega más largos ayudan a limitar los impactos negativos. Reducir la cantidad de eventos inesperados causados, por ejemplo, por interrupciones permite variación de planificación permite más operación robusta del negocio. Lo hace posible, por ejemplo, para marcar problemas de logística recurrentes, como la falla del operador incluso antes de que ocurran para que puedan prevenirse, en esta instancia cambiando los transportistas.

- **Adaptabilidad:** El grado de adaptabilidad depende de la complejidad de las decisiones y la relación coste-beneficio. Para la mayoría de los casos, lo mejor es automatizar procesos individuales. En consecuencia, resulta fundamental analizar la viabilidad de realizar operaciones replicables de forma autónoma. Pero también, es importante evaluar cuidadosamente los riesgos de automatizar aprobaciones y reconocimientos para clientes y proveedores. Los ejemplos incluyen cambiar la secuenciación de las órdenes planificadas en base a la información que prevea fallos esperados de la máquina o evitar retrasos en las entregas.

Las dimensiones evaluadas en base a los niveles presentados son las siguientes:

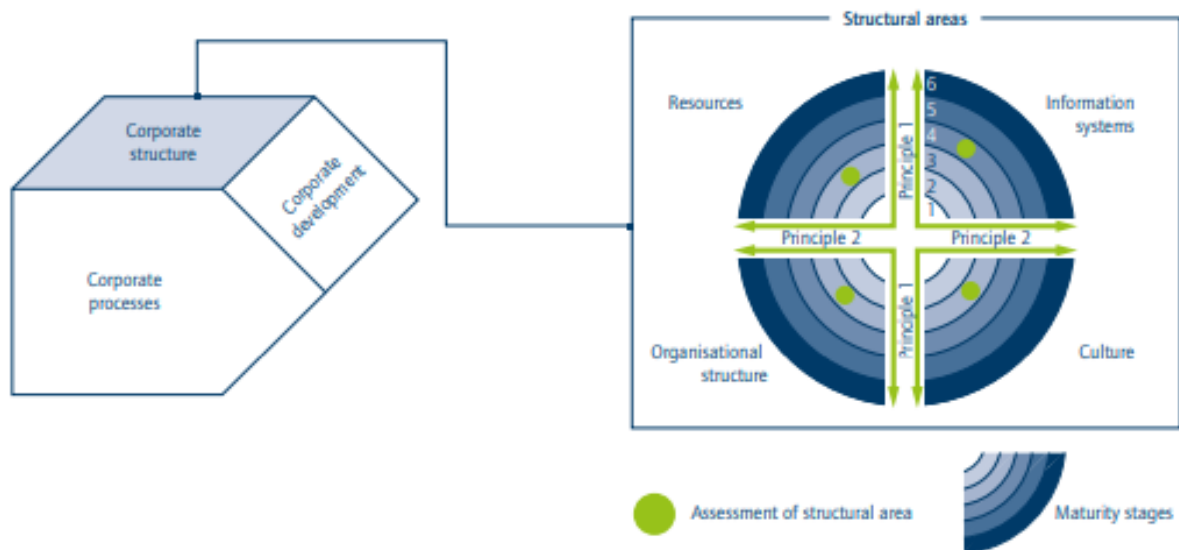


Figura 7. Áreas estructurales - índice de madurez. Fuente: Acatech.

**Recursos:** Esta área va referida a elementos tangibles y componentes físicos, incluyendo el capital humano, esto se representa en los 2 ejes de análisis siguientes:

- **Capacidades digitales:** Las competencias digitales del personal, la capacidad para la adquisición de datos a través de sensores y actuadores.
- **Comunicación estructurada:** En base a la eficiencia de la comunicación como trazabilidad de la misma, carencia de redundancias y que sea capaz de llegar a las partes que puedan competir.

**Sistemas de información:** Esta área va referida a sistemas sociotécnicos, esto se representa en los 2 ejes de análisis siguientes:

- **Integración:** En base al “data governance”, los estándares de representación de los datos, la integración horizontal y vertical y la seguridad de los sistemas IT.

- **Tratamiento de la información:** En base al análisis de datos, contextualización de los datos,

**Estructura organizativa:** Esta área va referida tanto a la estructura operacional de los procesos como a su posición en la red de valorización, esto se representa en los 2 ejes de análisis siguientes:

- **Organización interna:** En base a la flexibilidad de las comunicaciones, gestión de los derechos de decisión, sistema de metas motivacional y la gestión ágil.
- **Colaboración en redes de valor:** En base al foco en los beneficios al cliente y la cooperación en la red de trabajo.

**Cultura de empresa:** Esta área recoge los aspectos de la cultura de la empresa y los desglosa en los 2 ejes siguientes:

- **Voluntad de cambio:** Reconocer el valor de los errores, predisposición a la innovación, aprendizaje basado en datos y toma de decisiones, desarrollo profesional continuo y transformación.
- **Colaboración social:** Estilo democrático de liderazgo, comunicación abierta y confianza en los procesos y sistemas de información.

Por otro lado, el modelo propuesto por PwC<sup>3</sup> para identificar su estado actual en base a sus competencias. Ha diseñado una herramienta web para permitir a las empresas una autoevaluación en lo que refiere al nuevo paradigma de la industria 4.0. Para ello, mide la posición actual de la compañía frente al nivel de madurez deseado a lo largo de 6 dimensiones en el modelo de madurez.

La siguiente autoevaluación está diseñada para proporcionar una comprensión de la posición de su compañía con respecto a Industria 4.0 al medir su real frente a su madurez objetivo en 6 dimensiones, identificando así los puntos de actuación más relevantes, así como la clasificación de su nivel de madurez actual. También permite efectuar una comparativa entre los resultados obtenidos de su empresa y la media general del sector en el que se encuentre, aunque las categorías sectoriales son bastante amplias.

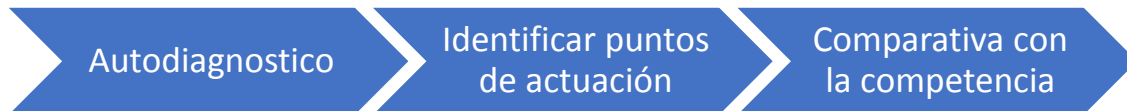


Figura 8. Estructura del modelo de madurez PwC

En resumen, esta herramienta permite identificar necesidades, así como clasificar el nivel de madurez actual de la empresa. Para realizar la herramienta, se creó un modelo de madurez con las dimensiones funcionales más relevantes, así como los estados de madurez en los que una compañía puede estar. En este modelo se establecen 4 niveles de digitalización:

- **I-Principiante digital:** Son aquellas empresas que acaban de empezar la digitalización de su modelo de negocio y de sus operaciones, y cuyo principal foco es que la integración interna se ponga en marcha. Su porfolio ofertado está dominando típicamente por productos físicos y la integración está limitada dentro de las cadenas de valor horizontales y verticales.
- **II-integrador vertical:** Son aquellas empresas que ya han añadido características digitales a sus productos y/o disponen en su porfolio de productos y servicios digitales. Usan los datos para crear valor y ya han conseguido cierta integración de su cadena de valor vertical interna con su sistema de planificación de recursos, desde la planta de producción hasta las máquinas de producción o incluso los productos.

<sup>3</sup> <https://i40-self-assessment.pwc.de/i40/landing/>

- **III-colaborador horizontal:** Son empresas que ya han alcanzado un nivel decente de integración vertical y su foco actual es la colaboración e integración con proveedores, clientes y colaboradores. Además de la integración IT y de procesos horizontal, forman redes cooperativas flexibles con sus colaboradores para satisfacer las necesidades del cliente.
- **IV-campeón digital.** Son empresas que ya han alcanzado un nivel considerable de integración vertical y horizontal. Su foco actual es por tanto el desarrollo de nuevos y disruptivos modelos de negocio, con frecuencia basados en datos, así como un porfolio de productos y servicios innovadores para satisfacer las necesidades de los clientes individualmente. Además, la colaboración es uno de sus motores clave para generar valor.

Las 6 dimensiones consideradas en este modelo ampliado de PwC son las siguientes

- **Modelos de negocio, porfolio de productos y servicios** ¿Cómo se combinan los productos físicos y los servicios en el porfolio de la compañía? ¿Qué características digitales o servicios se ofrecen? ¿hasta qué punto está la ingeniería digitalizada?
- **Acceso al mercado y al cliente:** ¿Qué canales se usan para interactuar con el cliente? ¿qué datos se están midiendo actualmente para estudiar a los clientes? ¿cómo se monitorizan las interacciones con el cliente?
- **Cadenas de valor y procesos:** ¿A qué nivel están integradas la ingeniería y la fabricación internamente? ¿cómo se gestiona la cadena de suministro? ¿cómo se planifican las capacidades productivas?
- **Arquitectura la tecnología de la información:** ¿Cómo son los procesos soportados por las tecnologías digitales? ¿cuáles son las capacidades técnicas? ¿cómo la infraestructura TI soporta los servicios digitales?
- **Conformidad, seguridad y normativa:** ¿Cómo se evalúan e implementan técnicamente los aspectos de cumplimiento? ¿Cómo se identifican los riesgos legales? ¿se implementan las oportunidades de financiación? ¿cómo se asegura la seguridad cibernética?
- **Organización, empleados y cultura:** ¿Qué capacidad de cambio tiene la organización? ¿Qué capacidades de industria 4.0 / operaciones digitales están disponibles en la compañía?

Las siguientes figuras muestran los resultados del autodiagnóstico de una empresa ficticia a modo de ejemplo. El nivel obtenido es el integrador vertical:

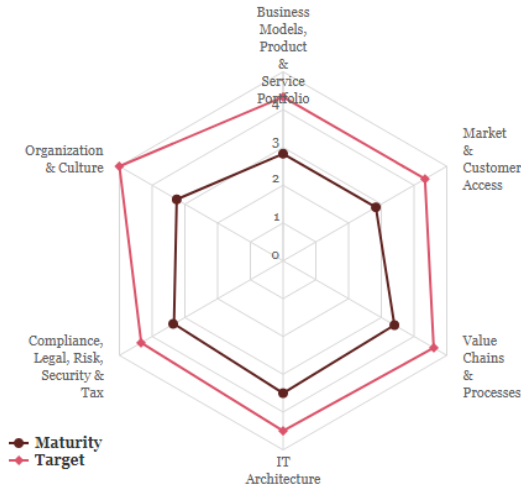


Figura 9. Ejemplo de la autoevaluación- diagrama radar. Fuente: PwC.

### Your Position In The Maturity Model

The **Vertical Integrator** already added digital features to his products and/or digital products and services to his portfolio. He uses data to create value and already achieved some integration of his internal vertical value chain from the enterprise resource planning over the shop floor to the manufacturing machines or even products.

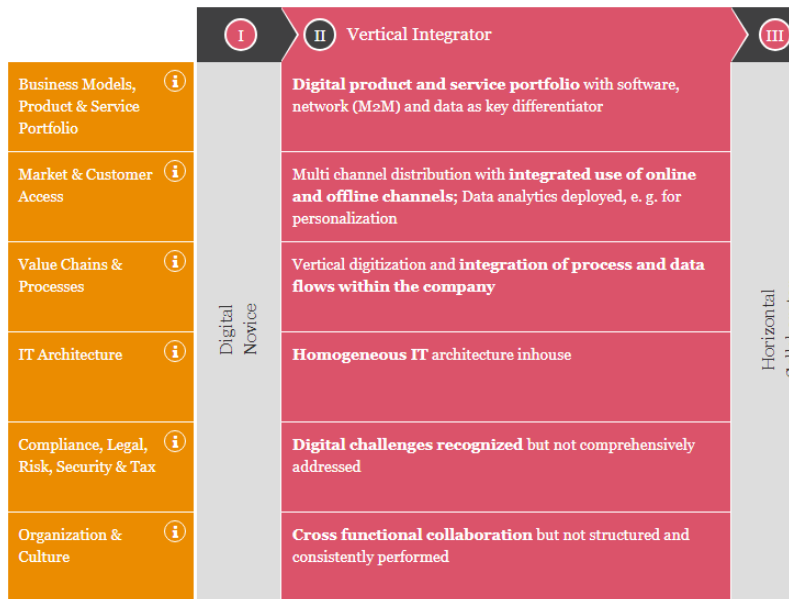


Figura 10. Ejemplo de la autoevaluación- Nivel de madurez. Fuente: PwC.



	<b>Principiante Digital</b>	<b>Integrador vertical</b>	<b>Colaborador vertical</b>	<b>Campeón digital</b>
<b>Modelos de negocio digitales y accesibilidad a clientes</b>	Primeras soluciones digitales con aplicaciones puntuales.	Producto digital y cartera de servicios con software, red de trabajo M2M y recogida de datos como diferenciador clave.	Soluciones digitales con el cliente integradas a lo largo de toda la cadena de suministro y colaboración con socios externos.	Desarrollo de nuevos modelos de negocio disruptivos con productos y cartera de servicios innovadores, tamaños de lote unitarios.
<b>Digitalización del producto y servicio ofrecidos</b>	Presencia en plataformas online desvinculada de los canales offline, orientado al producto en lugar de al cliente.	Distribución multicanal con integración de los canales online y offline. Instaurado análisis de datos (P.ej para la personalización)	Tratamiento individualizado al cliente e interacción conjunta en la cadena de valor.	Experiencia del cliente totalmente integrada, gestión a través de todos los medios digitales canales de comercialización y ventas con CRM
<b>Digitalización e integración de las cadenas de valor horizontales y verticales</b>	Subprocesos digitalizados y automatizados. Integración parcial incluyendo producción. Integración parcial con proveedores externos.	Digitalización vertical y procesos internos estandarizados. Flujos de información internos. Integración limitada con proveedores externos.	Integración horizontal de los procesos. Flujos de datos con clientes y proveedores con uso intensivo a través de toda la red de trabajo.	Ecosistema de interacciones totalmente digitalizado con procesos virtualmente auto-optimizados, enfocados en la competitividad, descentralización y autonomía. Acceso a la información operativa en tiempo real (o cercano a RT).
<b>Análisis de datos</b>	Capacidad de análisis principalmente realizada de forma manual. Selección limitada de datos a monitorear y procesar, sin gestión de eventos.	Capacidad de análisis apoyada por el sistema central de inteligencia de negocio. Sistema aislado y sin estándares en los sistemas de apoyo en toma de decisiones.	Sistema de inteligencia de negocio centralizado consolidando las fuentes de información internas y externas más relevantes, presencia de análisis predictivos. Sistemas de apoyo en toma de decisiones y gestores de eventos específicos.	Uso centralizado de análisis predictivo para la optimización en tiempo real y gestión de eventos automatizada con una base de datos inteligente con algoritmos de autotrendizaje que habilitan el análisis de impacto y apoyo en decisiones.
<b>Arquitectura de la tecnología de la información.</b>	Arquitectura de la tecnología de la información fragmentada.	Arquitectura de la tecnología de la información homogénea. Relación entre diferentes matrices de datos.	Arquitectura IT común a toda la red de asociados. Repositorio de datos unificado e interconectado con arquitectura de alto rendimiento.	Repositorio de datos unificado con integración de funcionalidades externas de datos. Comunicación bus entre asociados e intercambio de datos seguro.
<b>Conformidad, seguridad y normativa.</b>	Estructuras tradicionales no centradas en la digitalización.	Con desafíos digitales en marcha pero no dirigidos de forma exhaustiva. (legal)	Riesgos legales encauzados de manera segura con colaboración entre asociados.	Optimizada la red de la cadena de valor para el cumplimiento, seguridad, legal e impuestos.
<b>Organización, empleados y cultura digital</b>	Enfoque funcional por departamentos.	Colaboración multifuncional pero sin estructurar y ni llevada a cabo de forma consistente	Colaboración en toda la empresa, fomento de la cultura de compartir.	Colaboración como indicador clave de valor.

Figura 11. Modelo de madurez. - PwC.

Una vez evaluado el nivel de madurez de la empresa, resulta conveniente definir los **diferentes estándares de implementación** y marcos tecnológicos existentes. Actualmente existen varios estándares para ayudar a la implantación de las tecnologías 4.0, los mercados más fuertes impulsan los suyos propios, desde 2014 encontramos por ejemplo la IIRA<sup>4</sup> en estados unidos proveniente del IIC, consorcio del internet industrial, formado por grandes compañías tecnológicas, IBM, Intel y Cisco entre otras. Es importante destacar que este modelo es más transversal que el modelo Industria 4.0 alemán. Mientras el IIRA entra en ámbitos de salud, dominio público, energía y transporte, el I4.0 está enfocado exclusivamente a la industria.

Desde el mercado asiático, en 2015 en Japón se lanzaron dos iniciativas relacionadas con la Industria 4.0 alemana: *la IVI* y *la Robot Revolution Initiative*. La primera está liderada por empresas como Mitsubishi, Fujitsu, Nissan o Panasonic al estilo del IIC americano, pero está limitada al ámbito puramente japonés, adoptando los fundamentos teóricos de la I4.0 y haciendo énfasis en la industria conectada. La segunda iniciativa es de carácter gubernamental y está orientada a respaldar la competitividad de la robótica japonesa. Y desde china llega MIC2025 que también se nutre del modelo alemán.

Finalmente, en lo referente al ámbito europeo, el organismo de normalización DIN<sup>5</sup> y DKE Comisión Alemana para la Eléctrica, Electrónica y Tecnologías de la Información publicaron en 2013 la Hoja de Ruta de Normalización de la Industria 4.0<sup>6</sup>, una visión general de las normas y estándares existentes, se basan en las recomendaciones de los requisitos de normalización.

La Hoja de Ruta de Normalización de la Industria 4.0 es un documento vivo que está en constante evolución de los acontecimientos actuales. Muchas de las recomendaciones de la primera versión ya se han implantado, como el modelo de arquitectura de referencia **RAMI 4.0**. Publicado ya como una norma DIN SPEC 91345 a principios de 2016, tanto en alemán como en inglés, finalmente en marzo de 2017 se publicó como estándar IEC<sup>7</sup> en la norma IEC / PAS<sup>8</sup> 63088.

## RAMI 4.0

A pesar de que la industria 4.0 comprende la integración de un amplio abanico de tecnologías la espina dorsal de la industria 4.0 es la conectividad, por lo que resulta de especial interés definir en este informe RAMI 4.0, que es el acrónimo de **modelo de referencia arquitectónico para la industria 4.0**, es un mapa tridimensional que muestra cómo abordar la implementación de las nuevas tecnologías Industriales de manera estructurada y asegura la armonía de las partes involucradas. Como se ha comentado anteriormente deriva de la iniciativa del gobierno Alemán y de la misma forma que el resto de estándares y normas dentro de Plattform Industrie 4.0 su objetivo es preparar **recomendaciones** sobre el futuro desarrollo y estandarización de soluciones para una comunicación basada en la red como parte de la industria 4.0, así como la motivación de una estrecha relación necesaria entre los requisitos de comunicación para la producción flexible y automatizada y la búsqueda de un uso eficiente de las redes de información a partir de métodos unificados de digitalización.

Para entender un poco la trascendencia de los modelos de referencia, un ejemplo de modelo de referencia es el modelo OSI, que se propuso en los 80 para estandarizar las comunicaciones IT. Un modelo de referencia es un modelo que proporciona una descripción definitiva de un aspecto que juega un papel importante dentro a los sistemas que pertenecen a un área particular de aplicación. Los modelos de referencia tienen en cuenta las condiciones organizativas y tecnológicas del sistema que se modelará desde una perspectiva específica. Esto no significa que no haya alternativas al modelo, pero en la opinión de expertos describe un marco abstracto u ontología específica de una manera precisa. Sin embargo, diferentes grupos de expertos pueden, llegar a diferentes modelos de referencia. Esto no es intencional,

---

<sup>4</sup> Industrial Internet Reference Architecture, Arquitectura de referencia para el internet industrial.

<sup>5</sup> Instituto alemán de normalización.

<sup>6</sup> <http://www.din.de/blob/65354/f5252239daa596d8c4d1f24b40e4486d/roadmap-i4-0-e-data.pdf>

<sup>7</sup> Comisión internacional electrotécnica.

<sup>8</sup> Especificación de dominio público, su objetivo es acelerar la estandarización.

pero en algunos casos es inevitable. Los modelos de referencia son metamodelos y forman la base de una comprensión compartida en círculos especializados. Además, describen la estructura de los modelos en el caso de uso y la forma el punto de partida para las herramientas que se basan en ellos.

El objetivo principal de un modelo de referencia es proporcionar una descripción clara e inequívoca de un marco abstracto u ontología específica por medio de un modelo. Un modelo de referencia que cumpla estos criterios es uno que sea adecuado para la estandarización. En base al punto de vista o el fondo u otras razones relacionadas con la tecnología o misma la política corporativa, pueden surgir múltiples modelos de referencia competitivos para un mismo marco, y a su vez esto conducir a soluciones diferentes. En esta indeseable situación, puede ser mejor aprobar múltiples estándares paralelos dentro de un marco consensuado que alenté a la creación de estándares basados en consorcios. En tales casos, es vale la pena esforzarse por lograr al menos un modelo de referencia que cubra un dominio completo.

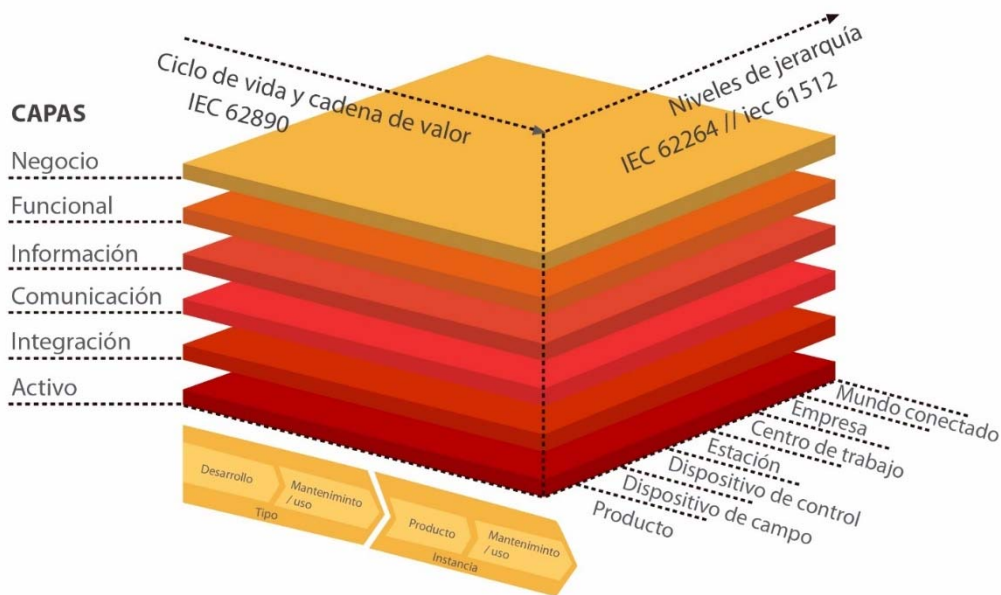


Figura 12. Estructura RAMI 4.0

El mapa tridimensional del modelo RAMI 4.0 se compone de 3 ejes: el **eje vertical** es en el que se disponen las distintas capas, representa la **arquitectura** de la industria 4.0, de la misma forma que en la construcción de un edificio es necesario finalizar una planta previamente a construir la inmediatamente superior, en la implantación de las tecnologías 4.0 ocurre de forma análoga, donde las capas simbolizan cada una de las plantas del edificio a construir. Las distintas capas son activos, integración, comunicación, información, funcional y negocio. La capa base son los activos, es necesario disponer de unos activos, sensores, actuadores, partes mecánicas y por supuesto personal, capaces de actualizarse a la industria 4.0. Le sigue la integración que conlleva la digitalización de los procesos físicos y variables analógicas, conversores analógico-digitales y sistemas HMI<sup>9</sup> que suponen la puerta entre el mundo físico y digital. La siguiente capa es la comunicación lo representativo de esta capa es el flujo de datos y la celeridad de disposición de estos. Inmediatamente después encontramos la capa de la información trata sobre el filtrado de datos y la representación útil de estos. La capa siguiente es la funcional relativa a las funcionalidades y acciones a tomar en los activos en base a la información proporcionada y por último la capa de negocio consistente en el mapeo del modelo de negocio, los procesos de negocio que se pueden ajustar con base en los insumos de la capa funcional y las condiciones del marco legal vigente.

<sup>9</sup> Human-machine interface.

Uno de los ejes horizontales es el de la jerarquía de niveles, es representación de la figura de la estructura industrial en un eje, que comprende desde la unidad más indivisible de la compañía, su producto, hasta el mundo conectado al que pertenece. Supone una expansión en vertical los estándares IEC 62264-1:2013 e ISA-95, que consideraban la siguiente jerarquía: nivel 1 con dispositivos de entrada salida, sensores, actuadores y la red de trabajo, nivel 2 con los PLC, SCADA y HMI, nivel 3 con los sistemas MES y MOM, nivel 4 con el sistema ERP. Juega un papel importante a la hora de gestionar como será distribuida la información obtenida.

**ISA 95 Informatiemodel**

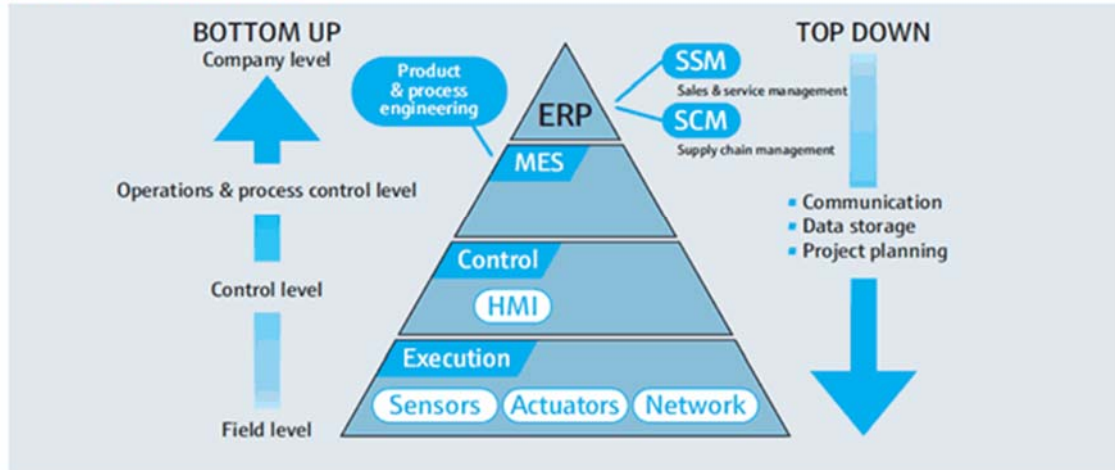


Figura 13 Resumen ISA -95 Fuente: HMS.

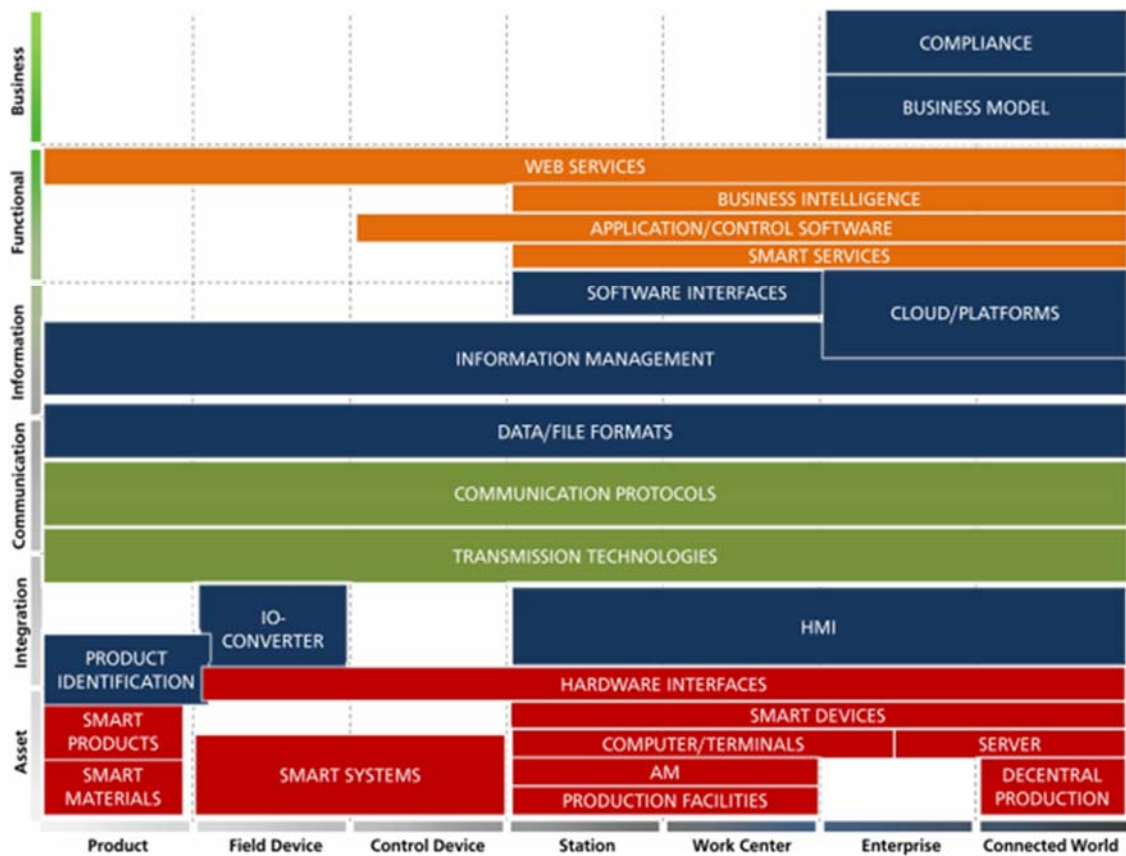


Figura 14. Topología, plano del eje vertical y jerarquía de niveles. Fuente: WCES.

El último eje por comentar es el **de ciclo de vida y cadena de valor**, representa el avance del producto desde su conceptualización como prototipo, así como por la cadena de producción desde su entrada como materia prima hasta que el fin de su vida útil, siendo también considerados los activos que intervienen en el proceso. Cada uno de los anteriores organizados en 2 categorías, la del proceso en sí mismo y la de mantenimiento. Aquí es primordial explicar que en RAMI 4.0 cada componente dentro de la industria se desglosa como la suma de dos cosas, la primera, el núcleo, es el activo en sí mismo, la parte física de este y la segunda la carcasa digital que lo envuelve, la **administration shell (AS)** que como mínimo contiene todos los datos del ciclo de vida de un componente. Un activo físico puede ir desde una válvula, una máquina, una célula robotizada hasta una fábrica entera, y en el límite, una organización en su totalidad.

La administration shell surge para dar respuesta a las necesidades de una economía basada en datos sin barreras donde potencial para la creación de valor solo puede ser debidamente explotado, si todos los aspectos de producción industrial se tienen en cuenta. El modelo no comprende tecnologías concretas desde el punto de vista metodológico, pero prevé una fase denominada 'Technology Mapping' en la que el diseño basado en la arquitectura se mapea a tecnologías específicas. Asimismo, permite que los componentes se pueden combinar dando lugar a estructuras anidadas. Y permitir así la fabricación inteligente (Smart manufacturing) que se puede entender principalmente como la interacción/comunicación entre los siguientes cuatro aspectos:

- Integración horizontal a través de redes de valor.
- Integración vertical, e. gramo. dentro de una fábrica o planta de producción.
- Gestión del ciclo de vida, de extremo a extremo.
- Capital humano.

La administración shell proporciona un marco flexible en la información y funciones que se pueden definir y disponible para facilitar y promover la fabricación inteligente en los aspectos anteriores.

RAMI 4.0 establece que la AS debe tener una estructura dividida entre cabecera (identificación) y cuerpo (gestor de componentes), e identifica ámbitos funcionales de los servicios ofrecidos por las API's de la administration shell.

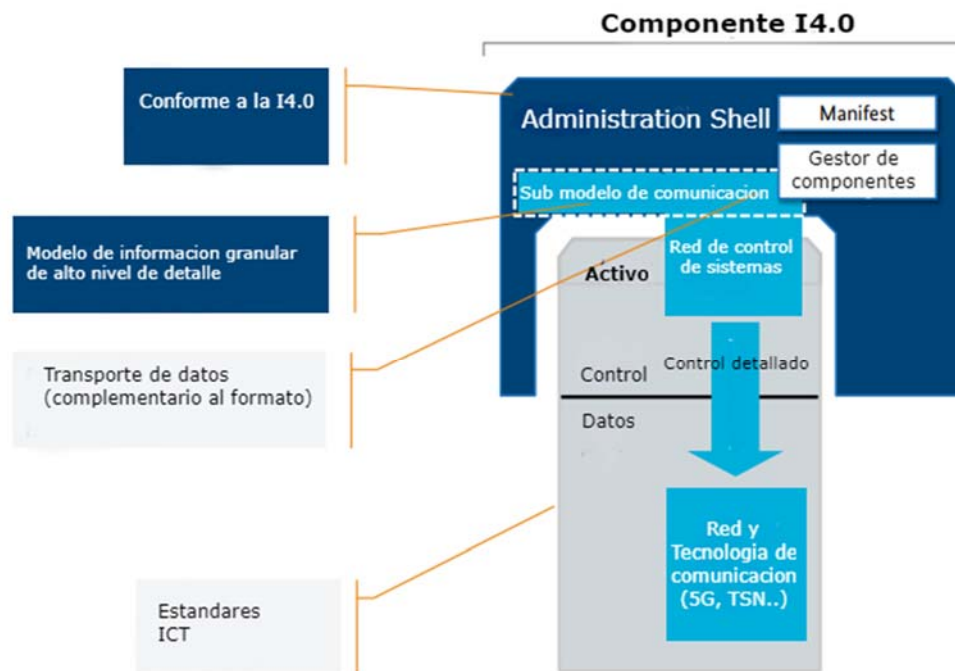


Figura 15. Modelo conceptual - Administration Shell. Fuente: Plattform Industrie 4.0.

Actualmente, los datos e información de los componentes de máquinas y sistemas a menudo están incompletos, desactualizados y en formato analógico. Para procesos de mantenimiento y servicio predictivos se requieren de datos que estén completos, actualizados y electrónicamente legibles. Conforme a la DIN Spec 91345 el contenido de las “administration shells” está caracterizado por submodelos como se muestra en la Figura 15, donde uno de ellos será el submodelo de comunicación de Industria 4.0.

Este submodelo contiene la información esencial sobre la comunicación conforme a la Industria 4.0, ilustrado en la Figura 16. El plano de datos eventualmente proporciona los servicios de comunicación transporte de datos de Industria 4.0, mientras que el plano de control representa los servicios de administración representados bajo un modelo de información granular como una división del submodelo de comunicación.

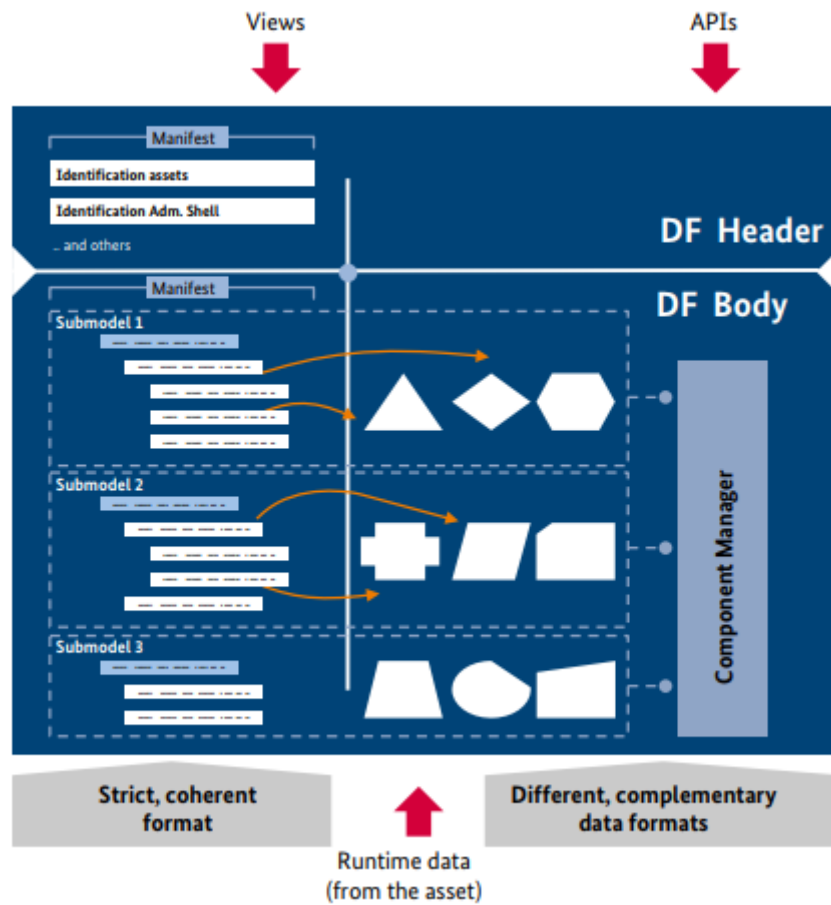


Figura 16. Visionado de la información. Fuente: Plattform industrie 4.0

La “administration Shell” de cada uno de los dispositivos se integra en un repositorio de información del que se dispone a lo largo de todo el ciclo de vida y cadena de valor del producto, es en este repositorio donde se organizan las distintas formas de visionado cada una de las propiedades de la información recolectada en función del ámbito de aplicación y la jerarquía de niveles ya comentada previamente.

Para comprender correctamente el concepto definiremos un ejemplo aplicado a un producto, en este caso un ventilador de mesa inteligente capaz de comunicarse con otros objetos y equipado con sensores.

**En el encabezado** de la AS, irían el número de identificación del activo y la de su AS, que identifican de manera única y unificada, esto es necesario pues hay millones de dispositivos con capacidad IoT y así se facilitarían los datos concretos a cualquier persona que lo necesite la información específica del mismo.

En el cuerpo encontraríamos los diferentes submodelos de comunicación para el ventilador, en este ejemplo concreto se contemplan 2 submodelos: monitoreo de condiciones y mantenimiento del mismo, entiéndase que esto variaría en función del tipo de componente.

- **Monitoreo de condiciones:** Supongamos que el fabricante está interesado en monitorear la condición de su ventilador para ajustar su programa de mantenimiento. Para eso, puede guardar información sobre la supervisión de la temperatura del motor, las rpm del motor, el número de horas de funcionamiento, etc., como una función en este submodelo. Esta supervisión se realiza, por supuesto, a través de sensores incorporados que generan datos para la supervisión.
- **Mantenimiento del ventilador:** Este submodelo contiene toda la información relevante para el mantenimiento como una función proporcionada por el fabricante. Esto es solo para facilitar el servicio al eliminar la necesidad de pasar por largos manuales de servicio y mantenimiento. Este submodelo contiene funciones como el desmontaje del motor, reparación de cuchillas y conmutadores, prueba general, etc.

Ahora la información puede ser accesible a quien la requiera a través de un código QR/DM o seguir una URL concreta y así acceder a la información completa de los submodelos. Las AS puede tener muchos submodelos según su complejidad o funcionalidad. La ID de referencia de todos los submodelos se almacena en el “Manifest” que luego actúa como un directorio. Estos submodelos se pueden recuperar haciendo referencia al AS de un activo, a través de IoT en función del canal de comunicación.

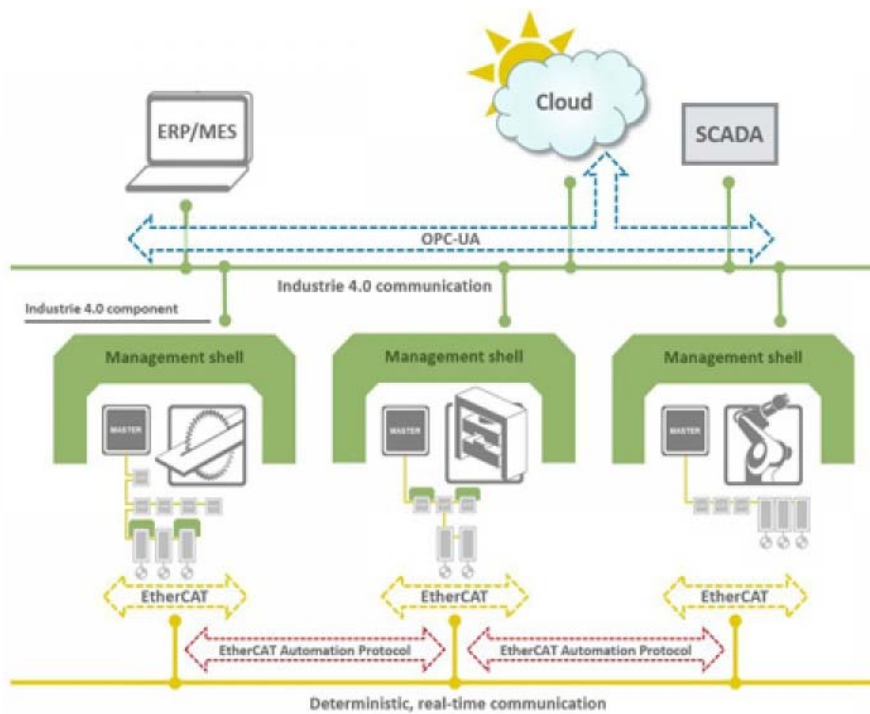


Figura 17. Modelo industrial 4.0. Fuente EtherCAT.

El modelo se comporta de manera análoga al ejemplo presentado para los dispositivos a nivel de planta, con la diferencia de que estos se comunican con un estándar derivado del 802 que permitan unas comunicaciones deterministas y bajos tiempos de respuesta para las aplicaciones de tiempo crítico. Y para el intercambio de datos con los niveles jerárquicos superiores emplea el OPC – UA<sup>10</sup> (Open protocol communication united architecture), la iniciativa **EUROMAP interfaces for Industry 4.0**<sup>11</sup>, recoge estándares para la comunicación entre distintos sistemas, las **inyectoras y extrusoras**. El OPC-UA permite

<sup>10</sup> <https://opcfoundation.org>.

<sup>11</sup> <http://www.euromap.org/en/i40/euromap-interfaces/>

una comunicación segura, escalable, estandarizada, semántica y de acceso libre. Por ejemplo, el Euromap 67 para la comunicación entre la inyectora y dispositivos manipuladores/robots.

No hay que olvidar que RAMI 4.0 nos proporciona únicamente la espina dorsal de la implementación, esto es la relación que es aconsejable seguir para una implementación adecuada y no está orientada a ningún sector de la industria en específico.

Antes de proceder con los experimentales desarrollados es imperativo mencionar brevemente los diferentes estándares contemplados bajo la arquitectura RAMI 4.0.

### Estándares incluidos

La industria manufacturera se enfrenta ahora a un proceso de normalización; que definirá los mecanismos de cooperación por adelantado. Para ello se definirán las denominadas arquitecturas de referencia: modelos idealizados que proporcionan el marco para el desarrollo. A continuación, se presentarán los diferentes estándares incluidos en la hoja de ruta de la industria 4.0, en función de los ámbitos de aplicación de estos:

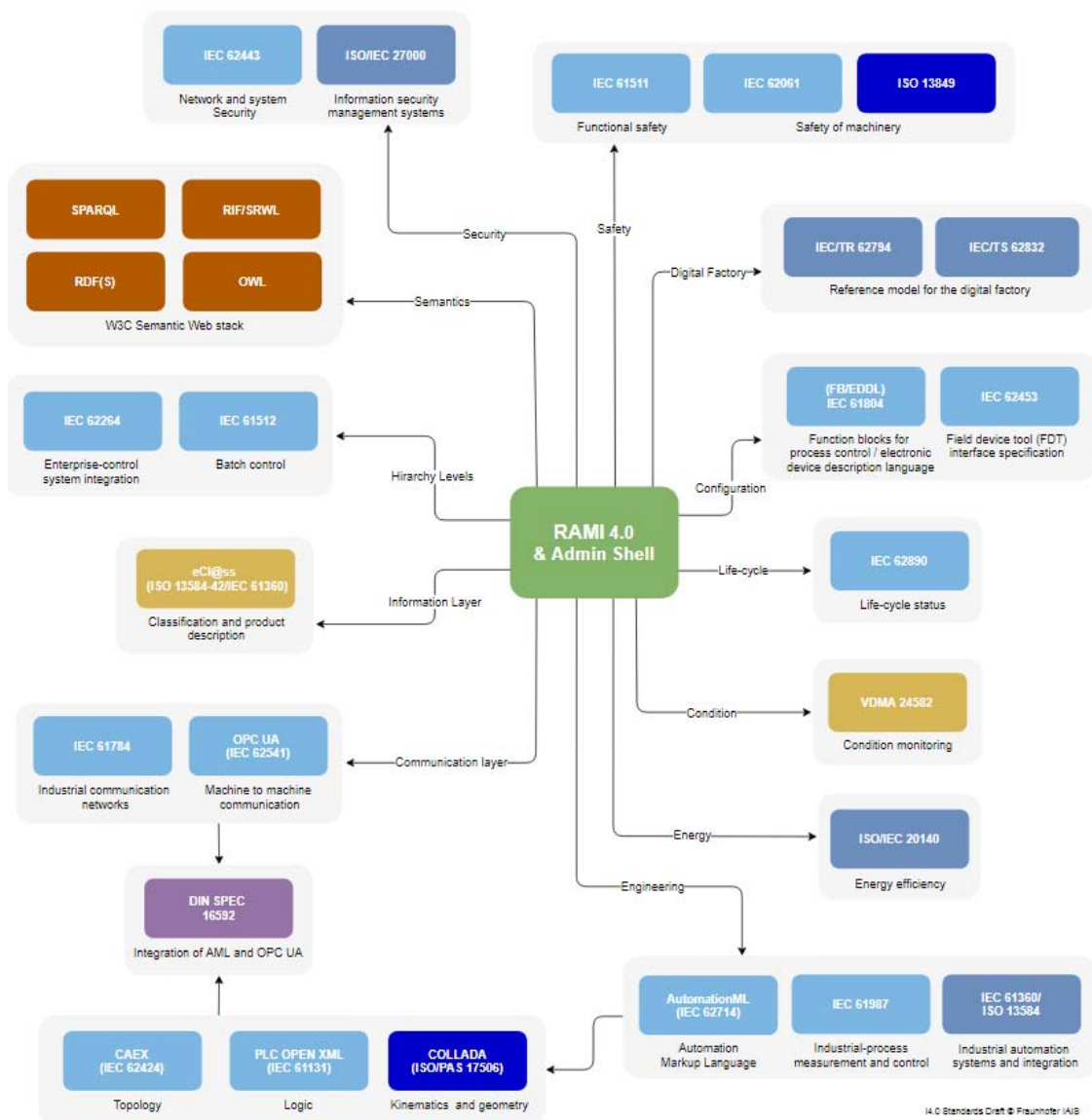


Figura 18. Estándares de industria 4.0. Fuente: I4.0 semantic interoperability.

**Seguridad de la información:** Es el conjunto de medidas preventivas y reactivas de las organizaciones y de los sistemas tecnológicos que permiten resguardar y proteger la información buscando mantener la confidencialidad, la disponibilidad e integridad de datos y de la misma. Se trata de uno de los ámbitos más críticos y por ello debería ser prioritario, en este apartado se presentan 2 estándares recomendados: La serie ISO/IEC 27000 ya comentada previamente que versa sobre la gestión segura de la información y el IEC 62443 sobre la seguridad del sistema industrial y de la red, los organiza en 4 niveles en función del origen de la brecha de seguridad: protección frente a brechas de seguridad casuales, protección frente a brechas intencionadas usando medios simples, protección ante brechas intencionadas usando medios sofisticados y protección ante brechas intencionadas usando medios sofisticados y recursos ampliados (p.ej el ataque StuxNet).

**Seguridad laboral:** Tiene por objeto la aplicación de medidas y el desarrollo de las actividades necesarias para la prevención de riesgos derivados del trabajo. El igual que el anterior debería ser de prioritaria implantación. Hay 3 estándares comprendidos en este apartado: El IEC 61511 sobre sistemas instrumentados de seguridad para el sector de la industria de procesos, el IEC 62061 sobre seguridad funcional de los sistemas de control eléctrico, electrónico y programable y la ISO 13849 que se ocupa de los principios de diseño relacionados con la seguridad de los sistemas de control empleados para establecer diferentes niveles de aplicación de la seguridad.

**Fabrica digital:** Una fábrica digital utiliza la tecnología digital para el modelado, las comunicaciones y para operar el proceso de fabricación. Esta disposición de la tecnología permite a los administradores configurar, modelar, simular, evaluar y evaluar artículos, procedimientos y sistemas antes de que se construya la fábrica. La fábrica digital da respuestas para la configuración, diseño, pantalla y control de un sistema de producción. Este apartado conta de 2 estándares: El IEC/TR 62794 sobre la medición, control y automatización de procesos industriales, así como el modelo de referencia para representación de instalaciones de producción y el IEC/TS 62832 define métodos que permiten la autodescripción de componentes, así como validar o planificar conexiones entre activos.

**Semántica:** Es la estructura semántica del W3C<sup>12</sup> recomendada, con OWL como ontología, SPARQL para el secuenciado, RIF/SRWL como reglas y RDFS para el intercambio de datos.

**Niveles de jerarquía:** En lo que respecta a la jerarquía de niveles se presentan 2 estándares relacionados: El IEC 62264 sobre la integración de sistemas de control empresarial sus modelos y terminología (ERP y MES) y el IEC 61512 sobre el control por lotes sus modelos y terminología.

**La capa Información:** Tratando sobre la clasificación y descripción del producto encontramos los estándares ISO 13584 e IEC 61360, ambos basados en el mismo modelo.

**La capa Comunicación:** Publicados 2 estándares relacionados directamente: el IEC 61784 sobre las redes de comunicación industrial, perfiles y Ethernet preparado para trabajar en tiempo real y el IEC 62541 sobre el OPC UA, que es un protocolo de comunicación industrial M2M<sup>13</sup> para la interoperabilidad desarrollado por la Fundación OPC. Es el sucesor de la plataforma abierta de comunicaciones también conocida como OPC. Enlaza de manera directa con la norma DIN SPEC 16592 para la integración de Automation Markup Language conocido como AML y OPC UA.

**Ingeniería:** Se centra en el ámbito de la automatización, con 3 estándares relacionados de forma directa: El IEC 61360/ISO 13584 ya mencionados en la capa de información, el IEC 61987 sobre la medición y control de procesos industriales, estructuras y elementos de datos en catálogos de equipos de proceso y equipos de medida con salida analógica y digital. Por último, el IEC 62541 que describe el formato de intercambio de datos de ingeniería para uso en ingeniería de sistemas de automatización industrial como el lenguaje de marcado de automatización, arquitectura y requisitos generales. Este último enlaza directamente con otros 3 estándares como son COLLADA, ahora como ISO/PAS 17506 para el intercambio de formato de archivos entre aplicaciones 3D, el IEC 61131 o en su defecto el IEC 61499 sobre los leguajes

---

<sup>12</sup> Consorcio de la world wide web.

<sup>13</sup> Comunicación de máquina a máquina.

de programación de los controladores programables y el IEC 62424 un formato de datos neutro que permite el almacenamiento de la jerarquía de los objetos. Desde este punto se enlaza con La DIN SPEC 16592 que supone el nexo con la capa de comunicación.

**Configuración:** Este apartado se centra en la definición del sistema de control de producción dispone de 2 estándares aplicables: El IEC 61804 sobre bloques funcionales para control de procesos y visión general de los aspectos del sistema y el IEC/TS 62832 sobre las especificaciones de la interfaz de los dispositivos de producción.

**Ciclo de vida:** Acerca de la vida útil de los activos y su rendimiento, un único estándar el IEC 62890 sobre como las estaciones deben describir su estado operativo y parámetros de rendimiento, comúnmente llamados KPI<sup>14</sup>, hacia componentes I4.0 más elevados en la jerarquía de niveles como sistemas MES y MOM.

**Condiciones:** Referido a las condiciones de monitoreo, un único estándar, aun solo presente como normativa alemana el VDMA 24582 sobre arquitectura de referencia neutra de bus de campo para la supervisión de la condición en la automatización de la producción.

**Energía:** Un único estándar en este ámbito, el ISO 20140-5 sobre la evaluación de la eficiencia energética y otros factores de los sistemas de fabricación que influyen en el medio ambiente.

---

<sup>14</sup> Indicador clave del rendimiento.

## Hoja de ruta

El modelo de implantación puede ser desglosado en la siguiente secuencia de las acciones figura 18 de las cuales las 6 primeras se corresponden con la etapa de **planificación** en el ciclo PDCA en nuestra metodología para la transformación a la industria 4.0.

Se parte de un **análisis de las tecnologías aplicables**, en el que se identifique y posteriormente se analice el estado de la técnica actual en las diferentes ramas que componen el marco de industria 4.0. Conocidas las tecnologías aplicables más relevantes para nuestro proceso productivo.

Posteriormente la **definición de la estrategia interna y concienciación**, pues el proceso de cambio abarca todas las actividades dirigidas a ayudar a la organización para que adopte exitosamente nuevas actitudes, nuevas tecnologías y nuevas formas de hacer negocios. Hacer una administración efectiva del cambio permite la transformación de la estrategia, los procesos, la tecnología y las personas para reorientar la organización al logro de sus objetivos, maximizar su desempeño y asegurar el mejoramiento continuo en un ambiente de negocios siempre cambiante. Para ello se recomiendan mantener a los empleados informados acerca de las intenciones de la empresa de cara a la transformación a la industria 4.0. Las posibilidades de mejora que ofrece y la importancia de su implementación.

En la metodología propuesta una vez la empresa ha definido la estrategia interna, debe proceder con el **autodiagnóstico de madurez** para ello recurriremos a uno de los modelos de madurez presentados a continuación, en base al que más se alinee con la estrategia definida en la etapa anterior, en el modelo de madurez. En estos modelos se corresponden con las herramientas de planificación estratégicas análisis interno, análisis externo y análisis DAFO.

De cara a proponer un enfoque con un desarrollo basado en el marco nacional se puede emplear un modelo de elaboración propio, basado en los **pilares y palancas** propuestos por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad.

Los pilares propuestos por la iniciativa de industria conectada, presentes en la herramienta de autodiagnóstico HADA:

- **Estrategia de negocio y mercado:** Compuesto por las siguientes 4 palancas, estrategia y mercado, inversiones, innovación, sostenibilidad.
- **Procesos:** Compuesto por las siguientes 3 palancas, digitalización, integración y automatización.
- **Organización y personas:** Compuesto por las siguientes 3 palancas, modelo de relación y colaboración, habilidades y cualificaciones, formación digital.
- **Infraestructuras:** Compuesto por las siguientes 3 palancas, plataformas colaborativas, soluciones de negocio y control, infraestructuras digitales.
- **Productos y servicios:** Compuesto por las siguientes 3 palancas, recopilación análisis y uso de datos, productos y servicios interconectados, componentes y funcionalidades digitales.

Representándolos a través de los siguientes niveles de madurez:

- **Nivel 1:** Que representa a los extraños, aquellas compañías que no han hecho nada o muy poco en cuanto a planificar o implementar acciones de industria 4.0.
- **Nivel 2:** Que representa a los principiantes.
- **Nivel 3,** Que representa a los iniciados.
- **Nivel 4,** Que representa a los expertos.
- **Nivel 5,** Que representa a los máximos exponentes en ejecución.



Pilares	Palancas	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Nivel 5
Estrategia de negocio y mercado	Estrategia y mercado	Sin crecimiento en digitalización.	Crecimiento lento en digitalización.	Crecimiento digital impulsado por la productividad.	Crecimiento digital alto.	Crecimiento digital exponencial. Objetivos directivos en continuo cambio.
	Inversiones	Sin inversiones en digitalización	Inversiones en digitalización mínimas.	Inversiones en digitalización exclusivamente en los apartados con mejor ROI.	Inversiones en digitalización altas.	Inversiones en digitalización de soluciones pioneras asumiendo riesgos corporativos.
	Innovación	Sin innovación, estrategia continuista, productos fijos.	Productos nuevos de forma eventual. Ingeniería concurrente.	Simulación y experimentación rápidas. Introducción rápida de productos.	Alta flexibilidad de producción. Cocreación con el cliente.	Diseño/desarrollo bajo demanda, NPI diariamente.
	Sostenibilidad	Con o sin políticas enfocadas a la sostenibilidad pero sin registro formato digital.	Medición digital de algunos parámetros de impacto ambiental. (ISO 14001)	Registro completo de todos los parámetros digitalmente, relativos al impacto mediambiental.	Gestión de la seguridad y rendimiento medioambiental a través de un sistema EHS con presencia de integración.	Gestión de la seguridad y rendimiento medioambiental a través de sistema EHS 4.0 totalmente integrado.
Procesos	Digitalización	Registro de algunos datos relevantes de forma totalmente manual.	Registro total de la información relevante, con algunas adquisiciones de datos automatizadas	Registro de toda la información relevante de forma automática e interpretación de datos en su mayoría de forma manual.	Registro absoluto de toda la información (información a priori no relevante) e interpretación automática de resultados, las contramedidas se aplican manualmente (se registran datos de entrenamiento IA).	Registro absoluto de toda la información y cruzado de datos sacando nuevas relaciones entre los factores registrados. El sistema interpreta y decide (supervisado por humanos).
	Integración	Ninguna conexión vía digital	Sistemas etapas productivas "isla" sin conexión entre ellas.	Conexión entre las etapas productivas más relevantes	Integración mayoritaria de todos los sistemas productivos desarrollados.	Nivel de integración digital twin.
	Automatización	Procesos manuales o mecánicos controlados manualmente o con controladores proporcional derivativo integral (PID)	Control mayoritario a través de controladores lógicos programables (PLC).	Procesos controlados con sistemas SCADA	Sistemas de control integrados. La mayoría de procesos automatizados.	Control absoluto del ciclo de vida en su totalidad, desde la adquisición de la materia prima hasta la entrega al cliente.
Organización y personas	Modelo de relación y colaboración	Sin equipo para la transformación digital.	La transformación digital gestionada a través de Test's IT	Transformación digital guiada por un equipo de funciones cruzadas. (sin especialistas)	Transformación digital guiada por un equipo corporativo.	Transformación digital promovida por el CEO.
	Habilidades y cualificaciones	Sin análisis de las capacidades de los empleados.	Análisis limitado de las capacidades digitales de los empleados.	Análisis por menorizado de las capacidades digitales del personal contratado.	Uso e identificación de los KPI relacionados con las habilidades digitales.	Gestión global mediante KPI.
	Formación digital	Sin ninguna formación digital disponible para empleados.	Talleres de concienciación digital, introducción del concepto de industria 4.0	Definición de un plan formativo que cubra las carencias detectadas para la transformación digital.	Ciclos de formación especializados, generación y establecimiento de protocolos de trabajos alineados con la industria 4.0	Formación continua del personal en tecnologías digitales.
Infraestructuras	Plataformas colaborativas	Sin presencia plataformas colaborativas.	Colaboración limitada.	Colaboración extendida exclusivamente bajo B2B	Colaboración entre entidades de diversa índole en formatos P2B, C2B y B2B.	Alta colaboración con terceros extendida a todos los niveles y formatos.
	Soluciones de negocio y control	ERP básico ubicado físicamente en los servidores, sin sistema MOM	ERP con funcionalidades adicionales incorporadas ubicado físicamente en los servidores incorporadas, sistema MOM monolítico. Visualización HMI.	ERP de gestión integral instalado físicamente en los servidores Sistema MOM modular distribuido.	ERP de gestión integral en nube. Plataforma IIoT con funcionalidades MOM	ERP de gestión integral en nube. Sistema MOM 4.0.
	Infraestructuras digitales	Redes de comunicación inexistentes o muy limitadas.	Redes de comunicación ad hoc entre algunos dispositivos.	Redes de comunicación totalmente jerarquizadas para la mayoría de dispositivos dispositivos.	Redes de comunicación jerarquizadas con trabajo a tiempo real entre algunos dispositivos.	Redes de comunicación descentralizadas y deterministas. (Edge-computing)
Productos y servicios	Recopilación análisis y uso de datos	Sin registro de datos del cliente.	Registro de algunos datos del cliente y tratamiento manual.	Registro de datos y metadatos del cliente. Procesado vía sistemas CRM.	Registro de datos y metadatos del cliente. Desarrollo de sistemas inteligentes de demanda predictiva. Mashup de la web.	Registro de datos y metadatos del cliente. Desarrollo de perfiles de clientes potenciales.
	Productos y servicios interconectados	Productos y servicios sin interconexiones.	Registro de algunos datos del uso del producto o servicio y posteriormente.	Identificación del estado del producto.	Estimación tiempo de vida de los productos, condiciones de uso de estos.	Identificación de necesidades del cliente aun desconocidas a través del uso registrado en los productos.
	Componentes y funcionalidades digitales	Sin ningún componente o funcionalidad digital	Identificación de posibles funcionalidades digitales	Implementación parcial de funcionalidades digitales	Alto grado de implementación de las funcionalidades digitales identificadas	Evaluación constante de los potenciales componentes/funcionalidades e implementación total.

Identificado el nivel de madurez de la empresa se procederá con la identificación de aspectos clave para la mejora productiva e identificación de aspectos potenciales de mejora en productos, esta última puede efectuarse por ejemplo por medio de un despliegue de la función de calidad (QFD).

Posteriormente proceder con la **definición los objetivos** iniciales propuestos por la compañía en el proceso de actualización a la industria 4.0. Es importante definir bien esta etapa antes de proseguir con la metodología propuesta, ya que nos ayudara a restringir la búsqueda de soluciones en las etapas posteriores. Lo ideal en esta etapa seria clasificar los objetivos en base al horizonte temporal en el que pueden verse realizados, en este punto bastara con realizar una primera estimación que nos permita catalogar los objetivos entre:

- **Objetivos a corto plazo:** Que comprendan desde los más inmediatos a una duración no mayor de 6 meses, la idea de este tipo de objetivos es que sean fácilmente evaluables, bien por ser binarios o bien por que tengan un carácter muy cuantitativo. Un ejemplo podría ser reducir las mermas en XX%, reducir el número de defectos a X por millón.
- **Objetivos a medio plazo:** Que comprendan en término medio objetivos con duraciones entre 6 meses y 2 años. Pueden tener un carácter más complejo en lo relativo a la evaluación de los mismos. Podría ser la implantación de un sistema MES.
- **Objetivos a largo plazo:** Con duraciones de 3 años o superiores, van más en la línea de una estrategia directiva, los objetivos definidos en esta línea deben necesariamente ser descompuestos en objetivos de categorías inferiores y al igual que en la categoría anterior pueden tener un carácter más complejo de cara a su evaluación.

Finalmente, antes de definir la hoja de ruta es necesario realizar una **matriz de priorización**, donde no solo se recojan los gaps tecnológicos identificados a través del modelo de madurez, sino también se evalúen los distintos retornos de la inversión para cada una de las soluciones de implantación potencial. Este análisis se debe realizar atendiendo a las particularidades de la empresa y puede llevarse a cabo de manera interna si se dispone de personal cualificado o bien puede recurrirse a un agente externo especializado, también es necesario destacar que a nivel nacional existen ayudas para pymes como “asesores digitales”<sup>15</sup> enfocadas ayudar a las empresas a llegar a este punto cognitivo.

En este punto es importante focalizar los esfuerzos en el diseño y definición de un correcto **plan de acción** donde se reflejen las acciones a ejecutar, los plazos previstos, los recursos necesarios para cada acción, los actores implicados y los resultados esperados

Las 2 últimas acciones se corresponden con la **ejecución** de acciones y **evaluación de resultados** definidos en el plan de acción, como ya se ha comentado todas las acciones reflejadas en el Plan de acción y los pasos siguientes, deben atender a las particularidades de cada empresa y de las soluciones potenciales a ser incorporadas, por lo que deben realizarse de forma individualizada para cada caso.

---

<sup>15</sup><http://www.red.es/redes/es/que-hacemos/transformaci%C3%B3n-digital-en-pymes/asesores-digitales>

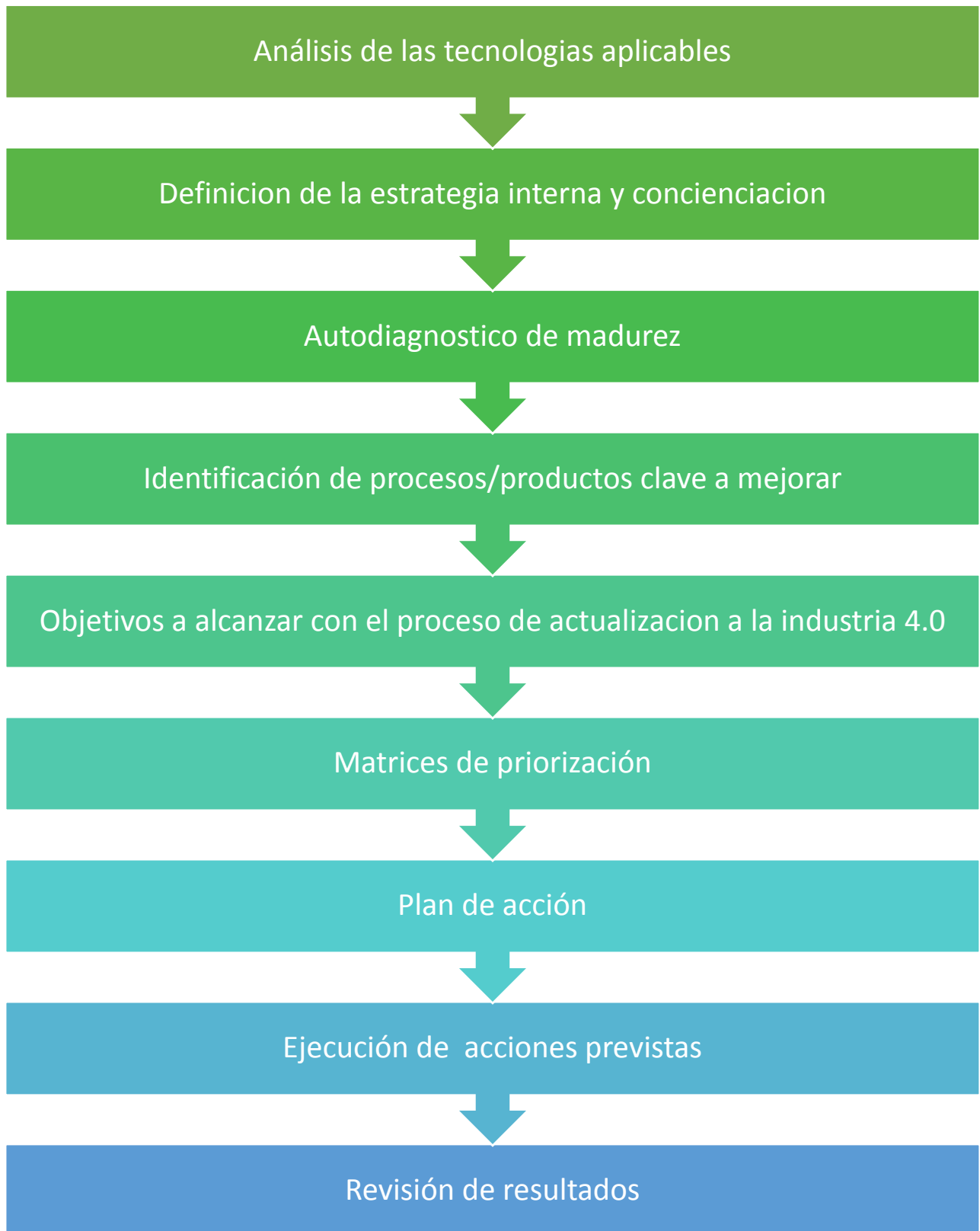


Figura 19. Modelo de Hoja de Ruta.

## Pruebas aplicadas a procesos de transformación

A partir de la prospectiva realizada, se identificaron las áreas de actuación, asociadas a proyectos de transformación específicos del sector del plástico de la Comunitat Valenciana. Se optó por priorizar los procesos de transformación por volumen de negocio en la Comunitat Valenciana. Las pruebas realizadas se focalizaron en los procesos de transformación, inyección, extrusión y compounding.

Todas las tareas de pruebas en planta piloto en el marco de la Industria 4.0 se organizaron bajo la misma estructura procedimental. Donde en primera instancia se realizó una selección de la prueba a desarrollar seguida de una justificación desde el punto de vista técnico y desde el punto de vista de requerimientos del mercado para la prueba a realizar. Una descripción y enumeración características del equipamiento empleado. Definición y descripción de los de los parámetros de control iniciales, así como una justificación de su elección. Posteriormente se procedió de la descripción pormenorizada del experimental a realizar, con la determinación del producto/material óptimo según criterios o sistemática para verificar la calidad de este. Seguido de un registro de las mejoras propuestas para el proceso probado, relativo a incorporación de sensores, monitorización de medidas online, visión artificial, entre otros. Y finalmente una identificación de habilitadores y solicitud de ofertas para la implantación.

Atendiendo modelo de referencia arquitectónico para la industria 4.0, las pruebas realizadas en planta se corresponden con las 2 primeras capas de este, activos e integración, donde se desarrolla toda la adquisición de datos la digitalización de estos y las interfaces de comunicación hombre-máquina. A continuación, se detallan las acciones ejecutadas para cada uno de los procesos, que atiende a la estructura presentada sobre estas líneas:

### Inyección

#### 1. Selección de prueba:

Como ya sabemos tanto el sector de envase como el sector de automoción son de los más importantes en la industria del plástico. Es por ello por lo que hemos decidido realizar las pruebas pertinentes en estos dos campos. Las pruebas se realizan mediante el proceso de inyección convencional, a diferencia de, por motivos de los diferentes moldes utilizados en los experimentales, un experimental se realiza en una máquina inyectora y el otro experimental en otra máquina.

Para las pruebas realizadas en el campo de la automoción se utilizó un material ingenieril muy empleado en el sector, el PC-ABS. Este material se suele usar mucho en los interiores de los coches, sobre todo piezas técnicas en partes de ensamblajes y en aquellas piezas que van a tener algún tipo de acabado como es pintado o cromado.

En cuanto al experimental relacionado con el sector envase, se utilizó un PP con aditivos funcionales. Estos aditivos pueden afectar en el comportamiento del material fundido. Este comportamiento reológico hay que tenerlo en cuenta para poder optimizar el proceso ya que dependiendo del material y sus propiedades se trabajaran en distintos rangos de valores en sus parámetros de inyección afectando directamente a la calidad de la pieza.

#### 2. Motivación.

Como ya hemos dicho con anterioridad y observando cómo se distribuye la industria del plástico en sus diferentes sectores, vemos que tanto automoción como *packaging* son dos de los tres campos donde más se emplea los materiales poliméricos.

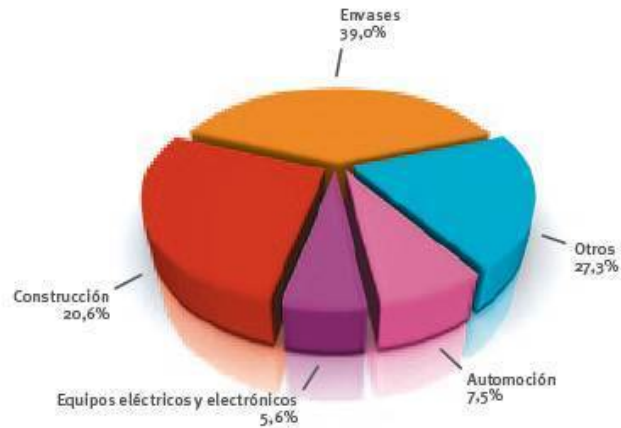


Figura 20 - Sectores en la industria del plástico

Ya sabemos que el material por excelencia utilizado en envases es el plástico, debido a que es un material ligero, aporta las propiedades barrera necesarias para proteger al producto y además tiene unas propiedades mecánicas aceptables para que este material sea el idóneo para este fin. En los envases se emplea un gran abanico de materiales dependiendo de las necesidades que se quieran cubrir, siendo el PE (lineal, de baja y de alta densidad), el PP, el PET y el PS los más utilizados entre otros.

Además, dentro del sector de envase se encuentra el que está destinado a la alimentación, con lo que el polímero base debe estar aditivado para que el alimento pueda conservarse en el interior del envase el máximo tiempo posible sin que se vea afectado sus propiedades organolépticas. Es por ello por lo que realizamos las pruebas pertinentes con un PP que además lleva aditivos funcionales para ser empleado en envases que entran en contacto con alimentos para que éstos se puedan conservar en mejor estado.



Figura 21 - Envases de PP empleados para el sector de la alimentación.

Sin embargo, para los materiales utilizados en el sector de automoción, éstos suelen ser polímeros con propiedades mecánicas más específicas como tenacidad, resistencia al desgaste, resistencia a tracción, además de que algunos de ellos se pueden pintar o cromar (como por ejemplo el ABS). Estos materiales se emplean en asientos, parachoques, volantes, faros, frontales, y una gran variedad de piezas interiores de automóviles.

El PC-ABS es uno de los polímeros ingenieriles más empleado en el sector automoción. Es una mezcla de polímeros (PC y ABS) por la que se obtiene una combinación única que suma la alta procesabilidad del ABS con las excelentes propiedades mecánicas y de resistencia a los impactos y al calor del PC. Este material se usa en componentes estructurales, pilares, guanteras y consolas.



Figura 22 - Micrografía de una mezcla PC+ABS. Podemos observar la heterogeneidad en la mezcla de los dos componentes, cada uno con sus propiedades singulares.

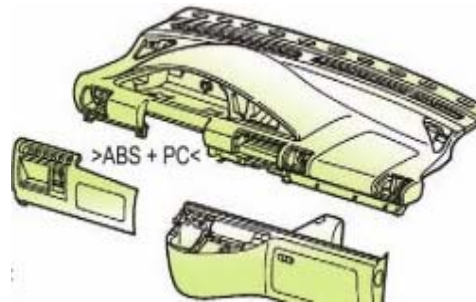


Figura 23 - Piezas de automoción fabricadas en PC+ABS.

### 3. Equipamiento. Descripción y características del equipamiento empleado.

Hemos mencionado que un material se utiliza en una máquina diferente a la del otro material, además los moldes también difieren, ya que para el PP se utiliza una probeta ISO D2 y para el PC-ABS probetas de inflamabilidad de 150x150 mm, probetas para realizar los posteriores ensayos pertinentes relacionados con las propiedades que se desean analizar. El equipo empleado es el mostrado a continuación.

- **Equipamiento para experimental 1:** Material PC-ABS para automoción.



Figura 24 - Inyectora KraussMaffei KM 160 EX (160 TN), Inyectora con una unidad para la inyección  
– Unidad 1

- Diámetro Husillo: 50 mm
- L/D Husillo: 20,4
- Volumen de Inyección Máximo: 377 cm<sup>3</sup>
- Peso Pieza: 343 gramos en PS
- Caudal de Inyección: 589 cm<sup>3</sup>/s (300 mm/s)



Esta inyectora es utilizada en la Inyección convencional.

<b>Unidad de cierre</b>		
Fuerza de cierre máxima	kN	1600
Carrera de apertura máxima	mm	450
Altura mínima de molde	mm	200 - 300
Altura máxima de molde	mm	450 - 550
Distancia máxima entre platos	mm	350 - 450
Distancia entre columnas	mm	520 x 520
Platos de sujeción del molde (b x h)	mm	800 x 830
Peso máximo parte móvil del molde	kg	1120
Fuerza máxima del expulsor	kN	22
Carrera máxima del expulsor	mm	150
<b>Unidad de plastificación horizontal</b>		
Diámetro de husillo	mm	50
Longitud útil del husillo	L/D	20,4
Volumen de inyección máximo	cm <sup>3</sup>	377
Peso de la pieza máximo	g de PS (factor de llenado 0,8)	343
Presión de inyección máxima	bar	1892
Caudal de inyección máximo	cm <sup>3</sup> /s	589
Velocidad tangencial del husillo máxima	mm/s	300
<b>Datos Genéricos</b>		
Altura de la Placa Supletoria	mm	100
Diámetro del Centrador	mm	160
Dimensiones Acople Bulón Expulsor	mm	16 X 2
Recorrido Máximo Expulsor	mm	150
<b>Observaciones</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistema de generación de fuerza de cierre y movimiento de molde eléctrico.</li> <li>• Equipada con un dosificador en la unidad de inyección principal, de cuatro estaciones.</li> <li>• Dispone de entradas y salidas programables para la integración de equipos auxiliares.</li> <li>• Se pueden montar las siguientes boquillas: radio 10mm, radio 19mm, plana, cónica de 70º, cónica de 90º. Mecanismo anti-retorno incluido en la máquina</li> <li>• Cantidad mínima de muestra: 7kg (depende del número de piezas a fabricar)</li> </ul>		



Figura 25 - Dosificador MORETTO DPM 24X instalado en la inyectora KRAUSS MAFFEI

Dosificador MORETTO		
Tipo		<b>DPM 24X</b>
Tensión de utilización y frecuencia	V / Hz	230 / 50
Potencia máxima absorbida	kw	0,05
Nº componentes/Tolvas activas		4
Producción masiva (Peso Específico Aparente = Kg/dm <sup>3</sup> )	Kg/h	100
Capacidad tolvas	dm <sup>3</sup>	24 (Estándar-Reducida- Pulsada) 50 (Doble)
Diámetro rotor	mm	40
Alimentación neumática	bar	4-6
Sección cable	mm <sup>2</sup>	0,5
Peso	Kg	74,5
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura ambiente: 5°C a 40°C (41°F a 104°F)</li> <li>• Temperatura de transporte y almacenamiento: -25°C a 55°C (41°F a 104°F)</li> <li>• Grado de protección IP: IP42</li> </ul>		

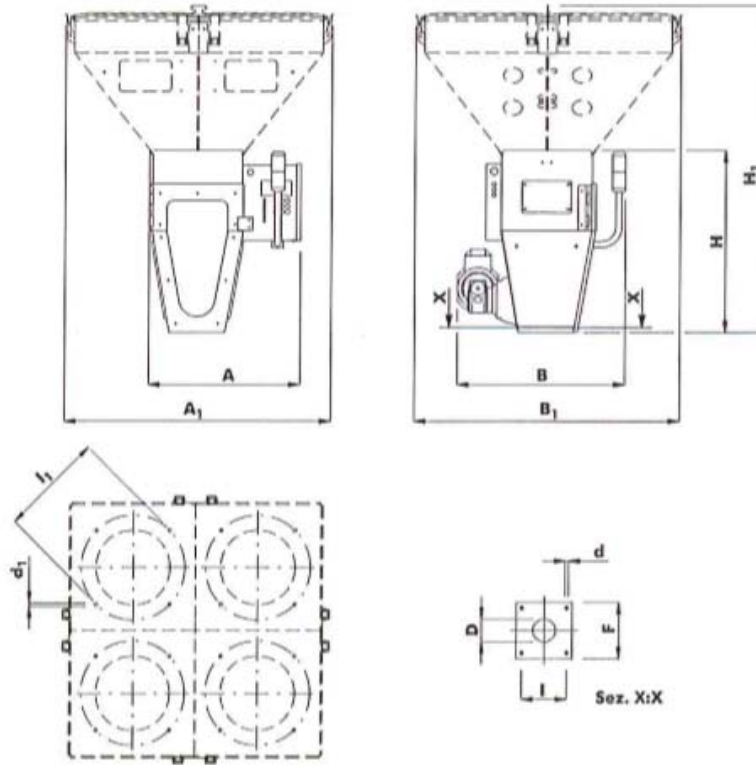


Figura 26 - Dimensiones del dosificador MORETTO DPM 24X

Tipo	DPM 24X
Anchura (A) mm	407
Profundidad (B) mm	450
Altura (H) mm	484
(H <sub>1</sub> ) mm	872
(A <sub>1</sub> ) mm	715
(B <sub>1</sub> ) mm	715
(D) ø mm	60
(F) mm	150x150
(l) mm	120x120
(d) ø mm	9
(l <sub>1</sub> ) ø mm	280
(d <sub>1</sub> ) ø mm	M8



Figura 27 - Atemperador PUCHADES

Termorregulador J.PUCHADES Serie CTM 12LH		
Tipo		<b>CTM 12LH</b>
Accionamiento		Trifásica
Tensión de Alimentación	400 v / 50 Hz	400
Potencia Bomba	kw	-
Potencia Calefacción	kw	-
Temperatura Trabajo	°C	+25 a +150
Capacidad Deposito	Ltrs	-
Capacidad Caudal	Ltrs/min	0,2
Longitud Flujo Predominio	mt	-
Dimensiones	mm	-
Termorregulador CTM 12LH	Aceite ½" – Agua ¼"	
Refrigeración	Intercambiador de Calor a Agua por Electroválvula	Por agua
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dispone de dos entradas y dos salidas.</li> <li>• TERMOSTATO ELECTRICO COMANDADO P.I.D CON CALEFACCIÓN</li> <li>• ELECTROVALVULA DE SEGURIDAD DE CIRCULACIÓN DEL FLUIDO</li> </ul>		



Figura 28 - Deshumidificador MORETTO XD2T utilizado para secar el PC-ABS

<b>Deshumidificador MORETTO XD2T</b>		
Tipo		<b>XD2T</b>
Accionamiento		Monofásico
Tensión de Alimentación	220/240 v / 50 - 60 Hz	220 / 240
Capacidad de Secado	Kg/hr	12,4
Capacidad de la tolva	Litros (l)	15
Potencia de Calefacción	(kw)	0,95
Potencia Instalación	(kw)	1
Corriente	(A)	4,3
Sección Cable	mm <sup>2</sup>	4
Volumen de Aire	(m <sup>3</sup> /hr)	3 a 10
Consumo Promedio a 80°C	Kw/h	0,062 – 0.206
Temperatura Ambiente	°C	5 - 40
Temperatura Máxima	(°C)	180
Largo Profundidad	(mm)	344
Ancho	(mm)	409
Alto	(mm)	591
Peso	(kg)	21
<ul style="list-style-type: none"> <li>Necesita la toma neumática con una presión de entre 6 a 10 bares de presión</li> </ul>		



Figura 29 - Molde empleado para el experimental del sector automoción

**Equipamiento para experimental 2:** Material PP con aditivos para envase alimentario.



Figura 30 Inyectora ENGEL Victory 50 TN, Inyectora con una unidad para la inyección

- Unidad 1
  - Diámetro Husillo: 25 mm
  - L/D Husillo: 28,8
  - Volumen de Inyección Máximo: 53 cm<sup>3</sup>
  - Peso Pieza: 72 gramos en PS
  - Caudal de Inyección: 100 cm<sup>3</sup>/s (203,72 mm/s)

Esta inyectora es utilizada en la Inyección convencional:

<b>Unidad de cierre</b>		
Fuerza de cierre máxima	kN	500
Carrera de apertura máxima (recomendada)	mm	408
Altura mínima de montaje de molde	mm	200
Altura máxima de molde	mm	483
Distancia máxima entre platos	mm	600
Distancia entre columnas	mm	--- x ---
Platos de sujeción del molde (b x h)	mm	--- x ---
Peso máximo mitad móvil molde	kg	---
Fuerza máxima del expulsor	kN	39,8
Carrera máxima del expulsor	mm	100
<b>Unidad de plastificación horizontal</b>		
Diámetro de husillo	mm	25
Longitud útil del husillo	L/D	24,8
Volumen de inyección máximo	cm <sup>3</sup>	69
Peso de la pieza máximo	g de PS (factor de llenado 0,8)	72,5
Velocidad máxima del husillo	r/min	480
Presión de inyección máxima	bar	2090
Caudal de inyección máximo	cm <sup>3</sup> /s (Acumulador)	66
	cm <sup>3</sup> /s (Sin Acumulador)	100
Par de giro del husillo máximo	N-m	80
<b>Datos Genéricos</b>		
Diámetro del Centrador	mm	125
Dimensiones Acople Bulón Expulsor	mm	-
Recorrido Máximo Expulsor	mm	100

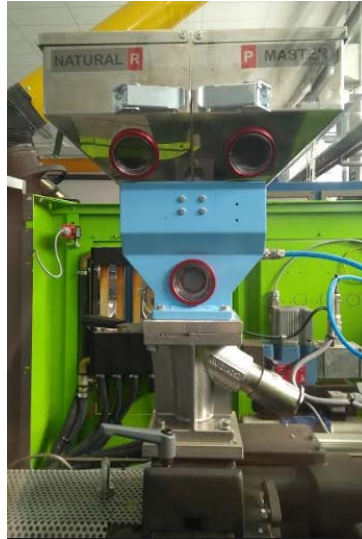


Figura 31 - Dosificador MORETTO DPM 02 instalado en la ENGEL

<b>Dosificador MORETTO</b>		
Tipo		<b>DPM 02</b>
Tensión de utilización y frecuencia	V / Hz	230 / 50
Potencia máxima absorbida	kw	0,05
Nº componentes/Tolvas activas		2
Producción masiva (Peso Especifico Aparente = Kg/dm <sup>3</sup> )	Kg/h	25
Capacidad tolvas	dm <sup>3</sup>	3 (Estándar-Reducida-Pulsada)
Diámetro rotor	mm	0 - 40
Alimentación neumática	bar	4-6
Sección cable	mm <sup>2</sup>	1,5
Peso	Kg	7,5
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura ambiente: 5°C a 40°C (41°F a 104°F)</li> <li>• Temperatura de transporte y almacenamiento: -25°C a 55°C (41°F a 104°F)</li> <li>• Grado de protección IP: IP42</li> </ul>		

Dimensiones del dosificador MORETTO DPM 02:

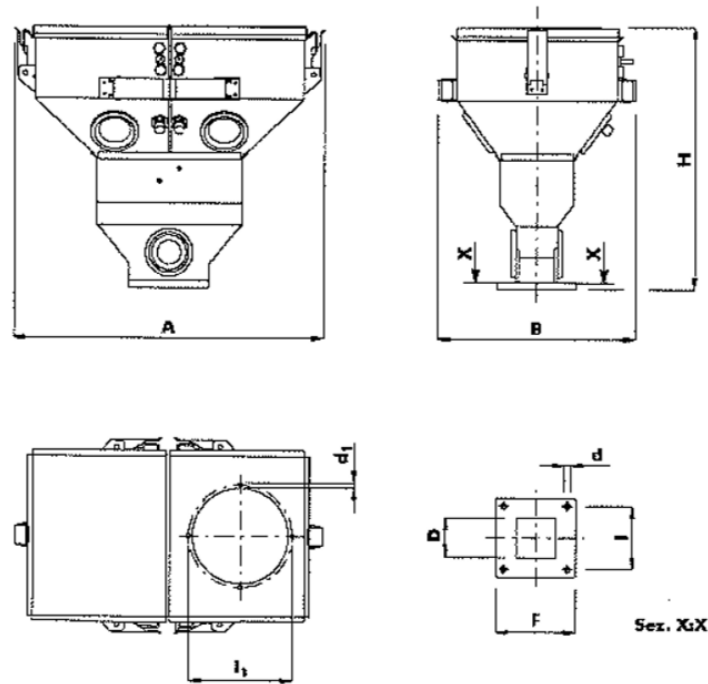


Figura 32 - Dimensiones del dosificador MORETTO DPM 02

Tipo	DPM 02
Anchura (A) mm	390
Profundidad (B) mm	250
Altura (H) mm	330
(D) mm	50x50
(F) $\varnothing$ mm	100x100
(l) mm	80x80
(d) $\varnothing$ mm	7
(l <sub>1</sub> ) $\varnothing$ mm	140
(d <sub>1</sub> ) $\varnothing$ mm	M5



Figura 33 - Atemperador MORETTO

<b>Termorregulador MORETTO</b>		
Tipo		<b>TOS 6</b>
Accionamiento		Trifásica
Tensión de Alimentación	400 v / 50 Hz	400
Potencia Bomba	kw	0,5
Potencia Calefacción	kw	6+6 resistencia doble
Temperatura máxima trabajo	°C	150
Capacidad Deposito	Ltrs	19
Capacidad Caudal	Ltrs/min	0 - 40
Presión bomba	bar	3,5
Dimensiones	mm	308x619x583
Peso	Kg	55 - 67
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Máximo nivel sonoro: &lt; 70dB</li> <li>• Potencia absorbida = Potencia de calentamiento + 0,5 KW</li> <li>• Conexiones hidráulicas: ½" F (enfriamiento), ¾" F (proceso)</li> </ul>		

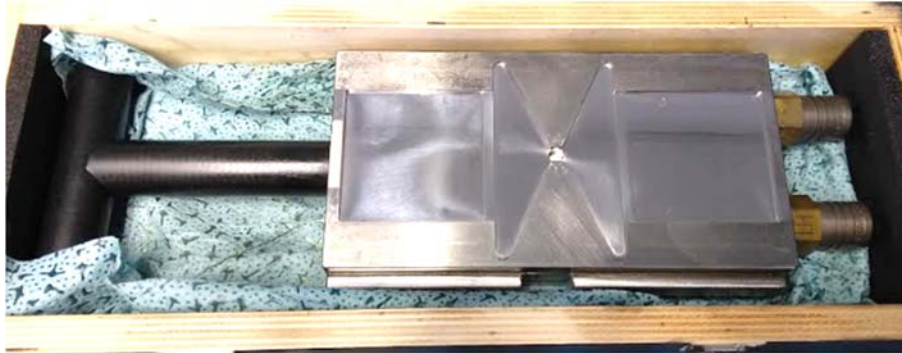


Figura 34 - Molde empleado para hacer las pruebas en el experimental destinado para envase alimentario

*Molde empleado para hacer las pruebas en el experimental destinado para envase alimentario*

#### **4. Parámetros. Definición y descripción de parámetros de control iniciales. Justificación de su elección.**

Antes de pasar a definir cuáles son los parámetros de control del proceso, primero, hay que adecuar la entrada del material a la máquina, ya que, dependiendo del material polimérico y sus propiedades para poder absorber la humedad, es necesario introducirlos en deshumidificadores o secarlos de alguna manera para que alimenten la inyectora en condiciones idóneas sin afectar a la calidad de la pieza ni al proceso productivo.

A continuación, vamos a definir los parámetros de control a tener en cuenta. Algunos los definiremos como parámetro de entrada (o inputs) en el proceso de inyección que se verán traducidos por la máquina en unos parámetros de salida de control (outputs) que de los cuales dependerá la optimización del proceso y la calidad final de la pieza.

##### **Parámetros de entrada (inputs):**

- Temperatura de cilindro y boquilla

El polímero funde debido al aporte calorífico que generan las resistencias calefactoras del cilindro y, sobre todo, por el efecto de cizalla que se genera entre la granza de plástico, el husillo y el cilindro.

Como sabemos, cada material polimérico se comporta de manera diferente uno del otro, teniendo diferentes propiedades mecánicas, reológicas y térmicas que dependen de la configuración molecular de sus cadenas poliméricas.

Es por ello por lo que cada material tiene que trabajar en unas condiciones propias de temperaturas descritas en cada ficha técnica del material y usarlas como referencia en el proceso. Es de vital importancia trabajar en un rango de temperaturas cercanas a las que te puede aportar la ficha técnica del material, ya que temperaturas que se encuentren muy por arriba o por debajo de éstas, puede degradar el polímero o generar la aparición de infundidos, además de encontrarnos con un proceso inestable mermando la calidad de la pieza final.

El operario puede regular las temperaturas de las zonas calefactadas del cilindro y de la boquilla mediante sensores de temperatura o termopares. De este modo podemos conseguir que el polímero se encuentre en las condiciones óptimas para ser inyectado en el molde además de ayudar a obtener una buena mezcla homogénea del fundido.

Material	Rango de Temperaturas de Procesamiento [°C]
ABS	180-245
SAN	180-280
POM (acetal)	185-225
PMMA	185-250
PA 6	230-280
PA 66	270-285
PC	280-310
PEBD	140-160
PELBD	180-260
PEAD	200-260
PP	200-300
PS	180-260
PVC rígido	160-180

Figura 35 - Rangos típicos de temperaturas de procesamiento para algunos termoplásticos

- Temperatura molde

Este input es de suma importancia para la calidad final de las piezas, ya que cuando el molde está cerrado y empieza a inyectarse el material, el enfriamiento debe ser lo más uniforme posible para evitar posibles defectos o alabeos. Para ello se debe mantener la temperatura en el molde lo más constante posible, por eso es trascendental mantener un buen temperado en sus cavidades tanto en la fija como en la móvil.

Este parámetro de control también se puede monitorizar mediante sensores de temperatura que se mantienen en contacto con el molde y, gracias a la ayuda de atemperadores y sistemas de refrigeración, podemos mantener esa temperatura constante.

La temperatura dependerá tanto del material empleado como de la geometría de la pieza que se desea inyectar.

Material	Rango de Temperatura del Molde [°C]
ABS	40-90
SAN	40-90
POM (acetal)	65-125
PMMA	80-105
PA 6	20-100
PA 66	20-100
PC	80-110
PEBD	10-95
PELBD	10-95
PEAD	10-95
PP	15-65
PS	10-40
PVC rígido	10-65

Figura 36 - Rangos de temperatura de molde óptimos para algunos termoplásticos

- Contrapresión

Es la presión efectuada sobre el husillo cuando está plastificando el material sin posibilidad de que éste salga por la boquilla. Sirve no solo para que el husillo no tire hacia atrás debido a la presión ejercida por

el polímero fundido sobre el husillo, sino para que la mezcla sea más homogénea generando un aporte de calor mecánico por cizalla facilitando el fundido.

- Velocidad de inyección

Este parámetro se refiere a la velocidad de desplazamiento del husillo en el momento de la inyección. Éste depende de las características reológicas del material, de la temperatura, de la geometría de la pieza y los canales de alimentación.

Para poder optimizar el proceso, debemos adaptar unos perfiles de velocidades de inyección dependiendo de la geometría de la pieza. De este modo el avance del flujo será lo más uniformemente posible dentro de la cavidad del molde, llenando prácticamente la pieza de forma que no cree líneas de unión ni otros posibles defectos.

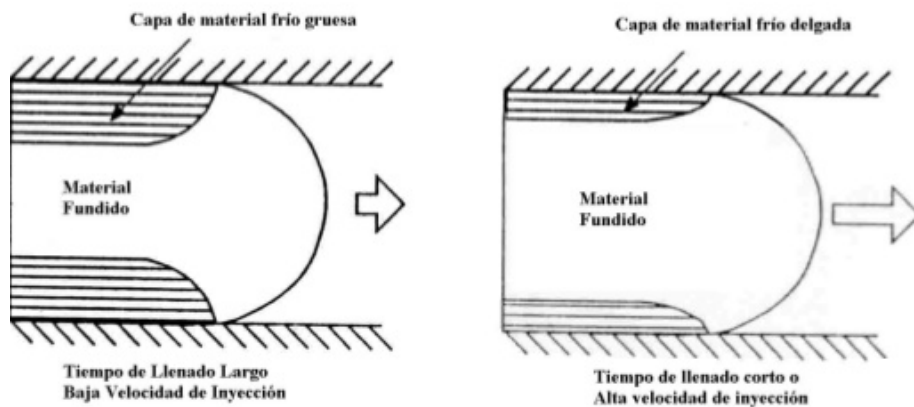


Figura 37 - *Espesor de capa fría cuando el fundido entra en contacto con las paredes del molde en función de la velocidad.*

- Velocidad de giro del husillo

Estas son las revoluciones que da el husillo para poder homogeneizar y distribuir la mezcla, además de plastificar el material.

La calidad de la mezcla y la plastificación del material dependen de este input que se ve afectado por las propiedades reológicas y térmicas del mismo material.

- Presión de compactación

Esta presión es necesaria para poder contrarrestar la contracción que sufre el material cuando se enfría en la cavidad del molde. Se debe mantener el tiempo necesario hasta que la pieza esté lo suficientemente solidificada para que ya no se vea prácticamente afectada las dimensiones de la pieza debido a la contracción.

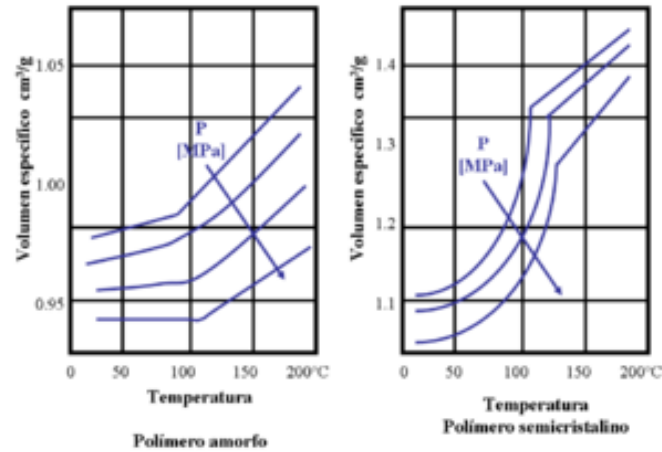


Figura 38 - Diferencia de contracciones entre un polímero amorfo y uno semicristalino.

La transición entre la fase de llenado y la de compactación se debe realizar de manera suave.

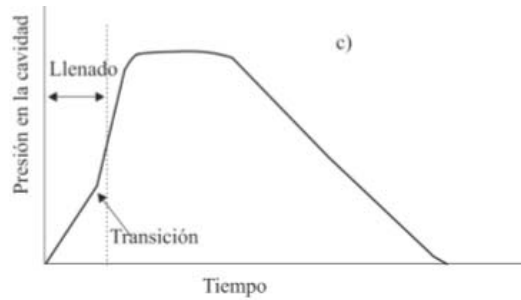


Figura 39 - Grafica tipo de una transición llenado-compactación óptima.

Si el punto de conmutación se realiza demasiado pronto, aparece una caída brusca de presión en la gráfica de presión en cavidad. Esto conlleva a que la pieza obtenida salga con defectos como rechupes, poros internos u otros defectos superficiales.

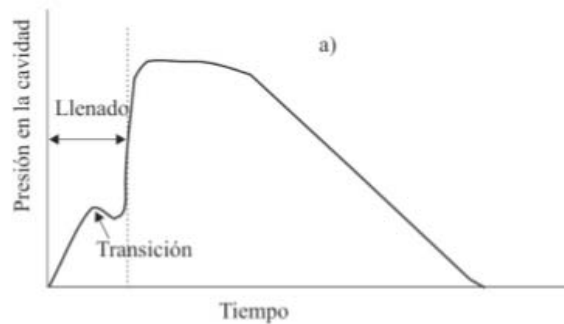


Figura 40 - Gráfica de presión en cavidad con punto de conmutación temprano.

Si por el contrario la transición se efectúa demasiado tarde se produce un pico de presión en cavidad que ocasiona un retorno de material hacia la entrada del molde, generando orientaciones del material inadecuadas. Esto produce la aparición de rebabas en el plano de partición del molde, además de sobreesfuerzos en máquina y molde haciendo disminuir su vida útil.

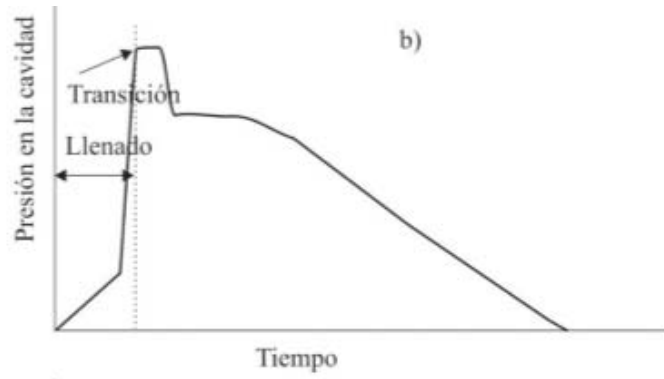


Figura 41 - Grafica con un punto de conmutación tardío.

- Fuerza cierre

Fuerza empleada por la unidad de cierre para que una vez el husillo inyecta el material fundido en la cavidad del molde, este no se pueda abrir y se mantenga cerrado sin perder el material por los bordes creando rebabas. Dependerá de la velocidad de inyección y de la geometría de la pieza (área proyectada).

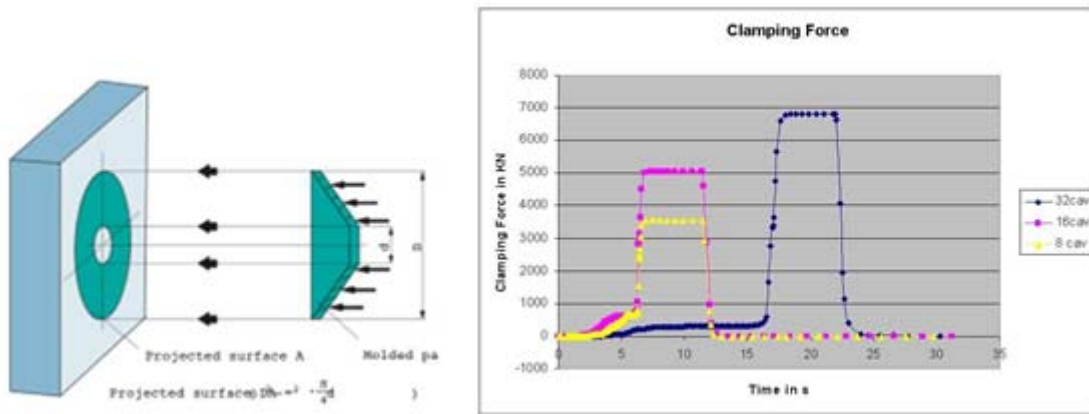


Figura 42 - Izda.: Área proyectada de la pieza a inyectar. Dcha.: Diferentes fuerzas de cierres para diferentes números de cavidades en el molde. La fuerza de cierre aumenta con el número de cavidades.

- Tiempo compactación

Tiempo que se desea mantener la presión de compactación para que la pieza no se vea muy afectada por la contracción que aparece a medida que se va enfriando.

- Tiempo de enfriamiento

Tiempo transcurrido desde que el material empieza a entrar en la cavidad del molde en la etapa de inyección hasta que la pieza es expulsada del interior del molde.

**Parámetros de salida (outputs):**

- Cojín

Cantidad de material que debe permanecer en el husillo y que hay que tener en cuenta para introducir en la fase de compactación debido a la contracción sufrida por el polímero cuando se va enfriando. Tener en cuenta que los polímeros semicristalinos sufren más contracción que los polímeros amorfos.

El cojín se establece aumentando la capacidad volumétrica necesaria para llenar la cavidad del molde (generalmente entre 5% y 10% sobre el recorrido del husillo). Si este cojín es demasiado pequeño puede que el husillo arrastre todo el material hasta el interior del molde haciendo que la presión de compactación no sea efectiva. Sin embargo, si el cojín es demasiado grande el tiempo de residencia del material en la maquina puede exceder de lo que se debe y se puede degradar el material.

Es aconsejable trabajar en capacidades volumétricas en vez de recorrido del husillo, ya que cada máquina tiene sus propias dimensiones de husillo y cilindro, y por tanto, el volumen de material plastificado será diferente para mismo recorrido de husillo en diferentes máquinas.

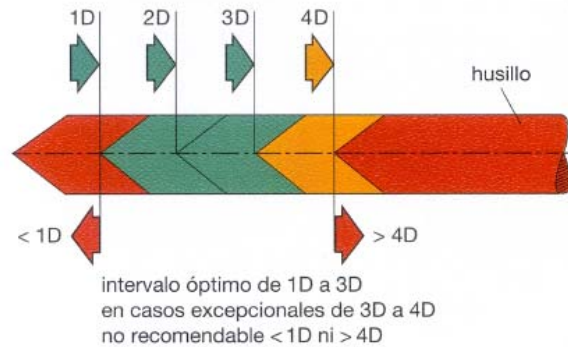


Figura 43 Cantidad de material que es aconsejable utilizar como cojín.

- Tiempo de ciclo

Tiempo empleado en una inyectada de material a las cavidades del molde, desde que éste cierra hasta que abre y vuelve a cerrar.

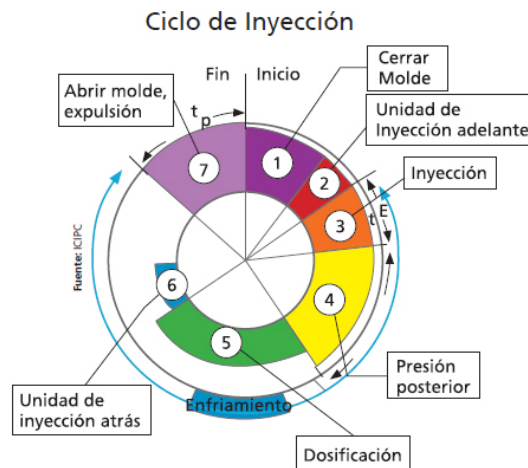


Figura 44 - Etapas en el proceso de inyección

- Presión de inyección

Presión, que ejerce el husillo sobre el material previamente plastificado, generando el llenado en la cavidad del molde. En aquellas máquinas hidráulicas, la presión se origina por el accionamiento del cilindro hidráulico y su magnitud es proporcional al valor de la presión hidráulica. Por eso es importante pasar las presiones de inyección a presiones específicas para poder ser comparables con máquinas eléctricas.

$$P_i = \frac{P_h \times d_h}{d}$$

$P_i$ = Presión inyección

$P_h$ = Presión hidráulica

$d_h$ = diámetro de pistón hidráulico

$d$ = diámetro husillo

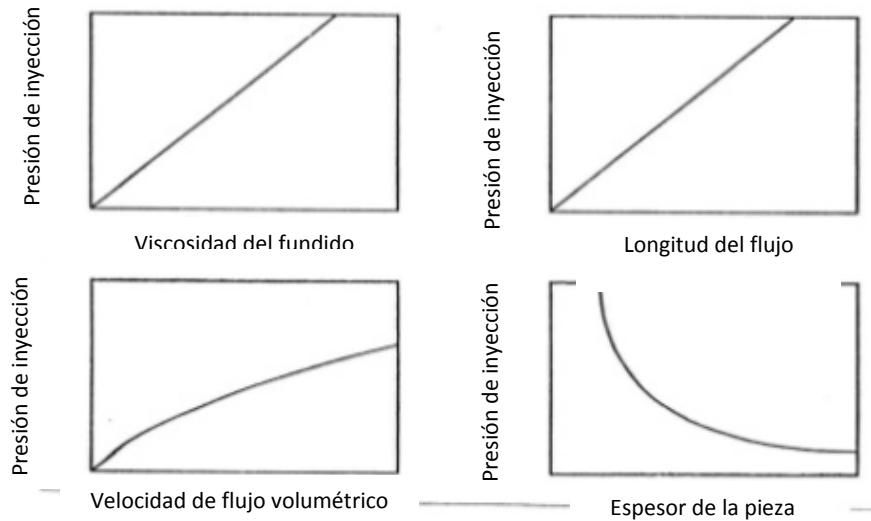


Figura 45 - Presión de inyección en función de: viscosidad del material, recorrido del flujo, velocidad de inyección y espesor de la pieza.

- Presión en cavidad

Presión que tiene el material en la cavidad desde que se inyecta hasta que se enfría en el interior del molde.

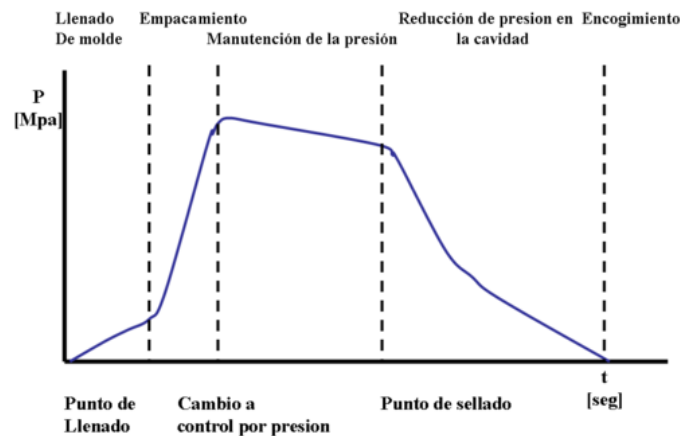


Figura 46 - Presión en cavidad en las diferentes etapas de la inyección

- Tiempo de plastificación

Tiempo que tarda la cantidad de material requerida en plastificar. Depende tanto de la velocidad de giro del husillo, del perfil de temperaturas y del material como de la contrapresión.

No influye de manera directa en el tiempo de ciclo ya que este tiempo se efectúa dentro de la etapa de enfriamiento. Sin embargo, si el tiempo de plastificación es mayor que el tiempo de enfriamiento, el ciclo queda restringido, es decir, hasta que no acabe de plastificar el material no podrá inyectarse en cavidad sobre haber extraído la pieza.

**5. Determinación del experimental.**

Como hemos mencionado con anterioridad, nos hemos decantado por la realización de dos experimentales, uno para el sector envase realizando probetas ISO D2 para un PP aditivado, y otro para el sector de automoción para un PC-ABS utilizando un molde con placas de dimensiones 150x150 mm para ensayos de inflamabilidad.

Experimental relacionado con el sector envase

A continuación, vamos a identificar los parámetros de control obtenidos.

Datos del experimental obtenidos:

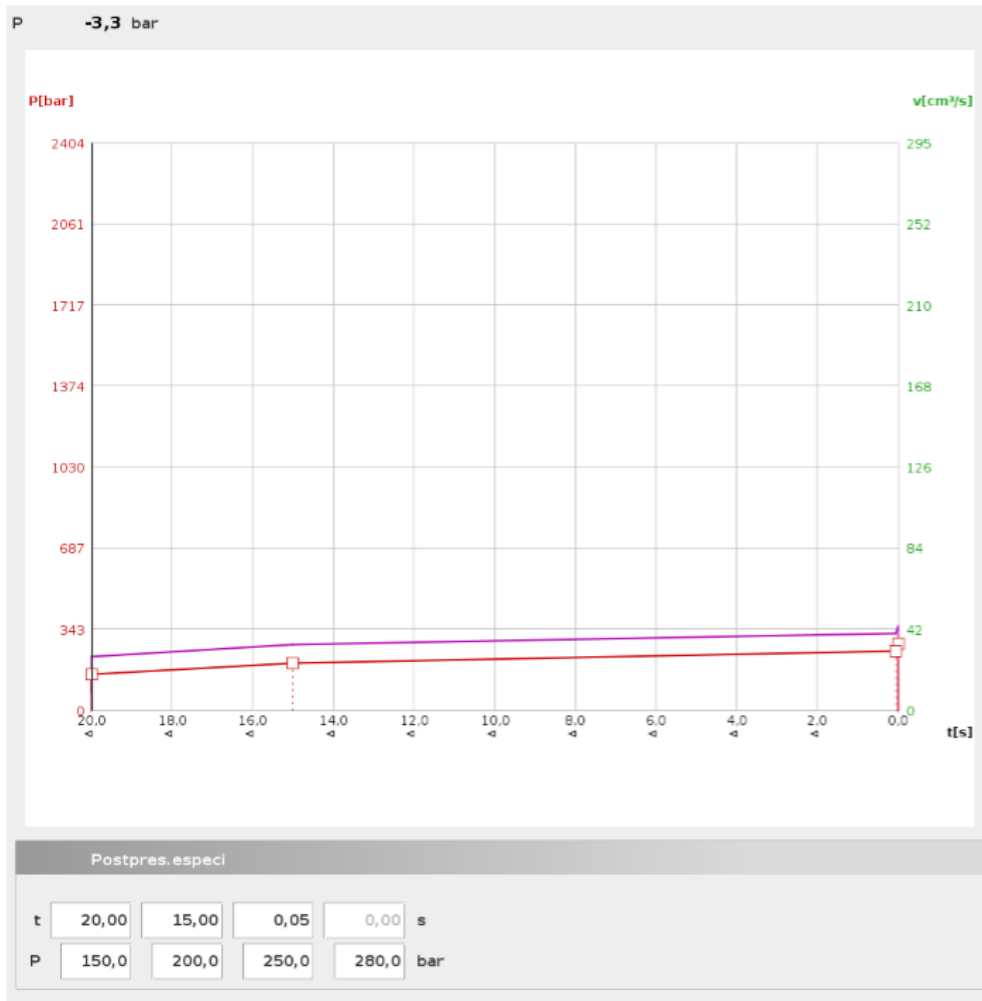
Molde	AXXICON	
Muestra	ISO D2	
Material	PP	
MFI: 230°C – 2.16 Kg	55	
Densidad	0.905 g/cm <sup>3</sup>	
Peso de la inyectada	20.2 g	
Peso de la muestra	6.6 g	
Porcentajes	97% Virgen – 3% aditivo	
Presiones	Perfil 1	189-195
	Perfil 2	245-255
	Perfil 3	285-295



Figura 47 - Perfiles de postpresión e inyección



Figura 48 - Perfil de velocidades de inyección



*Perfil de presiones de compactación o postpresión*

T. enfriamiento	25,00 s	25,01 s	Tiempo postpresión	20,00 s	20,00 s	T. inyecc.	0,30 s			
Vigilancia cojín material		V	2,18 cm <sup>3</sup>		Tipo conmutación			Comutación dependiente...		
Ciclos arranque volumen conmuta...		60,00	Volumen conmutación actual		8,00 cm <sup>3</sup>			Pres. espe. al conmutar	288,4 bar	
Presión de inyección		P	-3,7 bar		Volumen conmutación		8,00 cm <sup>3</sup>	Limite espe. presión inyección	2400,0 bar	
Vigilancia tiempo inyección		t	0,30 s		Valor punta presión específica inyección		288,4 bar	Parar inyección en límite presión		<input type="checkbox"/>

*Tiempo enfriamiento, tiempo de postpresión, tiempo de inyección, cojín material, punto de conmutación y presión específica*

	1	2	3	4		1	2	3	4
Valor teórico	0,0	240,0	230,0	220,0	30,0	0,0	25	240,0	240,0
Tolerancia pos.	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	20,0		50,0	50,0
Tolerancia neg.	30,0	30,0	30,0	30,0		20,0		30,0	30,0
Min. vigilancia	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 49 - Izda.: Perfil de temperaturas de cilindro. Dcha.: Temperaturas de molde y boquilla antirretorno



Figura 50 - Perfil de dosificación 1



Figura 51 - Perfil de dosificación 2



Figura 52 - Presión en cavidad



Figura 53 - Tiempo de ciclo

Primero se ha tomado como referencia la temperatura de molde y los perfiles de temperatura del cilindro de las fichas técnicas del material virgen. A partir de ahí se han realizado los ajustes necesarios, sobre todo en la fase de plastificación (contrapresión y velocidad de giro de husillo) para que la mezcla fuese lo suficientemente homogénea para que se disperse correctamente los aditivos en la matriz polimérica.

Por último, hay que indicar que en la gráfica de presión de cavidad se observa un valle que no es muy común en un proceso estable y en una inyección óptima. Esto es debido a problemas que se tuvo en la bomba de la inyectora donde el paso de presión de inyección a la de compactación lo hacía de un modo brusco, parándose la bomba en el cambio el tiempo suficiente para que se vea afectada la bajada de presión.

Experimental relacionado con el sector automoción

Datos del experimental obtenidos:

Molde	Inflamabilidad 150x150 mm	
Material	PC-ABS Bayblend	
MFI: 260°C – 5 Kg	18	
Densidad	1.13 g/cm <sup>3</sup>	
Peso de la inyectada	69 g	
Peso de la muestra	54.9 g	
Deshumidificador	4 horas – 80°C	
Temp. molde	Teórica	70°C
	Real	80°C

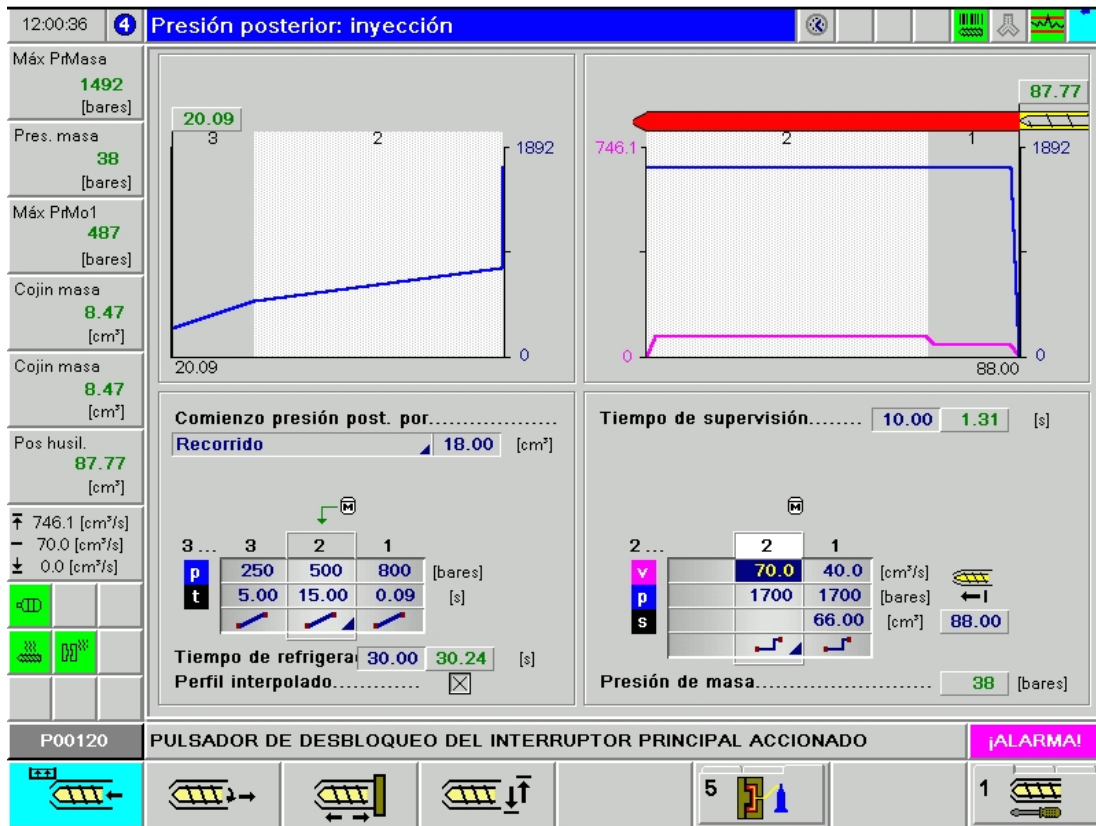


Figura 54 - Perfiles de inyección y postpresión

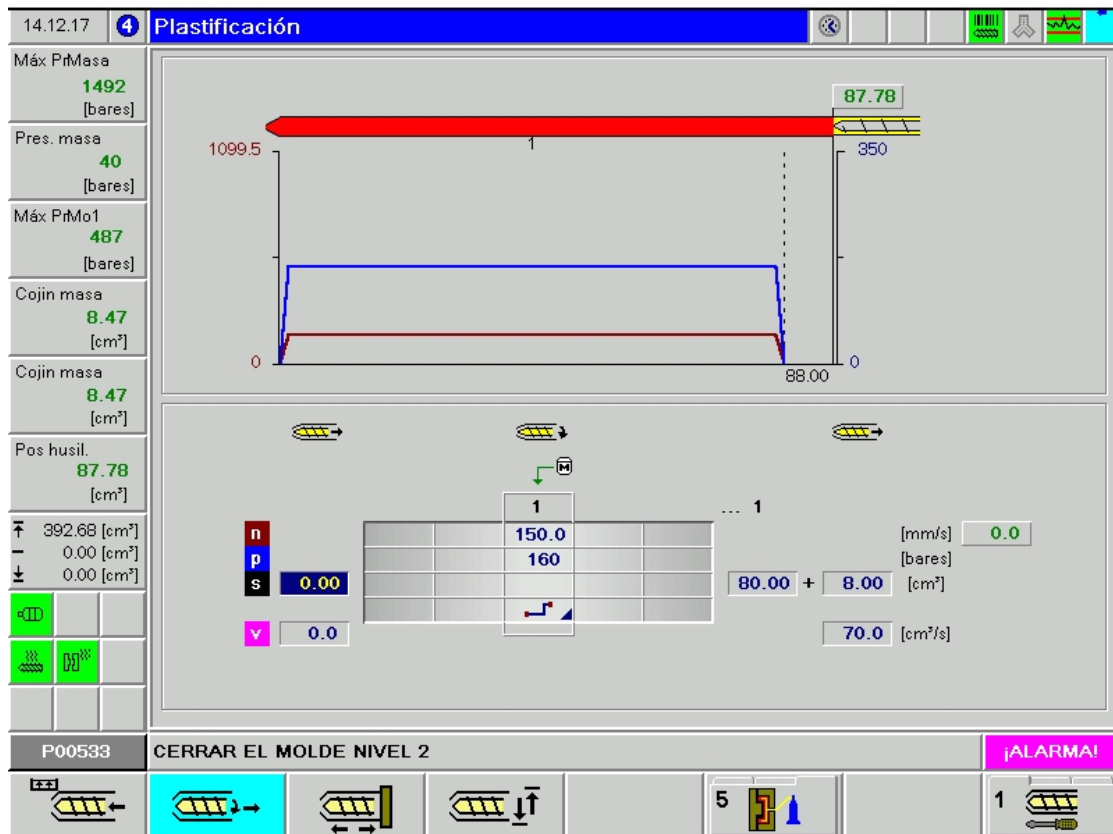


Figura 55 - Perfil de plastificación y contrapresión

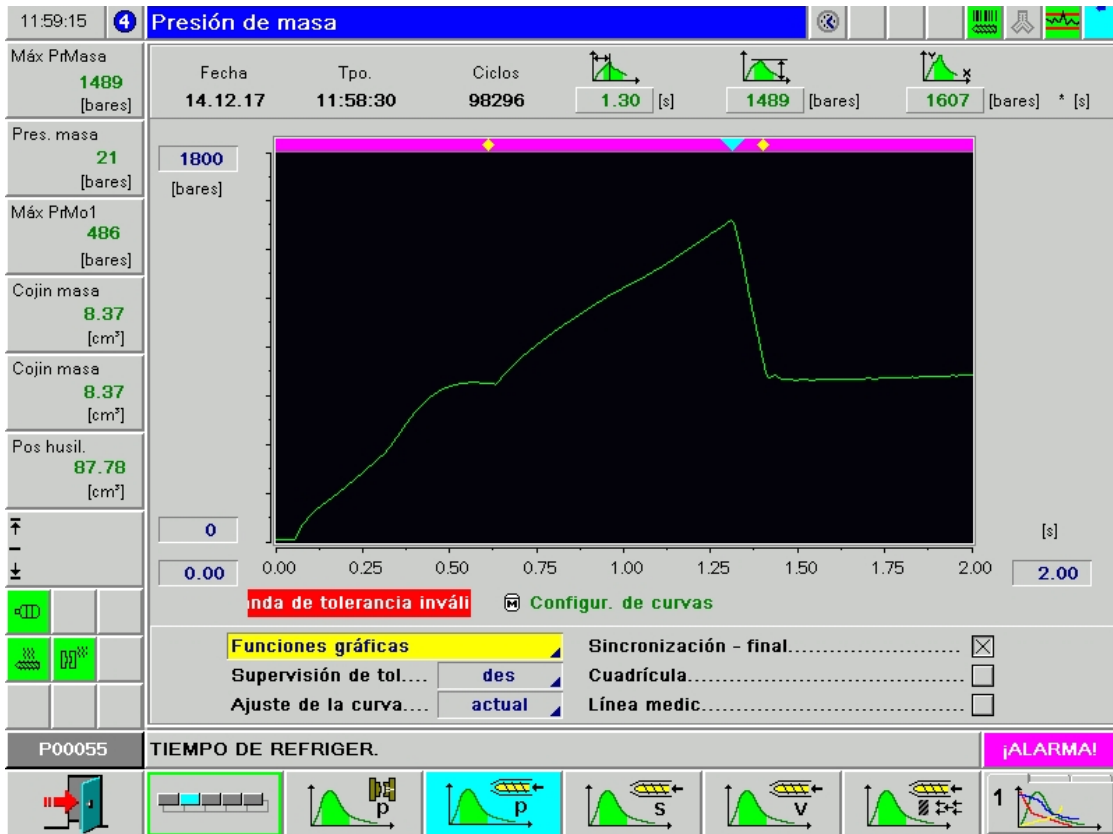


Figura 56 - Perfil de presiones en fase de llenado y compactación

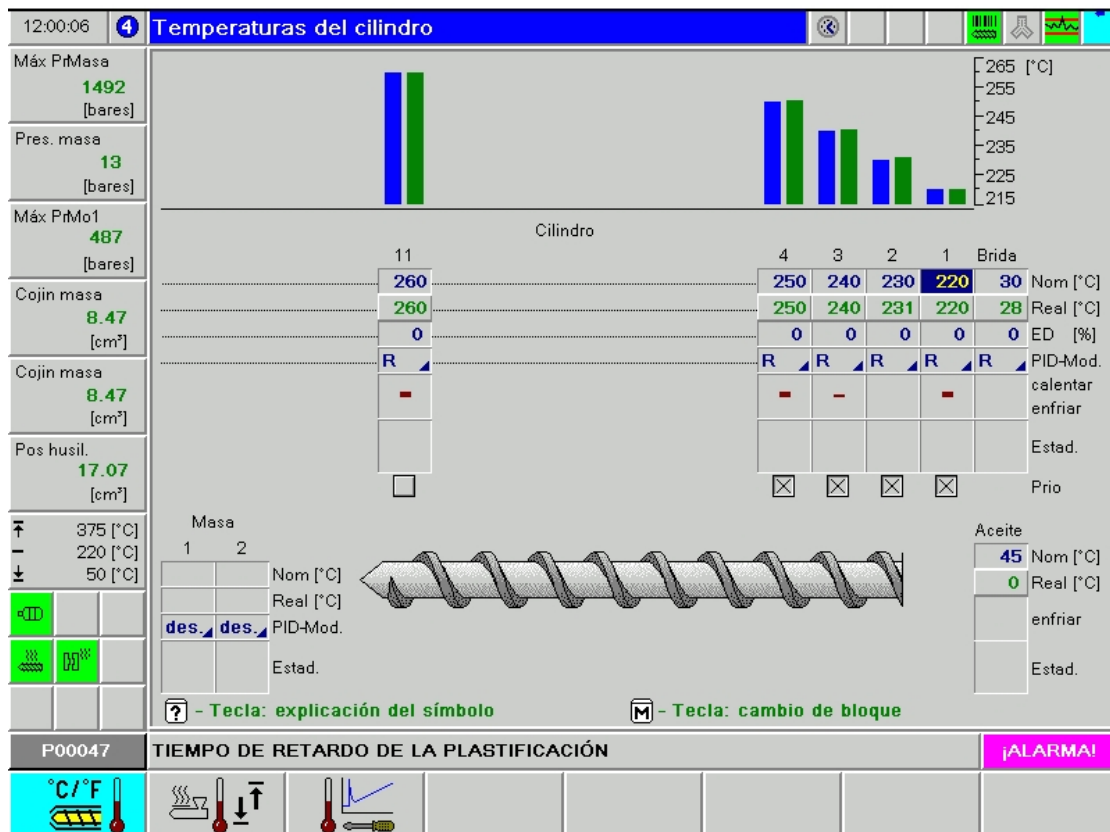


Figura 57 - Temperaturas de cilindro y boquilla

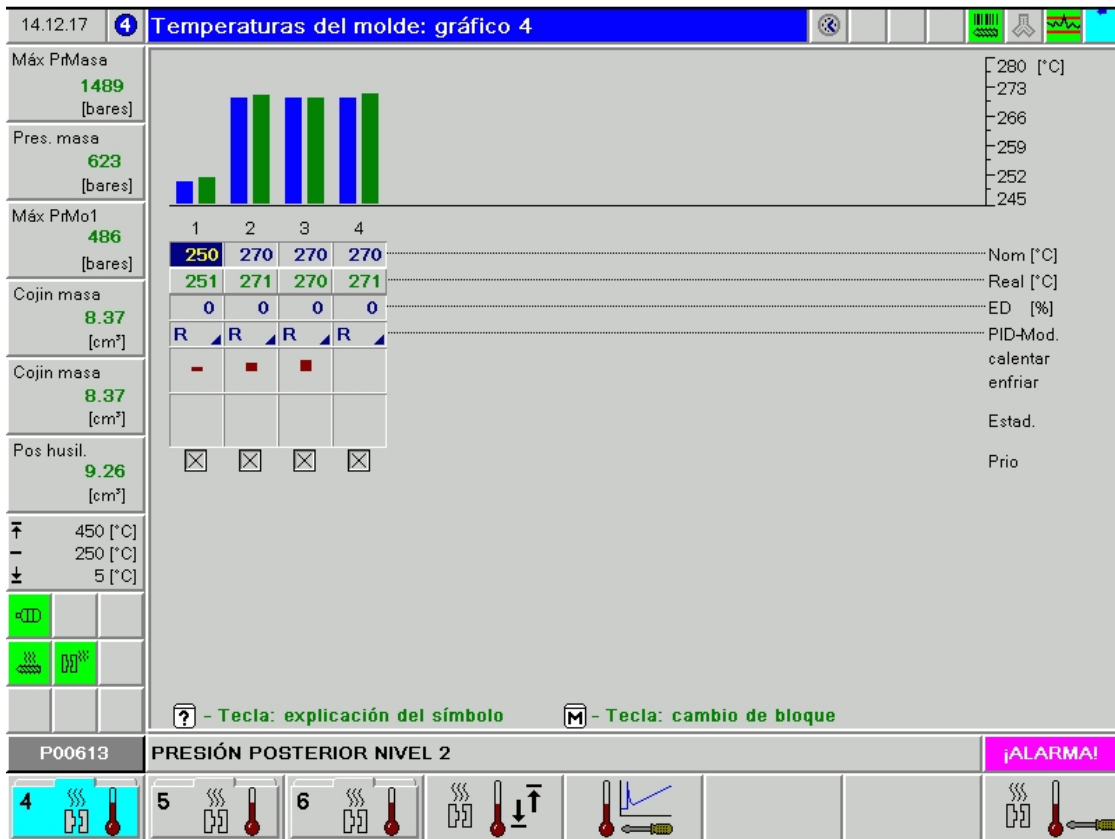


Figura 58 - Temperaturas de cámara caliente

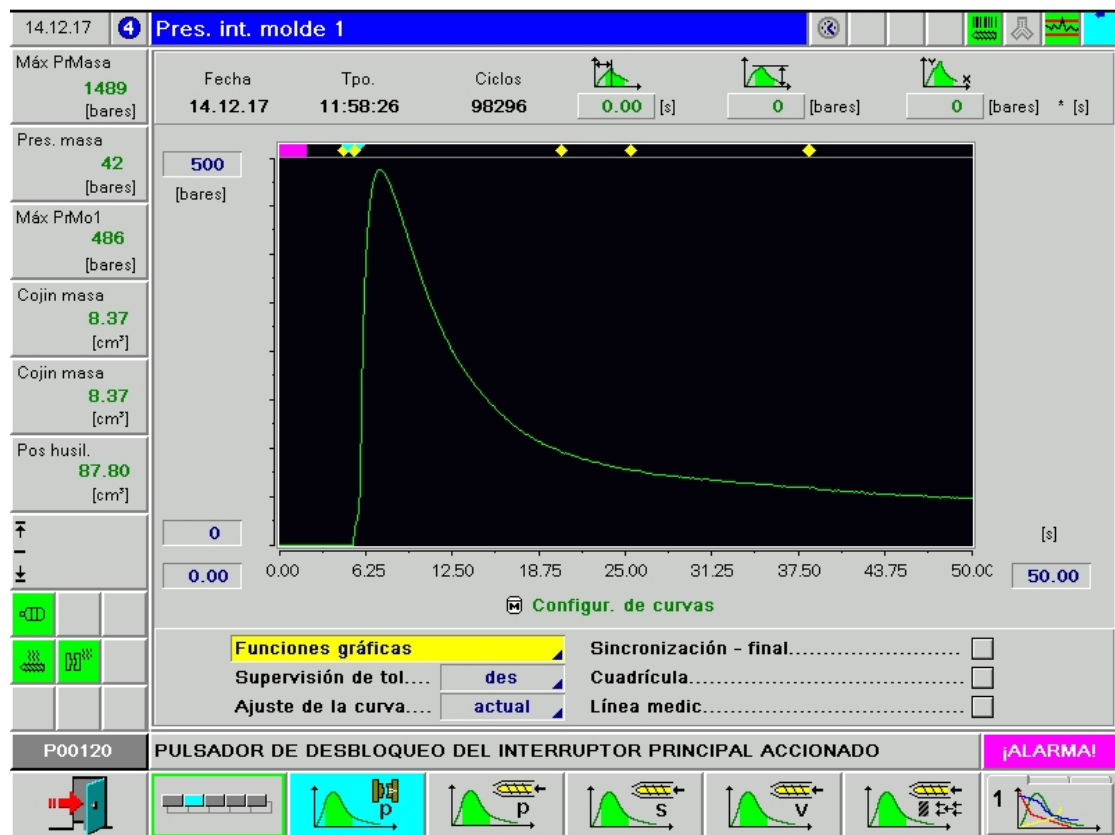


Figura 59 - Presión en cavidad

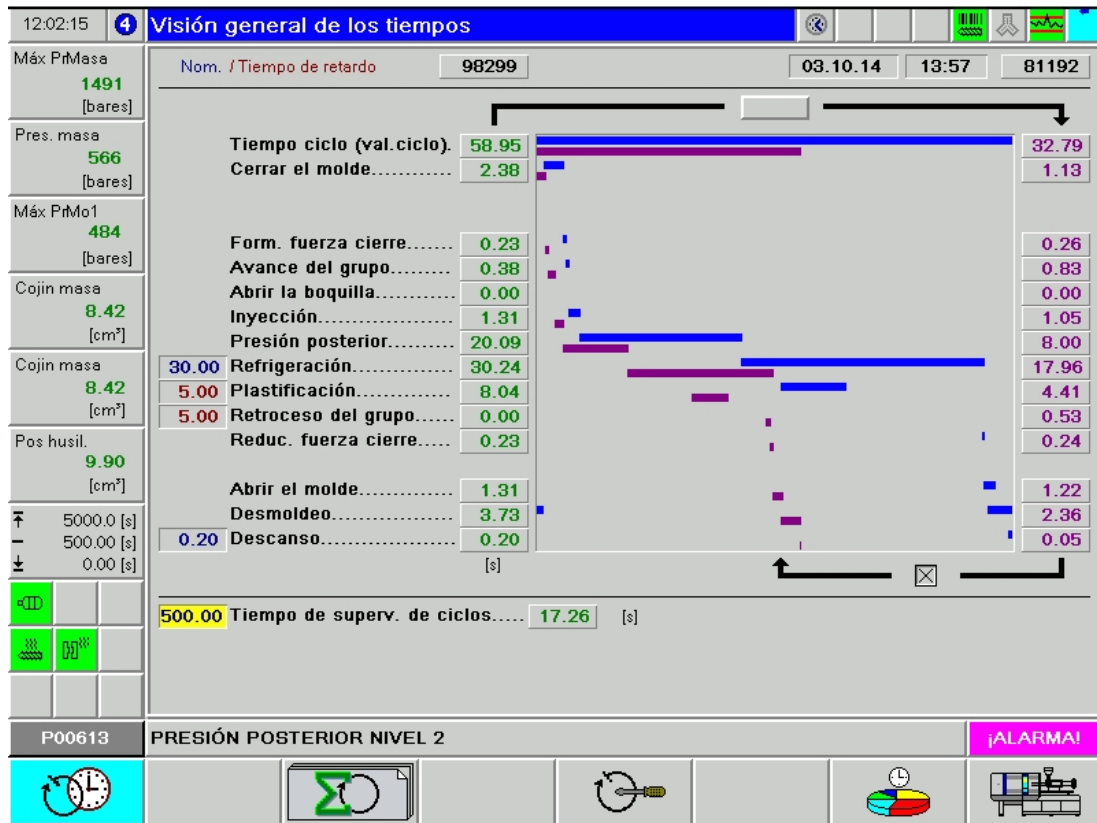


Figura 60 - Tiempo de ciclos inyección

Al igual que en el experimental anterior, se cogen como referencia las temperaturas, tanto de molde y de zonas calefactables (cilindro y cámara caliente) de la ficha técnica de material. A diferencia del caso anterior, en este experimental debemos secar previamente el material mediante humidificador según condiciones también de ficha técnica.

Observando la gráfica de presiones, apreciamos una transición suave entre fase de inyección y compactación sin aparecer ninguna anomalía en la fase de llenado o compactación. También se observa el pico máximo de presión en el punto de conmutación característico de proceso estable.

### 6. Determinación del producto óptimo.

Para determinar que la pieza es de calidad óptima, antes que nada, la pieza se debe ajustar a unos perfiles de velocidades de inyección y de postpresión, observando en todo momento que no haya apariciones de ningún tipo de defecto en la pieza.

Posteriormente, ya habiendo ajustado los perfiles, hay unos parámetros fundamentales que debemos de tener en cuenta y que deben permanecer prácticamente constantes cada ciclo de inyección para saber que la pieza es de calidad óptima.

Estos parámetros son la presión máxima alcanzada y el cojín de masa que deriva de cada inyectada para controlar la calidad de la pieza. Para controlar la estabilidad del proceso hay que controlar los tiempos resultantes de ciclo y de plastificación. Si en estos parámetros no hay mucha variabilidad quiere decir que la pieza tiene el mismo peso, con que el proceso permanece estable sin la aparición de defectos.

Como parámetros de apoyo a este control de calidad, y en referencia al proceso productivo se deben observar los tiempos resultantes de ciclo y de plastificación. Si estos permanecen en unos valores aproximadamente constantes nos querrá decir que el proceso se mantiene estable, sin problemas de mala homogenización en la mezcla, o tiempos excesivos en algunas de las etapas del proceso de inyección.

Experimental sector envase:

Tiempo inicio	Valor punta presión específica a inyección (bar)	Pres. específica al conmutar (bar)	Cojín de material final postpresión (cm <sup>3</sup> )	Ciclo tiempo enfriamiento (s)	Valor real tiempo inyección (s)	Tiempo de ciclo hasta final desmoldeo (s)	Valor real tiempo dosificación (s)
10:28	288,9	288,9	2,1	25,61	0,3	56,14	14,16
10:29	290	290	2,29	25,89	0,3	56,41	13,85
10:30	287,6	287,6	1,93	25,68	0,3	56,28	14,09
10:31	289,8	289,8	2,25	25,19	0,3	55,69	13,88
10:32	291,3	291,3	2,47	25,58	0,31	56,11	13,4
10:33	288,5	288,5	2,08	25,28	0,3	55,88	13,78
10:34	289,3	289,3	2,19	25,01	0,3	55,55	13,49
10:35	291,9	291,9	2,4	25,01	0,31	55,53	13
10:36	293	293	2,35	25,01	0,31	55,54	12,71
10:37	289,8	289,8	2,21	25,01	0,3	55,53	13,19
10:37	291,2	291,2	2,19	25,46	0,3	56,01	13,01
10:38	288,4	288,4	2,18	25,01	0,3	55,56	13,68
10:39	289,8	289,8	2,12	25,69	0,3	56,27	13,18
10:40	288,2	288,2	2,09	25,24	0,3	55,79	13,9
10:41	287,9	287,9	2,05	26,36	0,3	56,91	13,45
10:42	287,3	287,3	1,97	27,82	0,3	58,05	14,56

Tabla resultante de los parámetros de control del proceso para el experimental del sector envase

Como podemos observar, y referente a lo ya mencionado teniendo en cuenta los parámetros de control, el proceso de inyección se mantiene estable en cuanto a tiempos de ciclos, viéndose mínimamente variado por los tiempos de plastificación. Eso se debe a la importancia de obtener una buena mezcla en este experimental ya que se añaden el polímero virgen y el aditivo por separado, realizando el compuesto en el mismo proceso. Por motivos de homogeneidad y dispersión del aditivo a la hora de realizar la mezcla en la fase de plastificación existen esa pequeña disparidad de valores siendo aproximadamente constantes en todo el proceso, por lo que aceptamos como proceso estable.

Además, y también relacionado la mínima dispersión de valores tanto en los tiempos de plastificación y consecuentemente con los tiempos de ciclo, observamos también esa pequeña variabilidad en la presión y cojín. Sin embargo, se realizó un control de las piezas inyectadas bajo estas condiciones, obteniendo el mismo peso en las piezas inyectadas. De este modo aceptamos como pieza óptima bajo condiciones de proceso estable.

Experimental sector automoción:

Hora de inyección	Max Presión Masa (bar)	Conm. Presión Masa (bar)	Max Presión Molde (bar)	Conm. Rec. C (cm <sup>3</sup> )	Cojín masa (cm <sup>3</sup> )	Tiempo iny. (s)	Tiempo plas. (s)	Tiempo ciclo (s)

11:50:10	1498	1485	480	17.99	8.39	1.31	7.92	58.95
11:51:23	1498	1484	481	17.98	8.43	1.31	7.97	58.96
11:52:34	1492	1479	485	17.98	8.39	1.31	7.93	58.95
11:53:50	1489	1475	484	17.97	8.34	1.31	7.94	58.95
11:55:00	1491	1477	489	17.98	8.49	1.31	7.93	58.96
11:56:09	1490	1476	486	17.98	8.37	1.31	7.92	58.97
11:57:19	1488	1474	487	17.98	8.31	1.31	7.89	58.94
11:58:28	1489	1475	486	17.98	8.37	1.31	7.92	58.96
11:59:38	1492	1477	487	17.97	8.47	1.31	7.91	58.95
12:00:50	1491	1478	484	17.98	8.42	1.31	7.88	58.95
12:02:00	1493	1482	485	18.00	8.53	1.31	7.87	58.96
12:03:09	1494	1480	485	17.97	8.44	1.31	7.90	58.95
12:04:17	1496	1482	484	17.97	8.50	1.31	7.89	58.96

Tabla resultante de los parámetros de control del proceso para el experimental del sector automoción

En cuanto a este experimental, se puede ver y, como hemos dicho con anterioridad, los valores de presión y cojín son prácticamente constantes, al igual que ocurre en los tiempos de ciclo y plastificación del proceso. Existe muy poca variabilidad en los tiempos tanto de ciclo como de plastificación por motivos de que se realiza para este experimental la plastificación de un material. Es por ello que los valores de presión y cojín reflejados en la tabla salen prácticamente constantes.

### 7. Mejoras propuestas para el proceso probado, asociadas a incorporación de sensores, monitorización, medidas online, visión artificial, etc.

La Industria 4.0., gracias a su función, presta el servicio digital de monitorización de la máquina permitiendo a los operarios seguir en tiempo real el proceso de producción mediante dispositivos móviles.

Pero solamente muy pocas empresas sensorizan sus procesos productivos, aunque actualmente este tipo de empresas va creciendo en cifras de forma paulatina con la digitalización de la industria y la aparición de tecnologías predictivas facilitan el seguimiento y control del proceso de inyección.

Para monitorizar y controlar los parámetros anteriormente mencionados, en alguno de ellos, las máquinas inyectoras, por lo general, cumple con estos propósitos, es decir, al introducir los inputs la máquina da como resultado alguno de los outputs anteriormente mencionados. Estos parámetros de procesos u outputs obtenidos por la máquina inyectora son tiempo de ciclo, tiempo de plastificación y cojín.



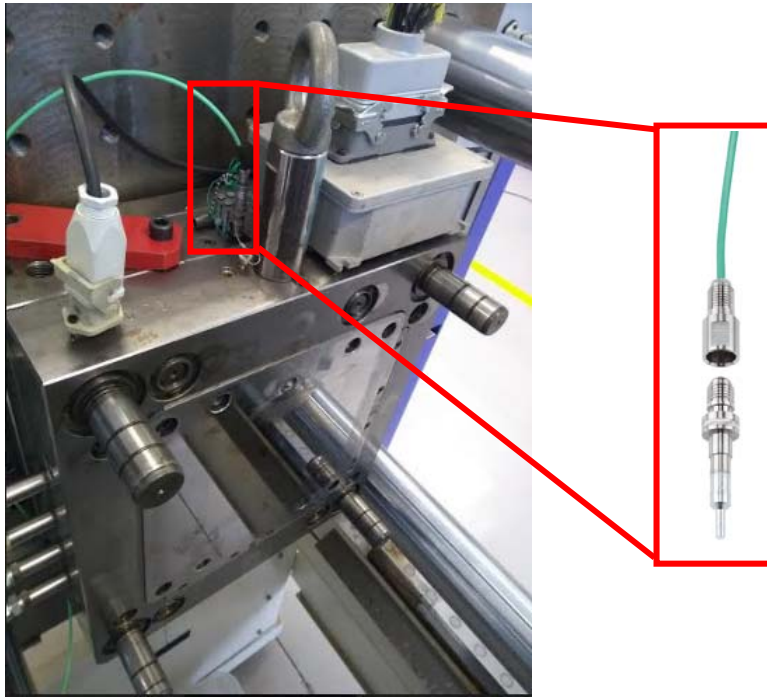
*Funcionamiento de la maquina inyectora convencional con los parámetros de ajuste (inputs) da como resultado unos parámetros de proceso (outputs)*

Sin embargo, hay parámetros que, con la ayuda de sensores o equipamiento auxiliar, nos facilitan el control de parámetros de proceso tanto para poder alcanzar la máxima calidad de la pieza como para optimizar la inyección. A continuación, vamos a describir cuales de los parámetros de control necesitan de sensorización para poder ser regulados y detectar incidencias en el proceso en cuanto a la calidad de

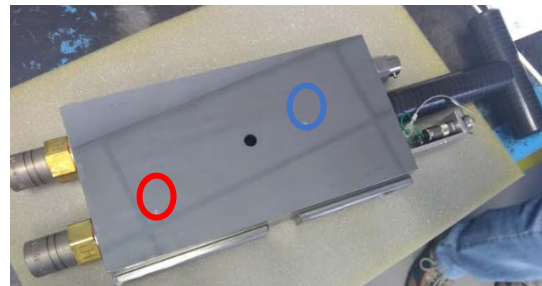
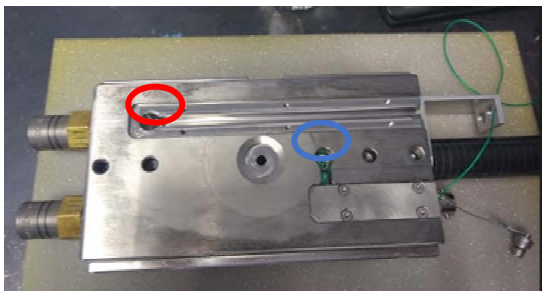
la pieza se refiere o incluso para hacer el seguimiento de mantenimiento predictivo de alguna de las partes de la máquina inyectora.

Parámetros que pueden sensorizarse y monitorizarse:

- Presión en cavidad



*Sensor de presión en cavidad*



*Posicionamiento de los sensores de presión en cavidad en una probeta normalizada*

- Presión en boquilla



*Sensores de presión en boquilla resistentes a altas temperaturas que entran en contacto con el material fundido*

- Temperatura en molde, cilindro y boquilla



*Termopar colocado en la cavidad fija del molde para controlar la temperatura a la que se encuentra en todo momento.*

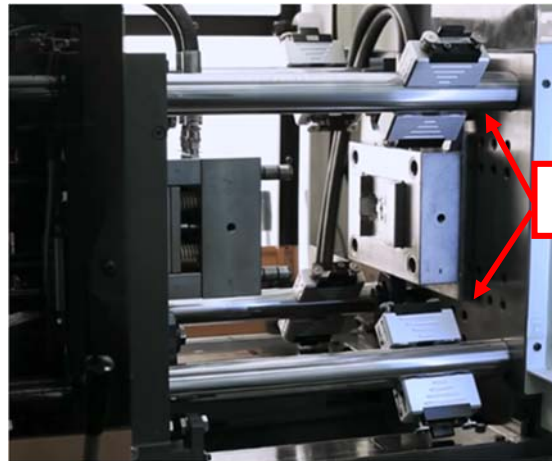


*Termopares colocados en cada una de las zonas calefactadas del cilindro y en la boquilla. Posibilidad de controlar la temperatura en cada una de las zonas del husillo (zona de alimentación, plastificación e inyección) y en la boquilla.*



*Tipos de termopares*

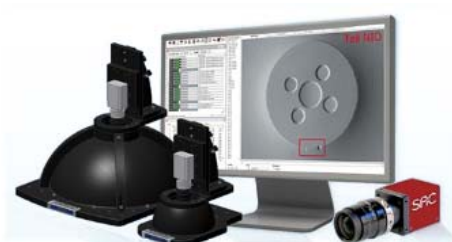
- Fuerza de cierre

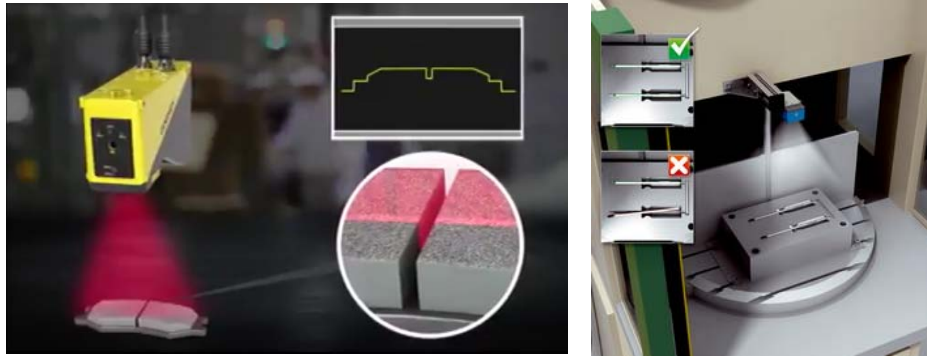


*Galgas extensométricas de montaje magnético en barras para calcular la fuerza de la unidad de cierre*

Además, para asegurarnos de un mayor control de la pieza final existe una serie de sensores de visión artificial que pueden realizar una serie de funciones como son por ejemplo las siguientes:

- Control de defectos como rebabas, golpes, hendiduras o rechupes por control topográfico de la superficie de la pieza.
- Lectores de códigos y herramientas OCR para detección de textos o etiquetas en piezas.
- Control de posicionamiento de la pieza, por si se requiere de un posterior ensamblaje
- Control preciso del barrido 3D del perfil de la pieza a verificar mediante pieza patrón proveniente de un archivo CAD.





Arriba izda.: Sensor topográfico para detectar defectos superficiales. Arriba dcha.: Lector de todo tipo de códigos (código de barras, QR, texto, etc). Abajo izda.: Sensor para medición de perfiles. Abajo dcha.: Sensor de posicionamiento para sobreinyectar.



También existen sensores cuyas funciones es la de controlar la seguridad de los operarios en procesos de mantenimiento o para que no haya averías ni paradas no productivas mientras se está realizando el proceso productivo.



Izda.: Sensor que detecta si se ha quedado una pieza en alguna cavidad del molde. Dcha.: Sensor que detecta si hay alguien en el interior de la unidad de cierre del molde.

### 8. Habilitadores. Identificación de habilitadores y solicitud de ofertas de implementación.

A continuación, se indican algunos proveedores de sensores de presión y termopares que hemos solicitado para poder realizar la toma de datos requerida para el control del proceso en cada uno de los experimentales ejecutados en la planta piloto.

Proveedor	Productos	Contacto
	- Termopares	<a href="https://www.tcdirect.es/">https://www.tcdirect.es/</a>
	- Sensores de fuerza - Termopares - Sensores de deformación en barras - Sensor presión en fundido	<a href="http://www.gefran.com/es/es">http://www.gefran.com/es/es</a>
	- Sensor de presión en cavidad	<a href="https://www.kistler.com/es/">https://www.kistler.com/es/</a>

	- Termopares	<a href="http://www.coreterm.es/">http://www.coreterm.es/</a>
	- Sensores de visión artificial	<a href="https://www.keyence.com/">https://www.keyence.com/</a>
	- Sensores de visión artificial	<a href="http://www.bcnvision.es/">http://www.bcnvision.es/</a>
	- Sensores de seguridad - Sensores de posicionamiento	<a href="https://www.sick.com/es/es/">https://www.sick.com/es/es/</a>

- Termopares de TC Direct:

Codigo	Descripción	1 - 4	5 - 9	10 - 19
401-400	Tipo K - 76mm de longitud de rosca - 5mm extremo	€52,90	€50,50	€44,40
401-403	Tipo K - 76mm de longitud de rosca - rasante	€52,90	€50,50	€44,40
401-406	Tipo K - 152mm de longitud de rosca - 5mm extremo	€56,10	€53,70	€47,30
401-409	Tipo K - 152mm de longitud de rosca - rasante	€56,10	€53,70	€47,30
401-412	Tipo J - 76mm de longitud de rosca - 5mm extremo	€52,90	€50,50	€44,40
401-415	Tipo J - 76mm de longitud de rosca - rasante	€52,90	€50,50	€44,40
401-418	Tipo J - 152mm de longitud de rosca - 5mm extremo	€56,10	€53,70	€47,30
401-421	Tipo J - 152mm de longitud de rosca - rasante	€56,10	€53,70	€47,30



## Sonda para inyección de plástico

### SONDAS DE TEMPERATURA PARA INDUSTRIA DE INYECCIÓN DE PLÁSTICO.

*Sondas fabricadas a medida.*  
Sensor Termopar Tipo: "J", "K",  
RTD: Pt-100, Pt500, Pt-1000 etc.  
Longitud de Cable según petición del cliente



Ref:  
Precio: Contacte con nosotros para comprar este producto

Figura 61 - Termopares para moldes CORETERM

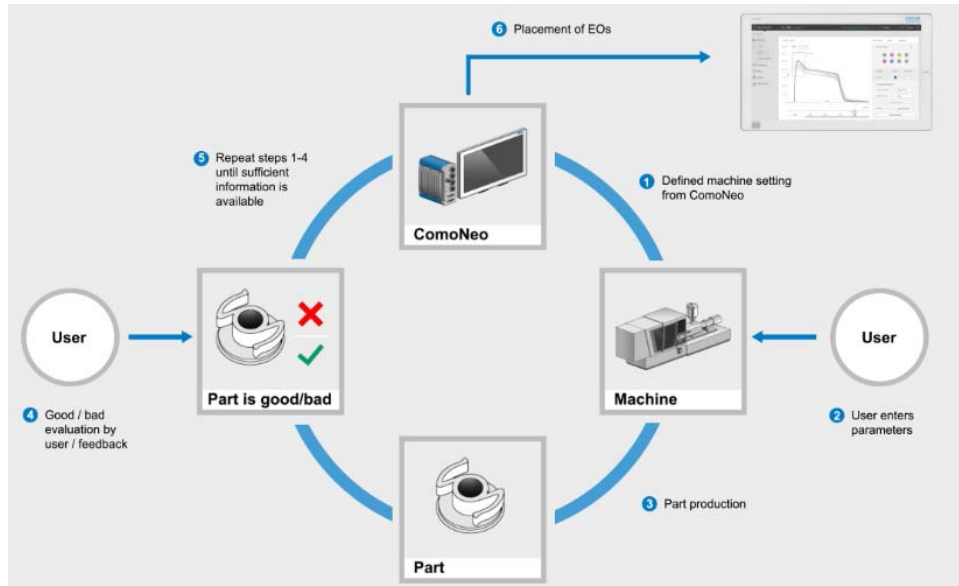


Figura 62 - Sensores de presión KISTLER

## Extrusión

### 1. Selección de prueba

Entre las diferentes tecnologías de extrusión en las que se pueden transformar materiales termoplásticos se han seleccionados dos tipos de tecnologías: a) Extrusión de film soplado; b) Extrusión de tubería.

#### a) Extrusión de film soplado

La extrusión de film soplado consiste en extruir un tubo de termoplástico para hincharlo con aire hasta varias veces su diámetro inicial, formando un producto tubular conocido como “globo”, el cual puede recogerse, una vez el material ya se ha enfriado, en forma de film doble.

El equipo consiste principalmente en cinco elementos:

- Extrusora
- Cabezal
- Unidad de enfriamiento y calibración
- Unidad de arrastre
- Bobinado

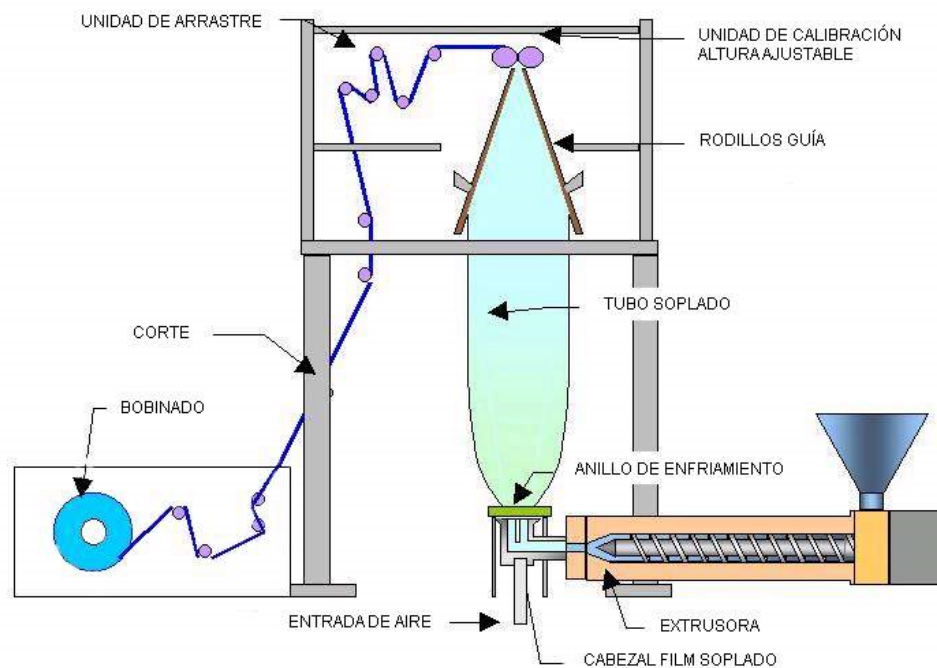


Figura 63. Esquema línea de extrusión de film soplado.

#### b) Extrusión de tubería y perfilaría

Este proceso se basa en hacer pasar el material a través de una boquilla que le dará forma de tubo, el cual es recogido por un calibrador y un carro de arrastre, que junto al sistema de refrigeración le confiere el diámetro y espesor definitivo.

En el proceso de extrusión de tuberías se obtiene tanto tubería rígida como tubería flexible. La principal diferencia en el procesado es que los tubos rígidos se cortan mientras que las tuberías flexibles se bobinan.

La Figura 64 muestra una línea de extrusión de tubería para tubería flexible.

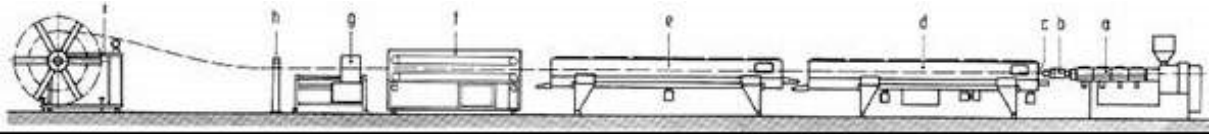


Figura 64. Componentes de una línea de extrusión de tubería flexible: a) extrusora monohusillo, b) cabezal, c) y d) calibración por vacío, e) unidad de enfriado, f), g) y h) recogida y bobinado

**2. MOTIVACIÓN. JUSTIFICAR DESDE EL PUNTO DE VISTA TÉCNICO Y DESDE EL PUNTO DE VISTA DE REQUERIMIENTOS DE MERCADO, LA ELECCIÓN DE LA PRUEBA A REALIZAR. PORQUE ES IMPORTANTE ESA PRUEBA SELECCIONADA.**

Según DIRCE e INE en España hay 4.586 empresas dedicadas al sector del plástico y caucho (con una facturación de 15.672.900 miles de €), de las cuales 926 están en la Comunidad Valenciana (facturación 2.128.615 miles de €).

**a) Prueba de extrusión de film soplado**

En el caso del proceso de extrusión de film soplado se ha seleccionado la extrusión de film a partir de polietileno de baja densidad (LDPE) mezclado con un 20% de un polietileno de baja densidad lineal (LLDPE). Los materiales seleccionados para realizar las pruebas han sido el LDPE 352 E de DOW con MFI de 2g/10 min y el LLDPE 118 W de Sabic con MFI de 1g/10 min. Estos materiales se utilizan habitualmente en el proceso de film soplado para posteriormente ser utilizados en la confección de bolsas.

Actualmente en España la fabricación de film de polietileno (con un espesor < 125µm) es de 490.178 toneladas (983.631 miles de euros). De esta producción, aproximadamente el 13.89% corresponde a la Comunidad Valenciana, ya que 68.114 toneladas de sacos y bolsas de polietileno (toneladas (129.252 miles de euros) se fabrican en esta región.

A continuación, se muestra un listado de empresas valencianas fabricantes de film soplado.

Empresa	Web
Plásticos Industriales de Alfarrasí (PICDA)	<a href="http://www.picda.com/">http://www.picda.com/</a>
MT Plastics (Smurfit Kappa)	<a href="http://www.smurfitkappa.com">http://www.smurfitkappa.com</a>
GAVIPLAS	<a href="http://www.gaviplas.es/">http://www.gaviplas.es/</a>
Plásticos Vidal	<a href="https://www.plasvisa.es/es/">https://www.plasvisa.es/es/</a>

**b) Extrusión de tubería**

Para realizar las pruebas de extrusión de tubería, se ha seleccionado el material ALCUDIA CN-122, de Respsol, que es un compuesto negro de LDPE. Este compuesto contiene antioxidante para protegerle de la degradación térmica que se produce, tanto en la extrusión, como en la exposición a la luz solar y además lleva un 2.2 % de negro de carbono bien disperso y finamente dividido, para evitar la acción degradante de la radiación UV del sol. Las características del material permiten su aplicación en agricultura donde se requiere una gran resistencia mecánica y al envejecimiento a la intemperie.

Este material es adecuado para la fabricación de cualquier tipo de tubo, y en especial se utiliza para las tuberías de micro-irrigación, que es el producto obtenido en este proyecto.

Según la ficha técnica, este material puede transformarse fácilmente en una línea de extrusión convencional de tubería cuando la temperatura de fundido esta alrededor de 200°C. En la siguiente tabla se muestra las condiciones de temperaturas recomendadas para extruir el material

Tabla 1. Perfil de temperaturas recomendado para procesar CN-122.

CILINDRO 4 ZONAS	CABEZAL 3 ZONAS	Tº FUNDIDO
De: 170/175/180/185°C A: 190/195/200/205°C	190/190/190 °C 210/210/210 °C	190 °C 210 °C

La selección de este material y esta prueba se ha realizado porque España es un país con una elevada producción de tuberías de microirrigación de polietileno. Aunque no existe en la base de datos la producción exacta de este producto en España o en la Comunidad Valenciana, sí que existen datos de las toneladas de tubos de PE rígidos que son fabricados a nivel nacional, siendo la producción aproximada de 144.132 toneladas (facturación 262.014 miles de euros). A nivel regional, la fabricación de tubos y mangueras es de 25.444 toneladas (75.040 miles de euros).

A continuación, se muestra un listado de empresas valencianas fabricantes de tuberías de polietileno de microirrigación.

Empresa	Web
Plastire	<a href="http://www.plastire.es/">http://www.plastire.es/</a>
Plásticos Ferrando	<a href="http://www.ferrando.net/">http://www.ferrando.net/</a>

### 3. EQUIPAMIENTO. DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPAMIENTO EMPLEADO.

A continuación, se describen las líneas de extrusión de planta piloto utilizadas en AIMPLAS para la ejecución de las pruebas con los materiales y el registro de parámetros de extrusión.

#### a) Extrusion de film soplado

Los films de polietileno LDPE se han obtenido en una línea de extrusión de film soplado que consta de:

- Extrusora monohusillo: con un D= 25mm y una relación L/D = 25, equipada con un husillo con una relación de compresión de 1:2.75.
- Cabezal anular de entrada lateral, con anillo de enfriamiento de doble labio.
- Sistema de calandrado con doble rodillo (metal-caucho).
- Sistema de recogida mediante bobinado.

En la figura 46 se muestra una foto de la línea de film soplado de planta piloto utilizada.



Línea de extrusión de film de planta piloto.



Anillo de enfriamiento de doble labio



Sistema de calandrado con doble rodillo (metal-caucho).



Sistema de recogida mediante bobinado.



Husillo

Figura 65. Fotos de equipamiento utilizado en línea extrusión film soplado.

**b) Extrusión de tubería y perfilaría**

Las tuberías de polietileno se han obtenido en una línea de extrusión de tubería de planta piloto que consta de:

- Extrusora monohusillo: con un  $D = 25\text{mm}$  y una relación  $L/D = 25$ , equipada con un husillo con una relación de compresión de 1:3.
- Cabezal central con patas de araña, con inserto regulable adecuado para la obtención de tubería de diámetro externo 16mm y espesor 0.4mm.
- Calibrador de manguera ranurado
- Baño de enfriamiento mediante rociado con agua
- Carro de arrastre

En la figura 47 se muestra una foto de la línea de film soplado de planta piloto utilizada.



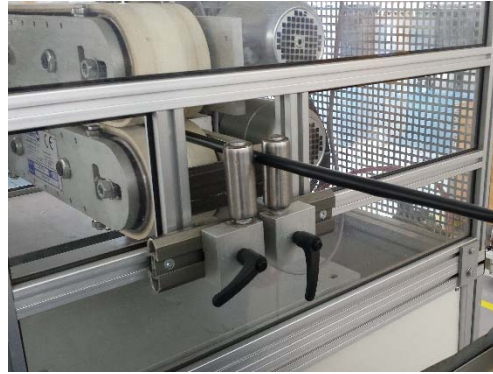
Línea de extrusión de tubería de planta piloto



Cabezal y entrada calibrador



Calibrador y baño de enfriamiento



Entrada tubería al carro de arrastre

Figura 66. Fotos de equipamiento utilizado en línea extrusión tubería.

#### 4. PARÁMETROS. DEFINICIÓN Y DESCRIPCIÓN DE PARÁMETROS DE CONTROL INICIALES. JUSTIFICACIÓN DE SU ELECCIÓN.

Algunos de los parámetros en ambos procesos son comunes (perfil de temperaturas, temperatura de fundido, presión de fundido, par motor) mientras que otros son característicos de cada tipo de tecnología: film soplado (velocidad de estirado del film, volumen de air enfriamiento del anillo de enfriamiento) y tubería (vacío unidad de calibración, velocidad de estirado de carro de arrastre).

Los **principales parámetros a controlar** en cualquier proceso de extrusión son:

- Perfil de temperaturas
- Velocidad del husillo (producción)
- Presión de fundido
- Par motor
- Temperatura de fundido

El registro y control de estos parámetros es fundamental en cualquier proceso de extrusión, y tanto **calidad de la producción** como las **propiedades finales del producto** se verán afectadas por variaciones en estos parámetros.

Estos parámetros se pueden clasificar en dos grupos: parámetros de entrada y parámetros de salida.

Parámetros de entrada al proceso: Son aquellos parámetros que necesita conocer la máquina para iniciar la extrusión. Determinan en qué condiciones se desea efectuar la prueba y condicionan sus resultados. Fundamentalmente son dos: las temperaturas de extrusión y la velocidad de extrusión.

Parámetros de respuesta del proceso: Los parámetros de respuesta del sistema dan idea de cómo los parámetros de entrada están afectando al proceso. La lectura de estos parámetros se efectúa mediante sensores convenientemente situados en la máquina. Los principales parámetros de respuesta son la temperatura del fundido, la presión del fundido y el par motor.

A continuación, se describen de forma separada cada uno de estos parámetros.

- **Temperaturas de extrusión:** Es el conjunto de temperaturas que se asignan a cada una de las zonas de la camisa para la calefacción del cilindro. También se denomina comúnmente perfil de temperaturas.  
En la Figura 67 se muestra un cilindro de calefacción en el que se pueden ver las distintas zonas de calefacción/refrigeración. Cada zona se compone de una resistencia, un elemento de refrigeración (aire o agua) y un termopar que permiten un control independiente.

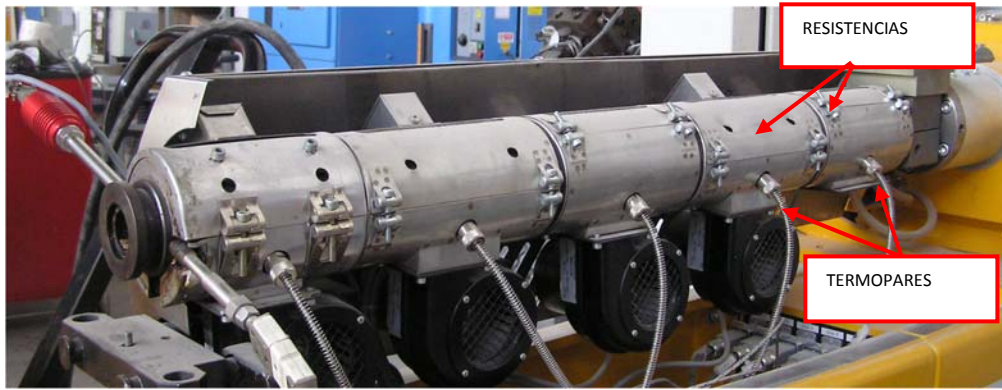


Figura 67. Bandas calefactoras a lo largo de la camisa en una extrusora.

La existencia de **zonas independientes** permite **programar el perfil de temperaturas** más adecuado para cada material, lo que determinará su temperatura de fundido.

Un perfil de temperatura típico se muestra en la figura 49. En este perfil la temperatura máxima se sitúa al final de la zona de homogeneización –transición del material, para asegurar que el material está completamente fundido antes de llegar a la zona de dosificación.

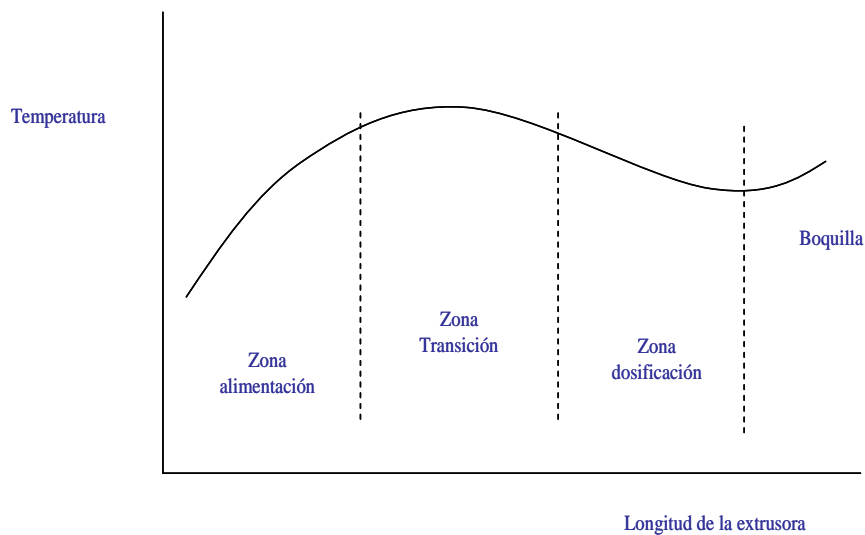


Figura 68. Perfil de temperaturas típico en un material plástico convencional.

- **Velocidad de extrusión:** Controla la velocidad de giro del husillo y por tanto el avance del material a lo largo del mismo, es decir, la **producción**. Según el principio de funcionamiento del tornillo de Arquímedes cuando aumenta la velocidad de giro del husillo aumenta la cantidad transportada por unidad de tiempo. En el caso de la extrusión para referirnos a esta capacidad de transporte se utiliza el término “producción”. Como se puede ver en la Figura 69 cuanto mayor es la velocidad de giro del husillo mayor es la producción del material en Kg/h.

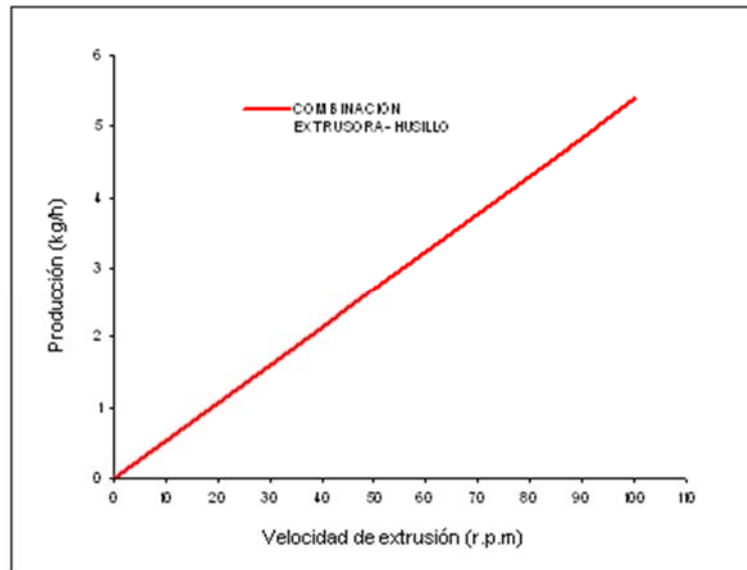


Figura 69. Relación entre la velocidad de giro de extrusión y la producción obtenida.

Considerando un mismo equipo, con un determinado perfil de temperaturas, con un mismo husillo y un mismo material a procesar, se puede decir que la variación de la velocidad de extrusión puede producir cambios en las características del material que afectarán a la **reproducibilidad del producto final**.

Cuanto **mayor es la velocidad de extrusión, mayor es el esfuerzo de cizalla** que sufre el material a causa de la fricción y **menor es el tiempo de residencia**.

La reducción del tiempo de residencia del material en el interior del cilindro implica que el tiempo del que dispone el material para recibir el calor que le hará plastificar también es menor. Según esto es posible que no se alcance la temperatura del fundido deseada para fluir con facilidad hacia la boquilla. Si esto sucede, la mayor viscosidad del plástico exigirá de mayores presiones para poder llenar la boquilla.

En idénticas condiciones de procesado, **los cambios de velocidad implican diferencias en el producto final como pueden ser espesores, cristalinidad y continuidad del flujo**.

Una disminución de velocidad implica un mayor tiempo de residencia en el interior del cilindro de calefacción. En este caso la temperatura del fundido podría aumentar por encima del valor que garantiza una buena fluidez, y dar lugar a un material de baja viscosidad que fluyera por la boquilla con poca presión, lo que provocaría fluctuaciones en el flujo. A causa de la alta temperatura del fundido se podrían tener problemas en la conformabilidad y el enfriamiento, del producto final, así como presencia de quemados y discontinuidades de flujo.

La temperatura y la velocidad son los principales parámetros del proceso. Cualquier modificación en alguna de ellas afecta en mayor o menor medida al resto de parámetros de respuesta ya que todos están íntimamente relacionados entre sí. Esta característica hace que el control y registro de todas las variables del proceso sea fundamental para obtener resultados reproducibles.

La variación de estos parámetros de entrada ocasiona cambios significativos:

- ✓ La velocidad del husillo varía el tiempo de residencia del material variando su viscosidad, y puede producir la degradación por fricción.

- ✓ Si el perfil de temperaturas aumenta, provocará una disminución de la viscosidad del material, un aumento en el grado de fusión, problemas de enfriamiento y requemados y dificultad de conformado.
- **Temperatura del fundido:** Es la temperatura que alcanza el material en la última zona del cilindro. Es la temperatura que alcanza el material al final de la zona de dosificación del husillo. Esta temperatura generalmente está comprendida entre las temperaturas de la boquilla y las últimas zonas de calefacción del cilindro.

Sobre este parámetro no actúa ningún sistema de control ya que se trata de una respuesta del proceso. La temperatura del fundido se mide mediante un sensor de temperatura que se aloja al final del cilindro de calefacción de modo que, al avanzar hacia la boquilla, el material plástico contacte directamente con la superficie metálica del sensor. La Figura 70 muestra una imagen de este tipo de sensores.

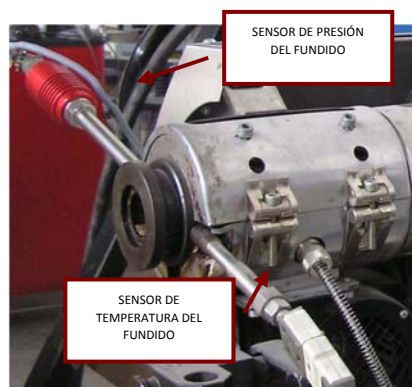


Figura 70. Sensor de temperatura para medir la temperatura del fundido.

- **Par motor:** Es el esfuerzo que realiza el motor para hacer girar el husillo cargado de material plástico.
- Este parámetro da idea del **esfuerzo que realiza el motor para hacer girar el husillo** y que se efectúe el transporte del material plástico desde la zona de alimentación hasta la entrada en el cabezal. Al igual que sucedía con la presión del fundido, la extrusora también dispone de un dispositivo de alarma que detiene el funcionamiento de la máquina cuando se alcanza un valor límite.
- **Presión del fundido:** Es la presión que ejerce el material fundido sobre la superficie interna del cilindro. Normalmente se suele medir en la última zona del cilindro.

Es la presión que ejerce el material fundido sobre la superficie interna del cilindro. Atendiendo al diseño del husillo la zona donde mayores presiones se alcanzan es la zona próxima a la punta del husillo. De ahí que cuando la presión del fundido se mide en el extremo del cilindro, la presión se conozca como presión en punta. Algunos fabricantes permiten tomar lectura de presión en alguna zona más. Por seguridad, la extrusora cuenta con un dispositivo de alarma que detiene el funcionamiento de la máquina cuando se alcanza un valor límite establecido por el fabricante.

Durante el proceso de extrusión, si una vez alcanzado el estado estacionario se observan variaciones en el par motor o en la presión en punta, esto puede ser debido a:

- ✓ Variaciones de viscosidad del material, material mal homogeneizado, contaminación del material, material húmedo.

- ✓ Problemas de funcionamiento del sistema de calefacción y refrigeración. Es posible que alguna resistencia calefactora no funcione correctamente y esté calentando en exceso o en defecto. También un problema en el sistema de refrigeración podría ocasionar aumentos de presión y de par. Como ya se ha explicado, cualquier cambio en la temperatura de trabajo del material modifica su viscosidad, y cuanto más viscoso es un material más esfuerzo cuesta procesarlo: Se necesita más energía para desplazarlo hacia la boquilla y más presión para llenarla.
- ✓ Mala dosificación del material, si la entrada del material a la extrusora no es constante, no es posible alcanzar un estado estacionario por lo que el husillo tendrá que transportar y fundir diferentes cantidades de material variando de esta manera el par motor y la presión en punta.

Se muestra una lectura en continuo de las variables de entrada (temperatura, y velocidad) y la variable de respuesta (par motor)

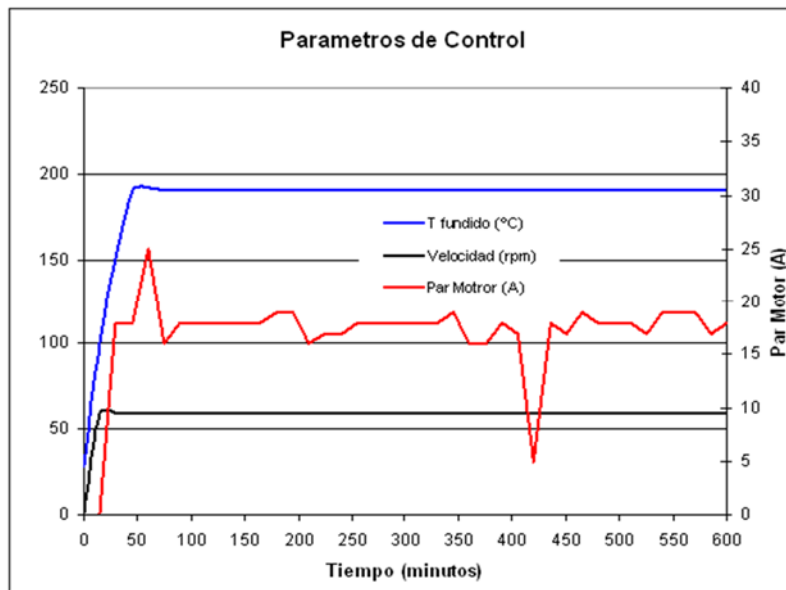


Figura 71. Cambios significativos al variar los parámetros de entrada.

A continuación, se presentan los parámetros de entrada y de salida registrados durante las pruebas de extrusión de film soplado y de tubería.

**a) Extrusión de film soplado**

En la Tabla 2 se indican todos los parámetros de procesamiento registrados durante las pruebas de extrusión del LDPE de DOW con 20% del LLDPE de Sabic. Se indican tanto los parámetros de la extrusora como las variables manejadas desde la línea de enfriamiento y estirado.

Tabla 2. Parámetros de entrada y de salida optimizados del proceso de extrusión de film soplado.

	Temperatura (°C)					Tfundido (°C)	Velocidad (rpm)	Presión (bar)	Par motor (A)	Velocidad de estirado	Enfriamiento (%)
	T1	T2	T3	T4	Cabezal						
Test 1	170	180	185	190	190	169	50	91	2.6	4.1	52

## b) Extrusión de tubería

En la Tabla 3 Tabla 2 se indican todos los parámetros de procesado registrados durante las pruebas de extrusión del LDPE de Repsol. Se indican tanto los parámetros de la extrusora como las variables manejadas desde el baño de calibración-enfriamiento y del carro de arrastre.

Tabla 3. Parámetros de entrada y de salida del proceso de extrusión de tubería.

	Temperatura (°C)					Tfundido (°C)	Velocidad (rpm)	Presión (bar)	Par motor (A)	Vacio unidad calibración (bar)	Velocidad estirado (%max)
	T1	T2	T3	T4	Cabezal						
Prueba 1	160	180	200	210	200	202	20	112	2,3	-0,20	0,6
Prueba 2	160	180	200	210	200	203	35	138	2,7	-0,20	0,85

Nota: en las condiciones de la prueba 2 se incrementa la velocidad de extrusión y la de estirado para aumentar el acabado superficial de las tuberías.

### Control del proceso

El objetivo que persigue el control del proceso de extrusión es que dicho proceso tenga el comportamiento deseado. Generalmente este comportamiento deseado viene descrito mediante una serie de objetivos:

- Especificaciones del producto
- Restricciones de seguridad y protección

Un sistema de control está definido como un conjunto de componentes que pueden regular su propio comportamiento o el de otro sistema con el fin de lograr un funcionamiento predeterminado.

En el cualquier proceso a controlar se distinguen las siguientes variables:

- Variables controladas: Describen el comportamiento del proceso y son las que se pretende controlar.
- Variables manipuladas: Son variables sobre las que se puede actuar para influir en las variables controladas.
- Perturbaciones: Son variables que influyen en las variables controladas y sobre las que no se puede actuar.

El controlador o regulador se encarga de tomar las decisiones de cómo actuar sobre la variable manipulada para que la variable controlada cumpla con las especificaciones deseadas.

Los controladores pretenden en la medida de lo posible:

- Eliminar o disminuir el efecto que las posibles perturbaciones puedan tener sobre la variable controlada
- Eliminar o disminuir el efecto de variaciones de los parámetros del proceso sobre la variable controlada.

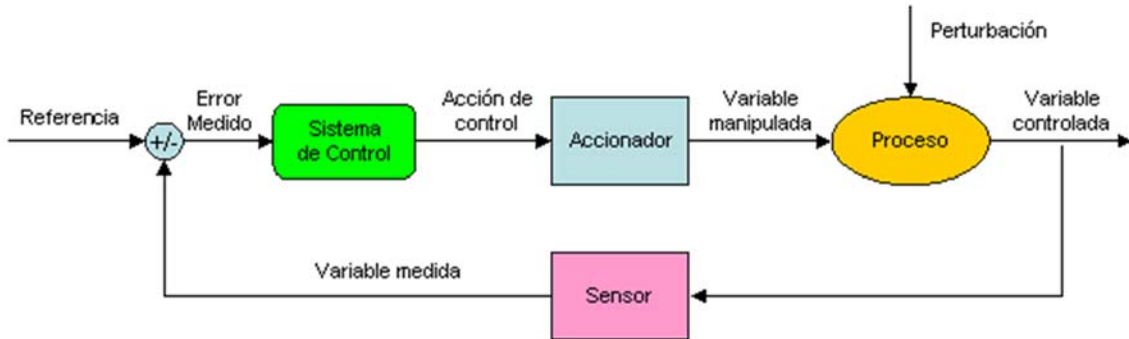


Figura 72. Esquema de un proceso de control de bucle cerrado.

Como se ha comentado anteriormente, las variaciones de presión o de par motor durante un proceso de extrusión nos pueden indicar variaciones en la viscosidad del material, problemas en el sistema de calentamiento o dosificación del material, etc. Por ello el registro de estas variables serán de ayuda para controlar la calidad del proceso y del producto acabado. **Se mide la presión para verificar la estabilidad del material extruido.** Cambios presión fundido del 1% pueden generar un 3% de variación en la producción.

El control de la presión en fundido es fundamental por lo siguiente:

- Para mantener la **estabilidad dimensional** de los productos según sus especificaciones de **calidad y tolerancias** determinadas, es necesario mantener la **producción** y las características del **fundido constantes**.
- Si **alimentación, temperatura y presión** de fundido constantes, la **producción** se puede considerar constante.
- Los cambios de presión pueden indicar problemas en el **filtro**, en la **calefacción, desgastes**, problemas de **alimentación** y de **par motor** de máquina.

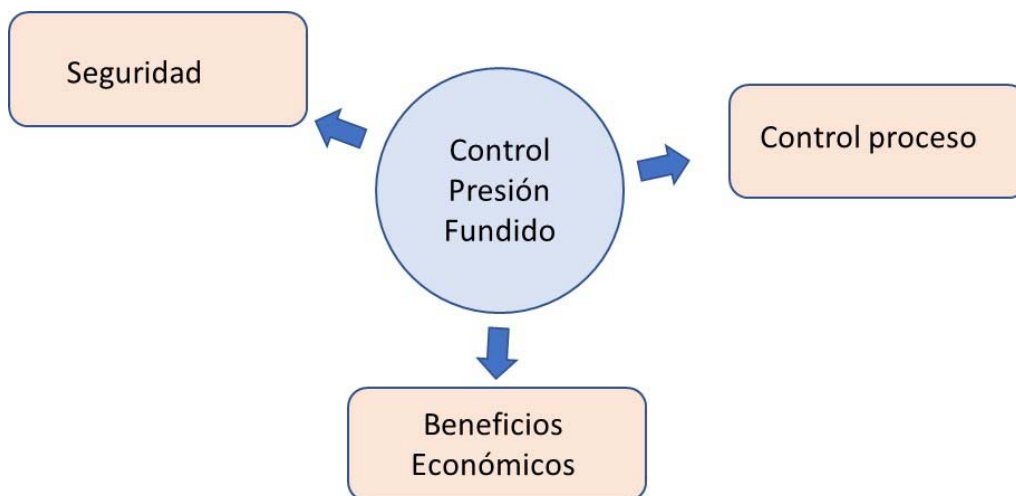


Figura 73. Razones para controlar la presión en fundido.

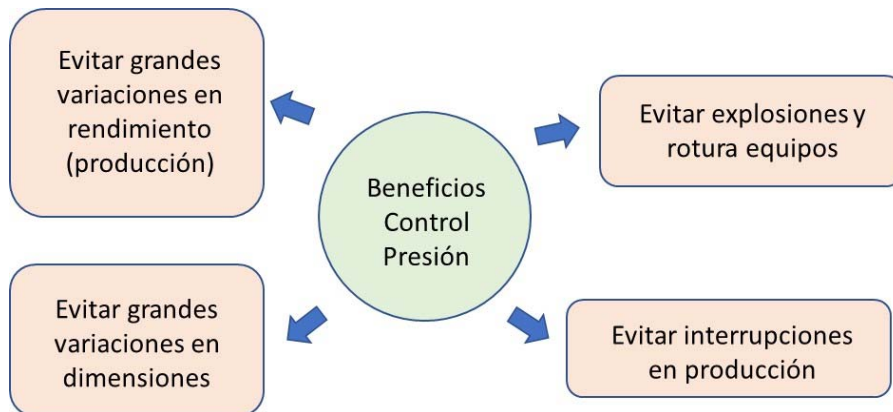


Figura 74. Beneficios del control de la presión en fundido.

En las siguientes gráficas se puede observar como al variar la presión con el tiempo se ven afectadas la producción y las dimensiones del producto.

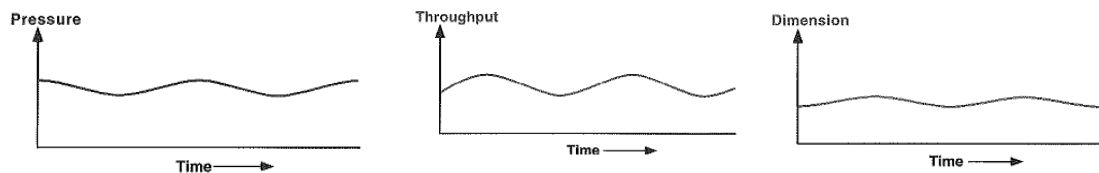
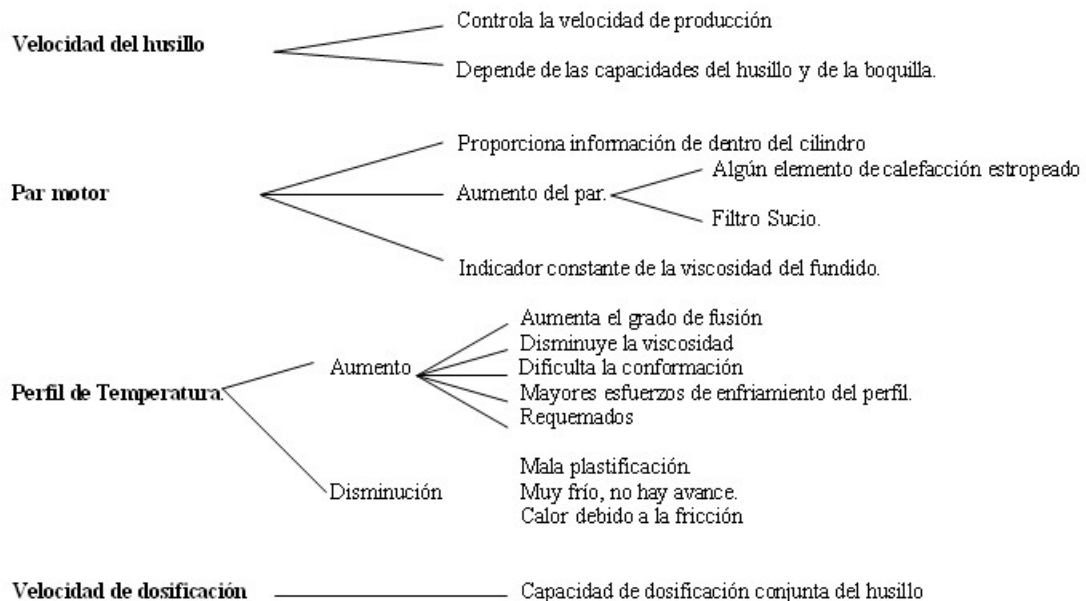


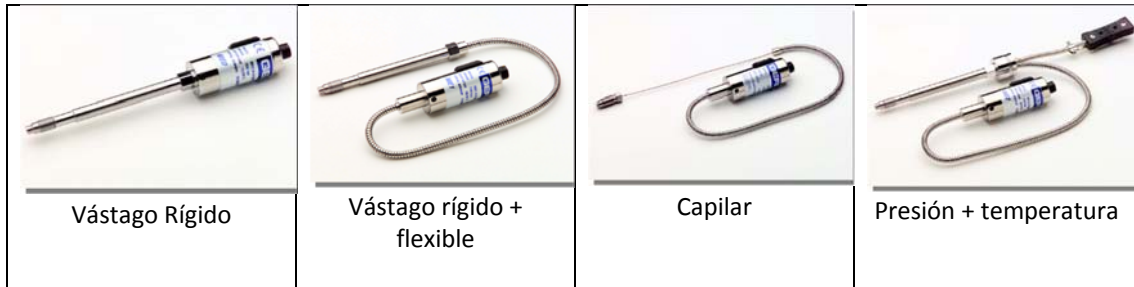
Figura 75. Ejemplo de fluctuaciones de la presión, producción y dimensiones con el tiempo.

**cccccc**



**Tipos de sensores**

A continuación, se indican diferentes tipos de sensores utilizada en extrusoras monohusillo.



Los dos parámetros esenciales a controlar en el proceso de extrusión son la temperatura y la presión. A continuación, se indican diferentes tipos de sensores que se pueden utilizar en extrusoras, siendo los termopares de **tipo-J** los más utilizados, y los de **Tipo-K** para rangos de temperaturas más altos.

Tabla 4. Tipos de termopares.

Tipo	Alcance Temperatura °C	Materiales y Aleaciones (+) Vs. (-)
<b>Metal - Base</b>		
E	-270 a 1 000	níquel - cromo Vs. cobre - níquel
J	-210 a 1 200	hierro Vs. cobre - níquel
T	-270 a 400	cobre Vs. cobre - níquel
K	-270 a 1 372	níquel - cromo Vs. níquel - aluminio
N	-270 a 1 300	níquel - cromo - silicio Vs. níquel - silicio - magnesio
<b>Metal - Noble</b>		
R	-50 a 1 768	platino - 13 % rodio Vs. platino
S	-50 a 1 768	platino - 10 % rodio Vs. platino
B	0 a 1 820	platino - 30 % rodio Vs. platino - 6 % rodio

Tipos de sensores para medición de presión.

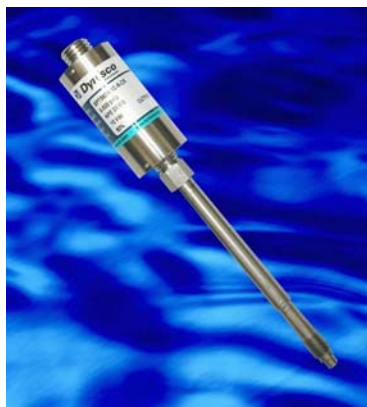


Figura 76. Sensor de presión.

Este tipo de sensores van conectados al final de la extrusora para medir la presión y la temperatura en fundido en la punta de la extrusora. Las extrusoras más modernas incorporan su panel de control en el que además de mostrar el perfil de temperaturas y la velocidad de extrusión indican en todo momento los parámetros de respuesta (presión en fundido, temperatura en fundido y par motor). En algunos casos

donde el equipo no tiene este panel de control, o bien se desean incorporar controles adicionales en la línea, se puede utilizar un kit de extrusión con pantalla que registra los valores de temperatura y/o presión en línea durante el proceso.

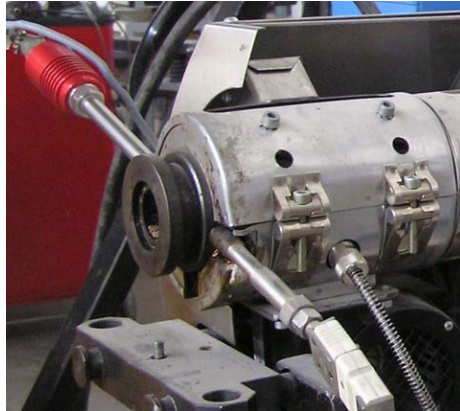


Figura 77. Colocación de sensor de temperatura y presión al final de la extrusora.



Figura 78. Kits de extrusión.

## 5. DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTAL.

Durante la realización de la parte experimental, se ha empleado un equipamiento para la recogida de datos correspondientes con los parámetros de procesado, asociado a un software para la visualización y almacenamiento de estos datos. El software utilizado es el Visual Fecon, de Feller engineering<sup>16</sup> (figura 60).

El software tiene un diseño modular, con disponibilidad de varias etapas de extensión por grupos de funciones y por la cantidad de dispositivos conectados. El software se puede escalar y adaptar a los requisitos individuales.

<sup>16</sup> <https://www.fellereng.de/en/produkte/process-visualisation/>



Figura 79. Visual Fecon

El software permite la visualización de los datos por zonas (figura 61), como en el panel de mandos de las máquinas de extrusión, o en forma de gráfica (figura 62), en la que es posible observar la evolución de los valores medidos durante el tiempo de duración de la experimental.



Figura 80. Visualización de los parámetros por zonas.



Figura 81. Visualización de los parametros en forma de gráfica.

Las funciones más importantes del software incluyen:

- Evaluación de los datos registrados en forma de curvas de tendencia
- Registro de datos de todos los valores relacionados con el proceso en el disco duro
- Funciones estadísticas como mínimo / máximo / valor medio, desviación estándar en un segmento de tiempo seleccionable
- Cómoda administración de listas de fallas con función de exportación
- Configuración de todos los dispositivos conectados en lenguaje simple
- Temporizador integrado para la activación de acciones controlada por tiempo
- Detección automática de errores de cableado durante la puesta en marcha.
- Servidor OPC para el intercambio de datos con un sistema de control de nivel superior

Los valores registrados en el Fecon pueden exportarse fácilmente a un formato compatible con Excel para poder hacer representaciones graficas de los parámetros deseados.

En la figura 63 se muestra un ejemplo de la representación gráfica de los parámetros recogidos y exportados a formato Excel.

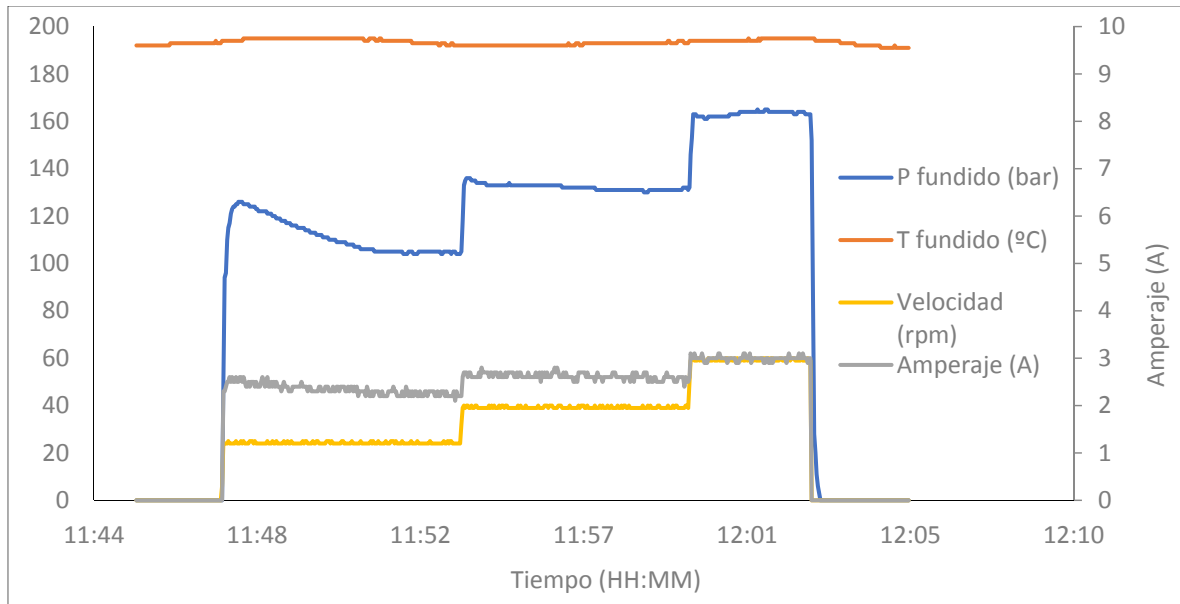


Figura 82. Ejemplo de representación gráfica de los datos exportados.

En la gráfica de la figura 63 se ha representado los parámetros de entrada (velocidad de extrusión) y de respuesta del proceso de extrusión (par motor, presión en fundido, temperatura del fundido) más característicos.

Se puede observar una variación en la velocidad de extrusión, y como afecta a los otros parámetros de presión y de par motor. Al aumentar dicha velocidad, se observa un incremento de la presión y del amperaje.

Se ha empleado este equipamiento de recogida de datos y software asociado para recoger los datos de la experimental descrita en el apartado 4.

Se ha recogido digitalmente los parámetros de cada uno de los procesos de extrusión de film soplado y de tubería, tanto los parámetros de entrada como los de respuesta.

A partir de este software, se pueden visualizar estos parámetros durante el tiempo de duración de la experimental, en forma de gráfica. Además, estos valores pueden exportarse fácilmente a un formato compatible con Excel para poder hacer representaciones gráficas de los parámetros deseados.

Los valores registrados para la extrusión de film soplado de LDPE más representativos se muestran en la gráfica de la figura 64

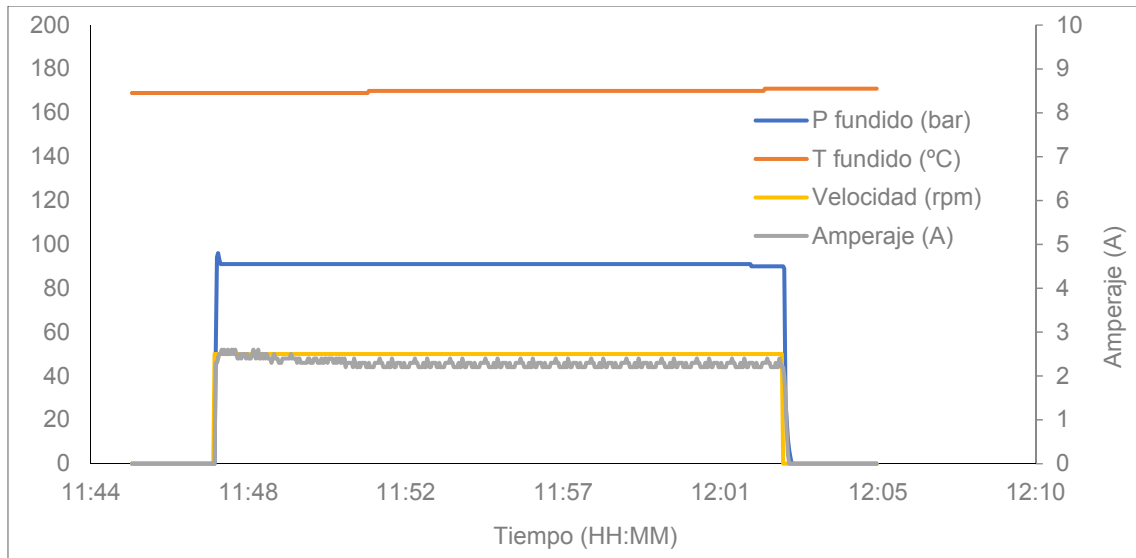


Figura 83. Parámetros representativos del proceso de extrusión de la mezcla de LDPE+LLDPE para la obtención de film soplado

Se ha seguido el mismo procedimiento de recogida de datos para obtener los parámetros relacionados con la extrusión de tubería de LDPE. La grafica resumen se muestra en la figura 65.

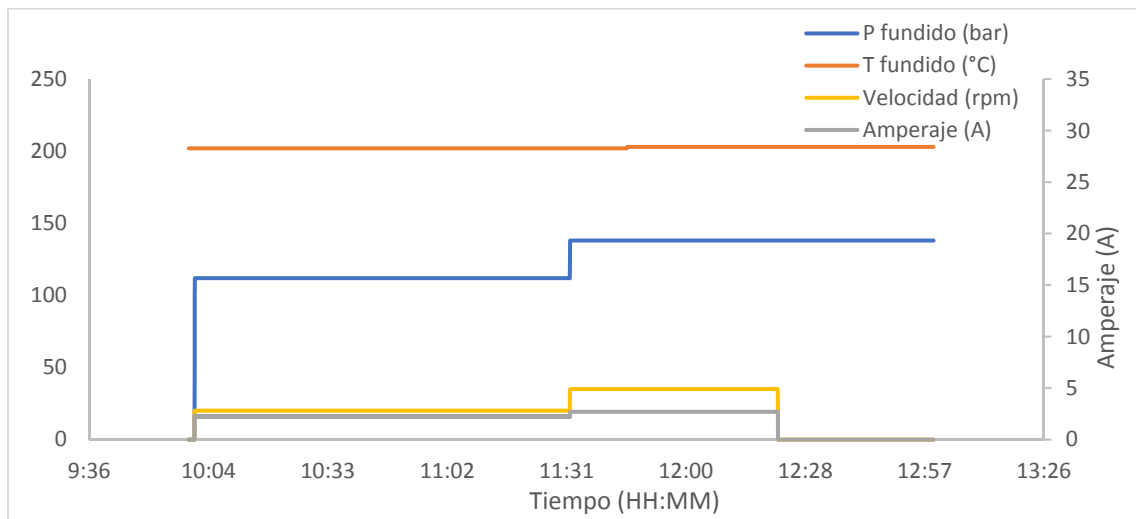


Figura 84. Parámetros representativos del proceso de extrusión de tubería de LDPE

Según los parámetros representados gráficamente, podemos asegurar la gran estabilidad de ambos procesos.

**6. DETERMINACIÓN DE PRODUCTO/MATERIAL ÓPTIMO (CRITERIOS EMPLEADOS O SISTEMÁTICA DE CONTROL PARA VERIFICAR CALIDAD DEL MATERIAL O PRODUCTO).**

Durante el proceso de extrusión se pueden registrar los siguientes **problemas o inestabilidades**:

- Alimentación no uniforme del material.
- Problemas fusión/solidificación del material en la zona de alimentación.
- Variaciones en el calentamiento del cilindro.
- Variaciones en la producción.
- Variaciones en velocidad husillo (rpm).
- Variaciones en presión en punta.
- Variaciones en temperatura fundido.
- Insuficiente fundido o mezclado.
- Insuficiente presión generada.
- Desgaste en husillo o cilindro.
- Rotura del fundido o piel de tiburón.
- Defectos en producto acabado.

La digitalización y almacenamiento de los parámetros más representativos del proceso de fabricación permite disponer de un histórico de datos por cada referencia de producto a fabricar. Este almacenamiento de datos asegura la repetibilidad del proceso y por tanto la calidad del producto.

Los arranques de máquina, ajustes y puestas en marcha son mucho más rápidos si se tienen disponibles los parámetros optimizados. De esta forma se consigue obtener un producto de calidad reduciendo los desperdicios de materia prima y contribuyendo al ahorro de costes, de tiempos y por supuesto, a la sostenibilidad.

A partir de las gráficas obtenidas en la recogida de datos se puede detectar problemas durante el procesado que puedan afectar al producto, por ejemplo, si se observa una disminución del par motor o de la presión, es posible que haya un problema en la alimentación del material que afectará a las dimensiones del producto.

Además, es posible utilizar estas herramientas de control para evaluar el desgaste en los equipos. Si con el tiempo se ve una disminución en el valor de presión al reproducir un determinado proceso, es un síntoma de que el husillo está empezando a desgastarse. Si se detecta a tiempo es posible repararlo. En cambio, si no se repara a tiempo, para alcanzar la presión necesaria para obtener un producto de calidad habrá que aumentar la producción acelerando a su vez el desgaste del husillo, hasta que finalmente tendrá que ser sustituido por otro al no cumplir con su función.

En resumen, disponer de herramientas de control del proceso y su digitalización para almacenamiento y análisis proporciona una serie de ventajas:

- Evaluación del desgaste.
- Detección de defectos desde el procesado.
- Seguridad en máquina.
- Ahorro de costes.
- Incremento productividad.
- Mejora reproducibilidad.
- Incremento de la eficiencia.
- Racionalización del consumo de energía.
- Reducción de desperdicios.
- Reducción de tiempos perdidos.
- Calificación y educación de la mano de obra.

## **7. MEJORAS PROPUESTAS PARA EL PROCESO PROBADO, ASOCIADAS A INCORPORACIÓN DE SENSORES, MONITORIZACIÓN, MEDIDAS ONLINE, VISIÓN ARTIFICIAL, ETC.**

En las pruebas realizadas en AIMPLAS a nivel de planta piloto comentadas en los apartados anteriores, se han registrado los parámetros básicos del proceso (perfil de temperaturas, velocidad de extrusión, temperatura de fundido, presión y par motor), almacenando todos estos datos con un software asociado que permite el análisis y la representación de estos en gráficas.

Sin embargo, el control de estos procesos de extrusión en planta piloto puede mejorarse con sensores adicionales para adaptarse a la industria 4.0:

- Mejoras con sensores automáticos de medición de espesores en film
- Mejoras con sensores automáticos para el control dimensional de tuberías (espesores, diámetro, ovalidad).
- Bombas de engranajes para estabilizar los flujos de material, especialmente cuando se mezclan materiales vírgenes con recuperados/reciclados, que pueden ocasionar variaciones de la presión y del caudal.
- Reómetro in-line u on-line: para medir la viscosidad del material extruido durante el mismo proceso. El equipo puede estar en línea con la extrusora o de forma paralela, es decir, el material puede ser medido en la misma línea de la extrusora y el material no sale de la extrusora (in línea) o bien el material medido sale del flujo de la extrusora es medido en un equipo paralelo a la extrusora y la porción de material medido es eliminado o no incorporado de nuevo al flujo de la extrusora.
- Equipos de control visual e inspección superficial: para visualizar defectos en la superficie de los productos extruidos tales como rayas, infundidos, partículas extrañas.
- Control de recubrimientos o de laminaciones de films: para controlar la temperatura de sustratos antes de un proceso de coating o laminación, o para controlar el espesor del coating.

### **Bomba de engranaje:**

El uso de una bomba de engranaje en cualquier línea de extrusión supone una serie de ventajas:

- Mejora estabilidad del fundido y la calidad del producto extruido.
- Presión de descarga de la bomba constante independientemente de la presión de entrada.
- Posibilidad de trabajar a presiones más bajas, velocidades más bajas y por lo tanto menores temperaturas. Reducción degradación térmica.

La bomba de engranaje aumenta la presión de entrada del material fundido en el cabezal (La diferencia de presión entre la entrada y la salida puede ser de hasta 275 bares), y mantiene esa presión y el flujo constante para que la producción del material sea estable. Esto posibilita la incorporación de materiales reciclados en altos contenidos, que de lo contrario desestabilizarían el flujo y la producción.



Figura 85. Foto de bomba de engranaje.

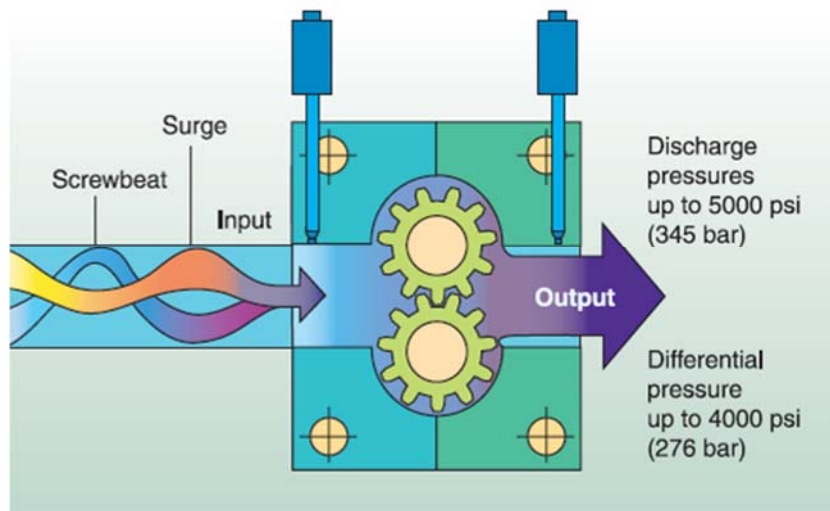


Figura 86. Esquema del flujo en interior de bomba de engranaje.

La Figura 87 representa el perfil de presión registrado en una línea de extrusión en varias situaciones:

- Sin plato rompedor: en este caso existe una gran fluctuación de la presión en el tiempo.
- Con plato rompedor: se reducen las fluctuaciones de la presión, pero todavía puede existir una pequeña variación con el tiempo dependiendo de la formulación.
- Con bomba de engranaje: la presión de fundido se mantiene estable a lo largo del tiempo.

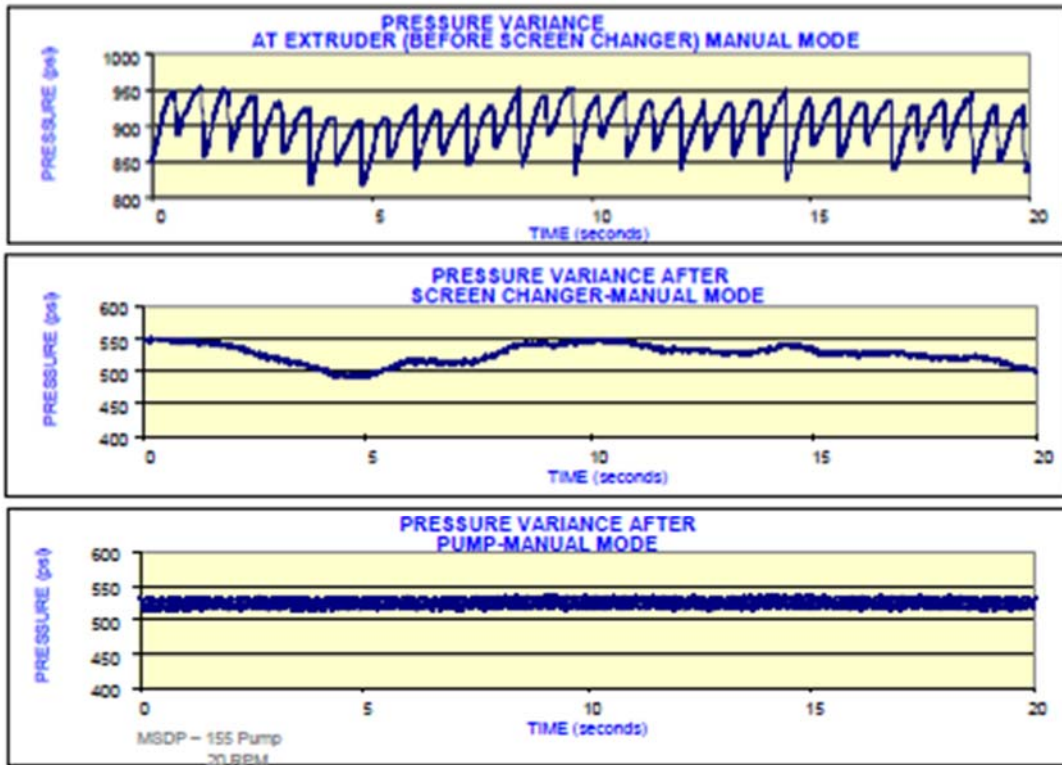


Figura 87. Comparativa perfiles de presión en fundido en línea con y sin bomba de engranaje.

La estabilidad en la presión equivale a una estabilidad en el proceso, que se traduce en una uniformidad en el espesor del producto.



En la figura 69 se observa como el espesor de un producto extruido, habitualmente 2-3% variación, puede reducirse hasta un 1% de variación en la dirección de extrusión.

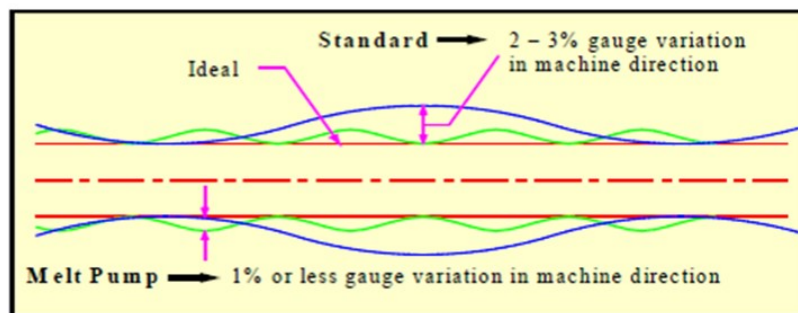


Figura 88. Variación del perfil de espesores.

En caso de utilizar una bomba de engranaje, esta se colocaría entre la extrusora y el cabezal. Como se indica en el siguiente esquema, los filtros y los sistemas para cambiarlos estarían colocados antes de la bomba de engranaje, por lo que el flujo que se transporta a través de la bomba de engranaje está filtrado.

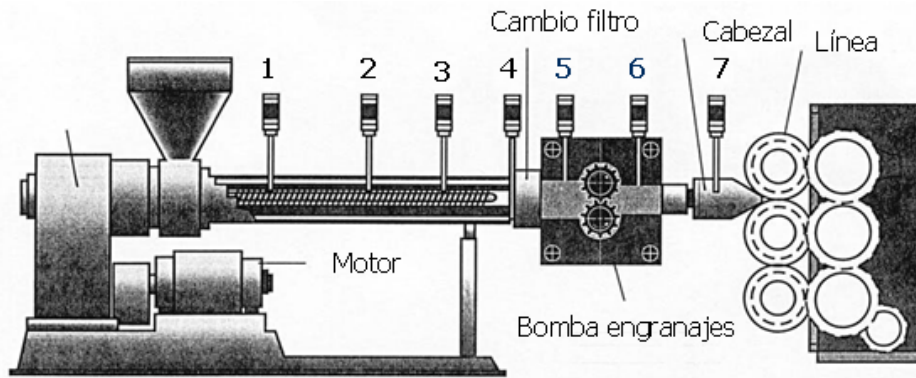


Figura 89. Esquema montaje de línea de extrusión con bomba de engranaje.

**Inspección de film**

Dr. Schenk ([www.drschenk.com](http://www.drschenk.com)) comercializa diferentes equipos para controlar la calidad en la producción de films extruidos. Estos equipos son equipos ópticos de inspección de films para detectar defectos o monitorizar determinadas propiedades.

Ventajas de Inspección Óptica	Reducción en coste converting	Comprobar calidad in-line antes de etapas posteriores de tratamiento film
	Incremento producción	Monitoreo continuo de material
	Funcionalidad consistente	24 h/día + 7 días/semana
	Retorno Inversión < 2 años	Basado en experiencia clientes, depende de varios factores

A continuación, se indican las funciones de los principales equipos EasyInspect y EasyMeasure de la empresa Dr. Schenk.

Nombre equipo	Función	Ejemplos de medición/detección
<b>EasMeasure</b>	Detección de defectos	Inclusiones Agujeros (pinole) Ojos de pez Geles, infundidos Discontinuidades en coating Burbujas Rayas
<b>EasMeasure</b>	Monitoreo de propiedades	Espesor material Reflectividad, brillo Espesor coating Transparencia Superficie (opacidad)

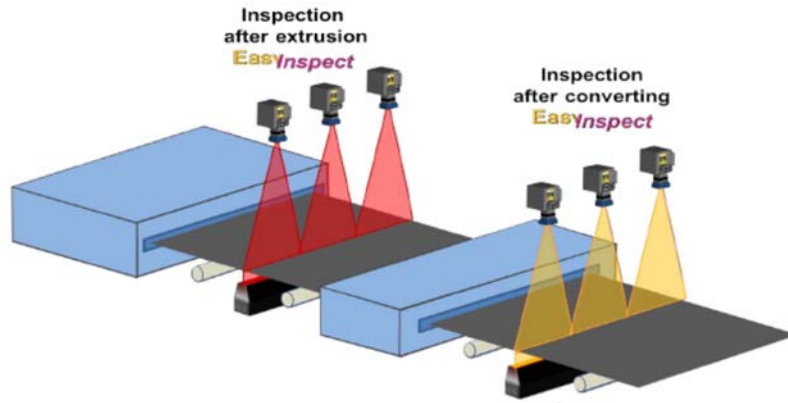


Figura 90. Esquema montaje de sensores de inspección en línea de extrusión de lámina/film.

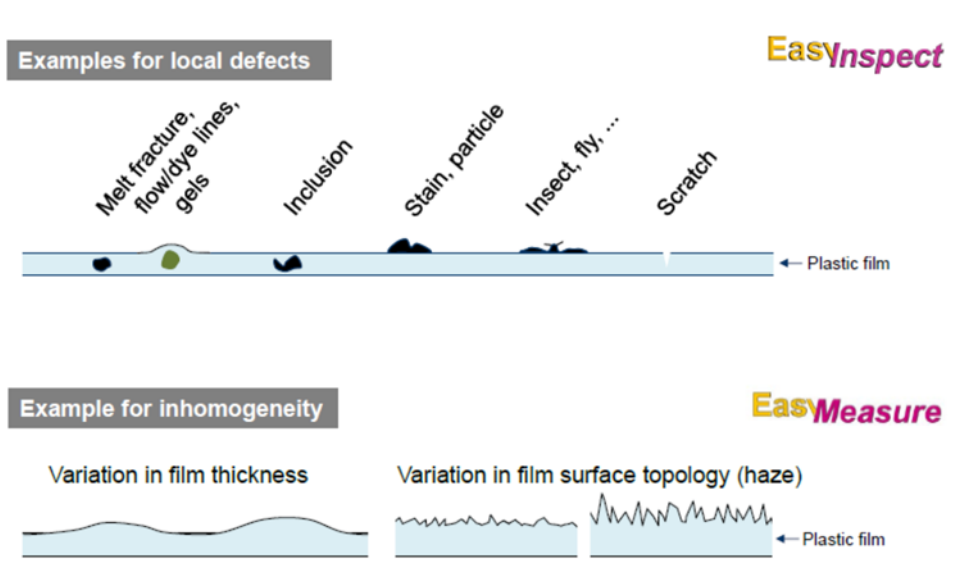


Figura 91. Ejemplos de mediciones por equipos de inspección film

Estos sistemas utilizan cámaras con distintos tipos de iluminación y van equipados con detectores de luz transmitida o reflejada. En la siguiente figura se muestran fotos que se registran para defectos como burbujas, deformación de superficie o partículas de suciedad, y se diferencia el aspecto observado según el tipo de iluminación utilizada.

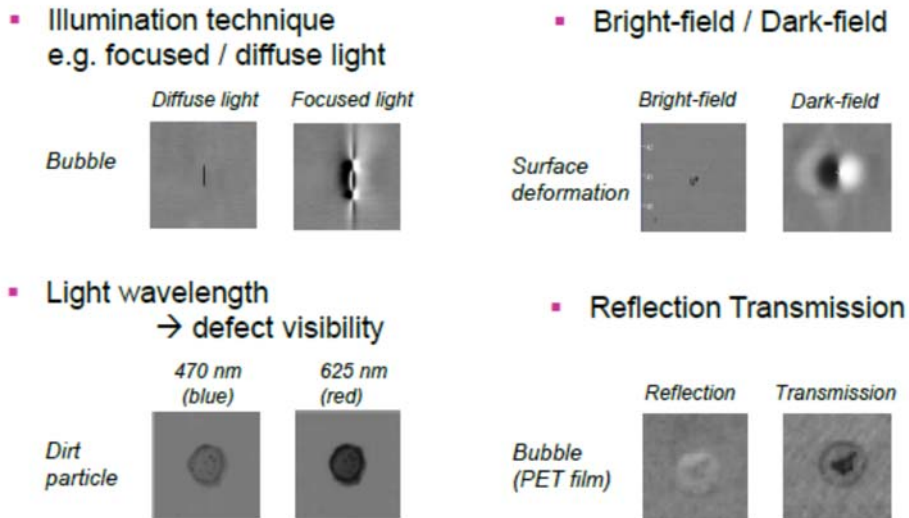
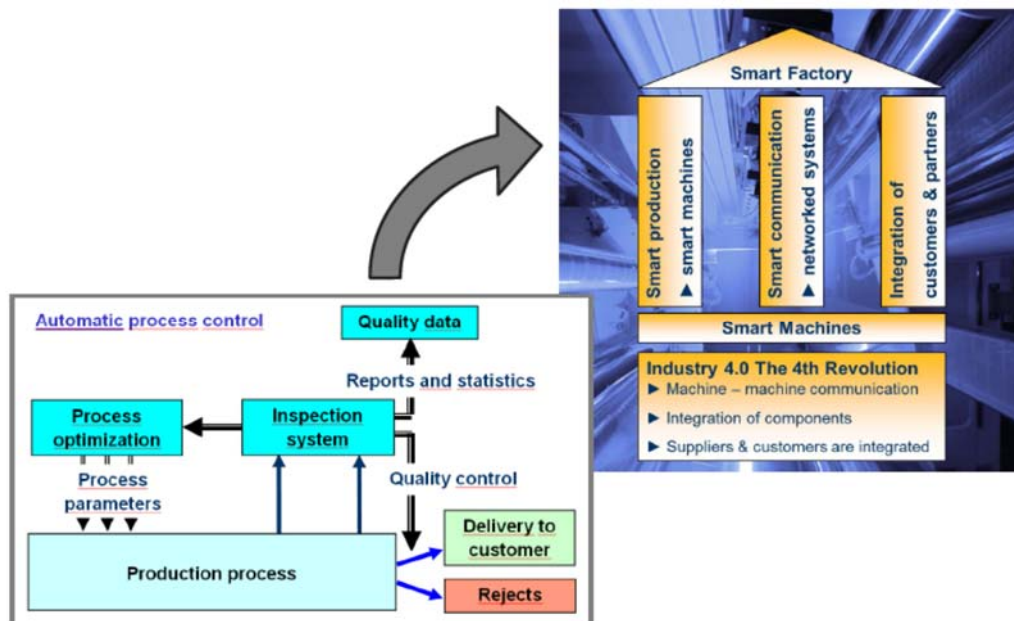


Figura 92. Observación de defectos según tipo de iluminación y tipo de detector.

Estos sistemas ópticos pueden considerarse como equipamiento inteligente dentro del sector de transformación de empresas de extrusión. Para las empresas que producen film con altas prestaciones, y que quieren un producto de alta calidad, supondría introducirse en el sector de la Industria 4.0 con proceso de control de calidad automático en que se registra la producción, clasificando el film adecuado para ser entregado al cliente y el que se rechaza por la presencia de defectos, evitando reclamaciones del cliente, y pérdidas económicas para la empresa.



**Reómetro on line**

El reómetro on line es un equipo que es capaz de medir la viscosidad del material procesado durante el proceso de extrusión. Cuando se quiere determinar la viscosidad (o curva reológica de un material) la granza de caracteriza en un reómetro de laboratorio, un equipo off line, que determina la viscosidad a partir del esfuerzo de cizalla y de la velocidad de cizalla, según las siguientes ecuaciones.

**CÁLCULO VISCOSIDAD**

**Viscosidad**

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \text{ (Pa.s)}$$

Viscosidad = Esfuerzo cizalla / Velocidad cizalla

**Esfuerzo cortante**

$$\text{Esfuerzo cizalla} = \frac{R \cdot \Delta P}{2 L} \text{ (Pa)}$$

Donde  $\Delta P$  (Pa) es la caída de presión a lo largo de un capilar con longitud  $L$  (m) y radio  $R$  (m)

**Velocidad cizalla**

$$\text{Velocidad cizalla} = \frac{4 Q}{\pi R^3} \text{ (s}^{-1}\text{)}$$

Donde  $Q$  (m<sup>3</sup>/s) es el caudal volumétrico y  $R$  (m) el radio del capilar

El cálculo de la viscosidad puede realizarse en continuo cuando el flujo en el interior de la extrusora atraviesa un capilar con geometría conocida (longitud, diámetro) y se puede registrar la caída de presión en su interior a través de sensores de presión correctamente ubicados.

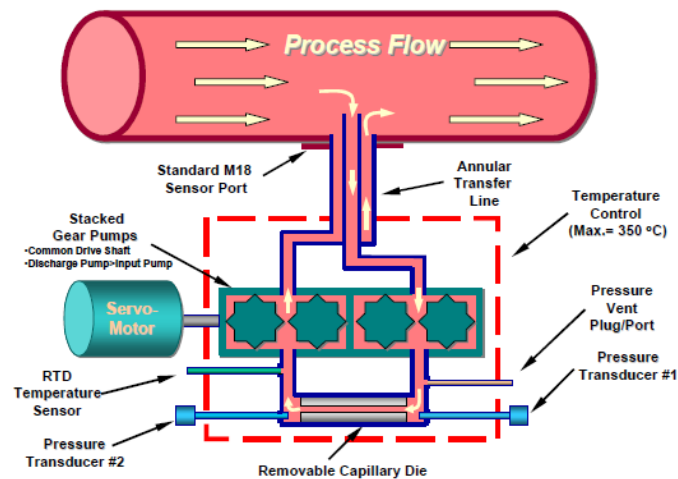


Figura 93. Esquema de reómetro on line.

En la Figura 94 se observa un ejemplo de la viscosidad de una muestra de LDPE a 190°C durante un proceso de extrusión. Cuando hay un problema durante la extrusión, como puede ser un problema en la alimentación del material, puede indicarse un cambio en la viscosidad del material, tal y como aparece en la Figura 9572.

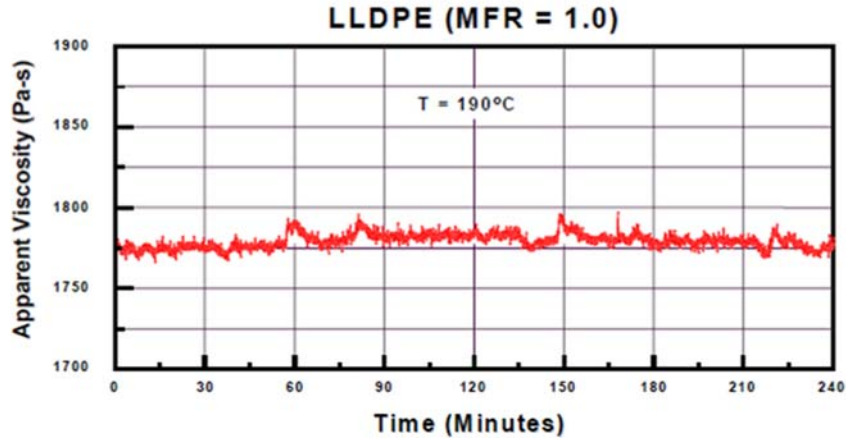


Figura 94. Ejemplo de curva de viscosidad con el tiempo.

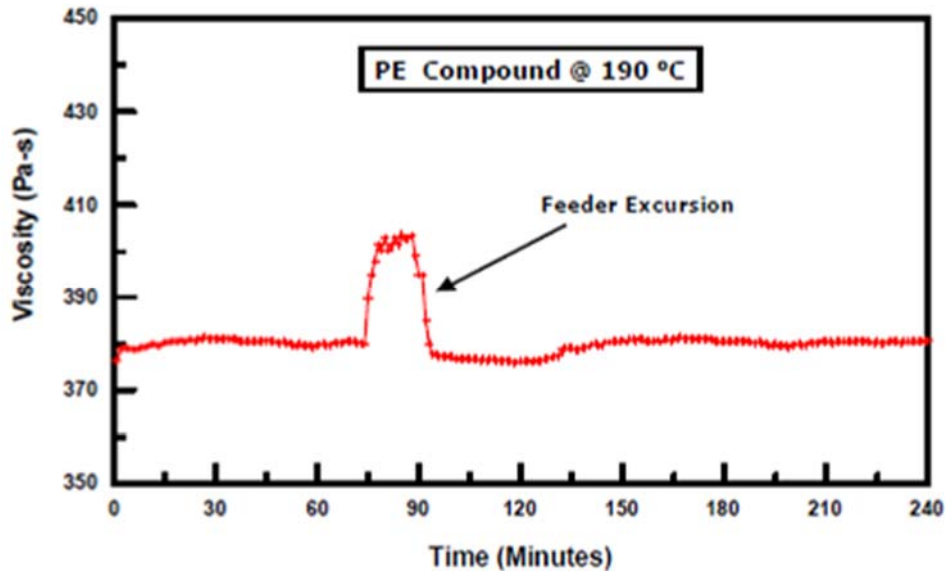


Figura 95. Variación en viscosidad durante extrusión.

### Recubrimiento o laminación de films

En procesos de extrusion-coating o de laminación en los que se requiere disponer de uno de los sustratos a una cierta temperatura para conseguir una buena adhesión es interesante controlar la temperatura a lo largo y ancho del sustrato. Existen dispositivos (por ejemplo, Sistema EC 150, Raytek) que monitorean la  $T^{\circ}$  en fundido en lámina o film.

El Sistema EC150 es un sistema automatizado para inspección de superficies para detectar, medir y clasificar defectos que ocurren en un recubrimiento por extrusión, coextrusión y procesos de laminado. Este sistema provee de una capacidad única para controlar la calidad de los procesos de extrusión de películas plásticas.

Las variaciones locales de temperatura y viscosidad en los flujos de material fundido a lo ancho del canal de flujo del extrusor pueden causar orillas “ondulantes” o “corridas”, interrupciones y bordes rasgados en la película extruida. Utilizando el Procesador de Imágenes MP150, el sistema EC150 monitorea

continuamente la distribución de la temperatura (a lo largo del ancho del film o lámina) y el ancho de la cortina de material fundido extruido para detectar automáticamente tales imperfecciones.

El sistema EC150 monitorea continuamente el proceso de extrusión permitiendo que los datos de temperatura sean visualizados en una gráfica de líneas (perfil) y en una imagen termográfica. Los perfiles y las imágenes pueden ser impresos o archivados para análisis futuros.

Características del EC150:

- Vista completa de imágenes térmicas y perfiles de temperatura
- Defina configuraciones específicas al producto y archivos de datos
- Configure a la medida y muestre las zonas sobrepuestas en la imagen térmica
- Analiza automáticamente las zonas de temperatura
- Almacenamiento de datos de alarma a prueba de fallos
- Salidas análogas o digitales opcionales

El sistema detecta bordes ondulados o corridos, separaciones y orillas rasgadas rápida y automáticamente; Asegura temperaturas adecuadas de la trama para una fuerte adhesión de la película al sustrato; Mejorar la rentabilidad y la calidad del producto; y Reduce los desperdicios.

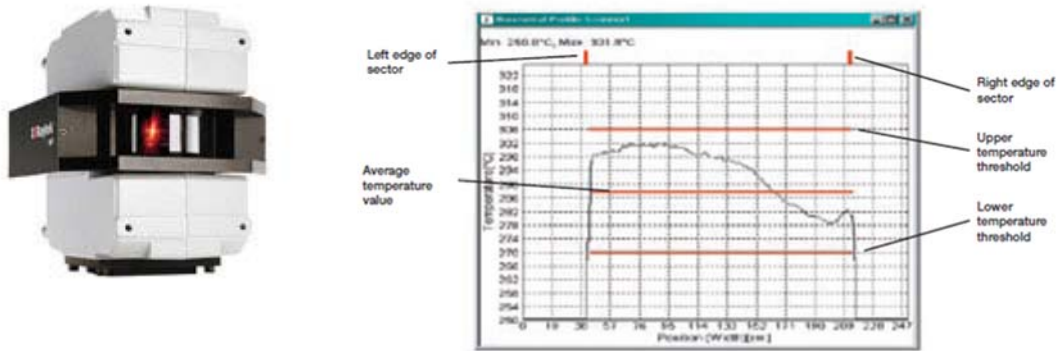


Figura 96. Tipo de sensor Sistema EC150 y gráfica registro variación de temperatura.

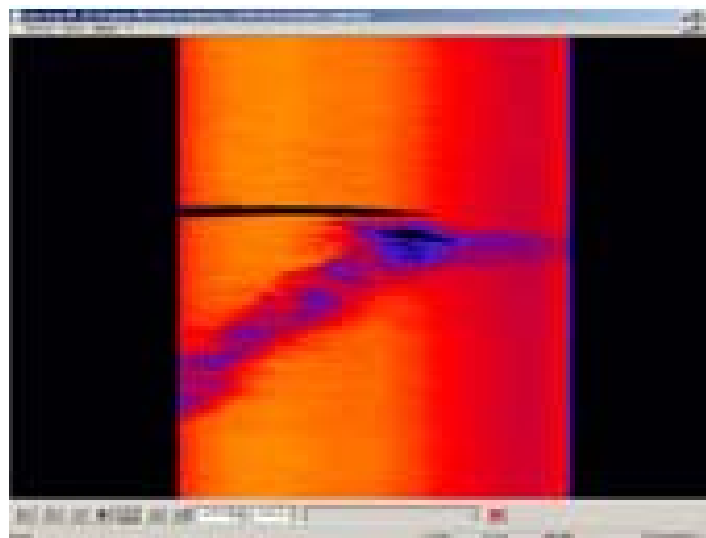


Figura 97. Registro de imagen obtenida con el sensor.

**Medición y control de espesores automático**

En cualquier proceso de extrusión interesa conseguir un producto final con **una variabilidad mínima en los espesores**. Las ventajas en el control del espesor durante el proceso de extrusión son:

- Paradas y arranques en mucho menor tiempo: Ahorro en materias primas. Reducción de costes sobre todo en materiales caros, p.e. barrera.
- Reducción de rechazos internos. Reducción de rechazos en un 50%. Corrección de desviaciones de forma instantánea. Ahorro materias primas.
- Ahorros por reducción de los espesores: Incremento en la productividad, arranques más rápidos.
- Menor coste de producción.
- Seguridad al cliente.
- Ahorro económico: entre 100.000\$ y 400.000\$ anuales.

Existen diferentes tipos de sensores para la medición de los espesores en productos extruidos. En la siguiente tabla se muestra una clasificación dependiendo del tipo de sensor y como realiza la medición.

Tabla 5. Tipo de sensores para medición de espesores.

Tipo de sensor	Medición de
Calibre	Espesor total en forma directa, densidad
Infrarrojos	Espesor directo, coteado diferenciado por capa, porcentaje de material en una composición de otros varios, nivel de humedad
Nuclear	Peso por unidad de superficie
Ópticos	Espesor total en forma directa, densidad
Rayos X	Peso por unidad, % de composición



Transmisión Rayos-X



Sensor NIR



Sensor Beta

Figura 98. Imágenes de sensores

Cuando estos sensores realizan el control de espesores en una lámina plana realizan el desplazamiento a lo ancho de las láminas, mientras que, en un proceso de extrusión de film soplado, el sensor gira sobre la superficie del film y mide el espesor en varios puntos alrededor de la circunferencia o a lo largo del ancho.

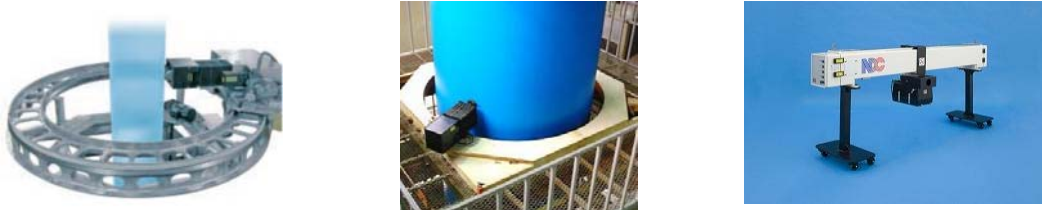


Figura 99. Sensores control de espesores alrededor globo film soplado.

Los fabricantes de este tipo de sensores para líneas de extrusión de film soplado aseguran una serie de ventajas tales como:

- Aumento de la producción de la línea hasta un 30%.
- Reducción tolerancias espesores en un 50-70%.
- Mejores características del film para tratamiento posterior.
- Reducción del espesor, ahorro de material
- Menos tiempo entre pedidos

En las siguientes imágenes se muestra como la tolerancia en un film se va reduciendo hasta un 3.6% tras haber transcurrido 14 minutos desde el inicio del proceso de extrusión de film.

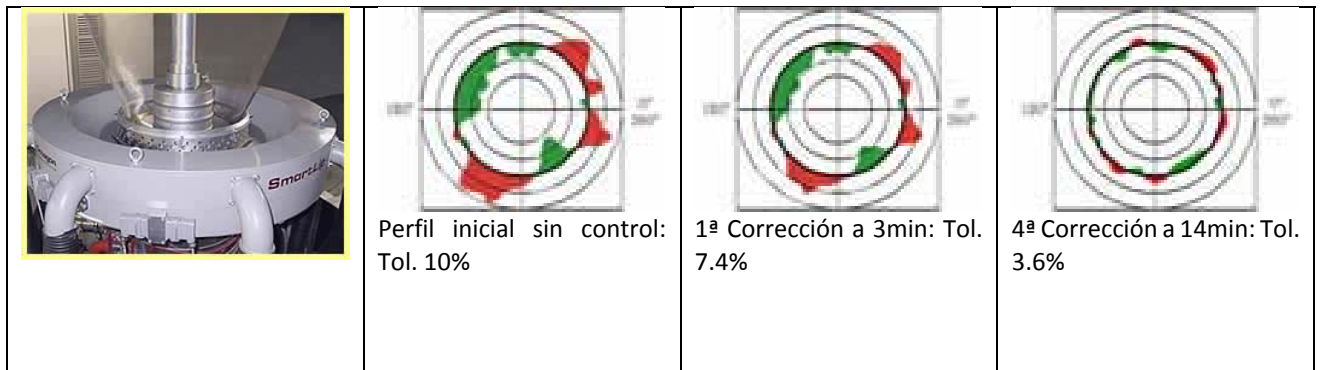
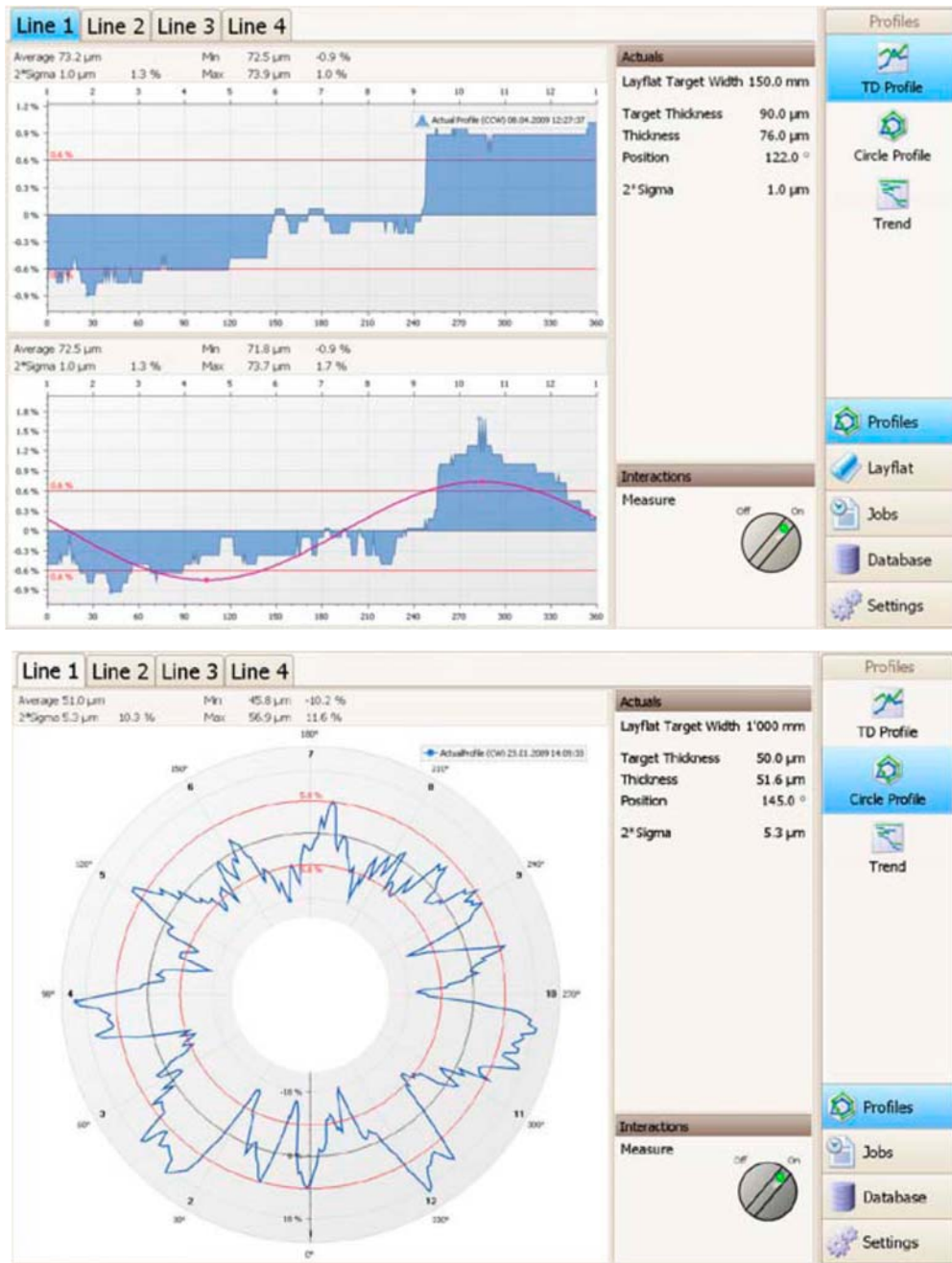


Figura 100. Corrección perfil de espesores de film soplado con el tiempo.

Un ejemplo de software para este proceso es el PROFILSTAR.NET de la empresa Künding Control Systems. Este software registra el perfil de espesores de forma continua a lo largo del tiempo y también alrededor de la circunferencia del globo.



Los sensores de espesores también pueden utilizarse en líneas de extrusión de tubos o tuberías. Existen sensores para: 1) Medición y control diámetro/espesor de tubo; 2) Medición de diámetro/ovalidad; 3) Medición de secciones de perfiles; 4) Control calidad superficial



Figura 101. Sensores en línea para línea de extrusión de tuberías.

Existen diferentes sistemas para el control del espesor de tuberías (o diámetros, ovalidades, etc). Ejemplos de marcas comerciales son: RAYEX®, LASERMIKE® y UMAC®.

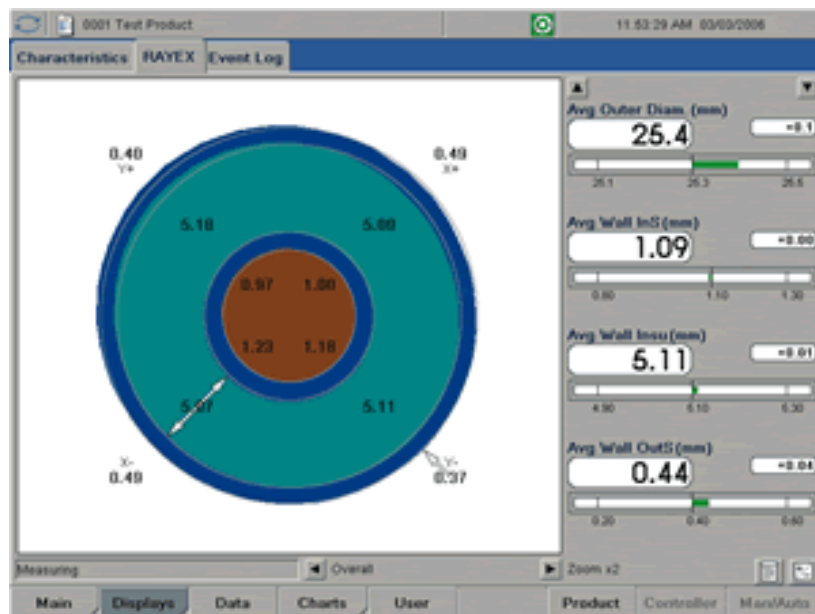


Figura 102. Pantalla de análisis sensor en línea de espesor y diámetro de tubería.

Las ventajas del uso de este tipo de sensores en una línea de extrusión de tubería son análogas a las explicadas anteriormente para una línea de extrusión de film.

Mantener un sistema de control que mantenga centrado el núcleo del cabezal, va a terminar en un ahorro en la reducción del tiempo de inicio y por lo tanto en un ahorro económico.

El **ahorro económico** que se puede conseguir con este control puede calcularse a partir de las dimensiones del tubo, de las características del material y de la producción, así como de los tiempos empleados para poner en marcha la línea hasta conseguir un régimen estacionario en la producción.

$$\text{Ahorro de material} = \pi [(DE/2)^2 - (DI/2)^2] * [\text{Tiempo de inicio actual} - \text{Nuevo tiempo de ciclo}] * [\text{Densidad del material}] * [\text{Velocidad de línea media}] * [\text{Inicios por año}]$$

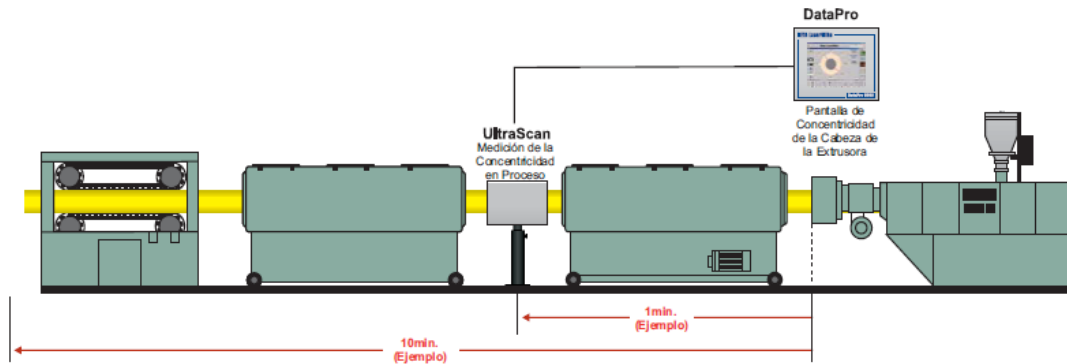


Figura 103. Colocación de sensores en línea de extrusión tuberia.

### 8. HABILITADORES. IDENTIFICACIÓN DE HABILITADORES Y SOLICITUD DE OFERTAS DE IMPLEMENTACIÓN.

A continuación, se indica un listado de fabricantes y proveedores de equipos y accesorios para el control de parámetros de líneas de extrusión, control de la calidad del proceso y por lo tanto un mejor control de la calidad de la producción.

Tabla 6. Listado de fabricantes de accesorios y equipos para líneas de extrusión.

Empresa	Web	Producto
<b>Parámetros de extrusión (T, P)</b>		
Dynisco	<a href="http://www.dynisco.com">www.dynisco.com</a>	Sensores presión, viscosímetros
MPI Melt Pressure	<a href="http://www.mpipressure.com">www.mpipressure.com</a>	Sensores presión
Gentran	<a href="http://www.gentran-corp.com">www.gentran-corp.com</a>	Sensores y controladores de presión
Gefran	<a href="http://www.gefran.com">www.gefran.com</a>	Sensores, controladores, captura de datos
Watlow	<a href="http://www.watlow.com">www.watlow.com</a>	Sensores temperatura y controladores
GP50	<a href="http://www.gp50.com">www.gp50.com</a>	Sensores y controladores
<b>Equipamiento auxiliar</b>		
Xaloy	<a href="http://www.xaloy.com">www.xaloy.com</a>	Bombas de engranaje
Nordson	<a href="http://www.nordson.com">www.nordson.com</a>	Bombas de engranaje
Gneuss	<a href="http://www.gneuss.de">www.gneuss.de</a>	Viscosímetros
Dr. Collin	<a href="http://www.drcollin.de">www.drcollin.de</a>	Viscosímetros
<b>Defectos</b>		
OCS	<a href="http://www.ocsgmbh.com">www.ocsgmbh.com</a>	Sistemas control ópticos
Dr. Schenk	<a href="http://www.drshenk.com">www.drshenk.com</a>	Sistemas inspección defectos film



Raytec	<a href="http://www.raytek.com/raytek/en-r0">http://www.raytek.com/raytek/en-r0</a>	Medición temperatura en extrusión film, lámina, recubrimiento, termoconformado, etc)
<b>Espesores</b>		
Beta Lasermike	<a href="http://www.betalasermike.com">www.betalasermike.com</a>	Sensores espesor y dimensiones de tubos y tuberías
NDC Infrared	<a href="http://www.ndcinfrared.com/NDC">http://www.ndcinfrared.com/NDC</a>	Espesor láminas y films
Zumbach	<a href="http://www.zumbach.com/s/flash_hp/index.asp">http://www.zumbach.com/s/flash_hp/index.asp</a>	Control calidad tubos, tuberías, perfiles, cables
Kunding	<a href="http://www.kundig-hch.ch/KCS/english/pagesnav/CPR.htm">http://www.kundig-hch.ch/KCS/english/pagesnav/CPR.htm</a>	Espesor film soplado
<b>Filtración en fundido</b>		
Gneuss	<a href="http://www.gneuss.de">www.gneuss.de</a>	Sensores y filtración fundido

## Compounding

### 1. Selección de prueba

Compounding o *melt compounding* puede definirse como la adición o incorporación en estado fundido de cualquier tipo de material (orgánico, inorgánico, natural o sintético) al plástico para modificar su rendimiento, procesado o las propiedades del polímero inicial para un fin deseado. Esta modificación de propiedades va ligada a la composición del material y al proceso de mezclado en sí mismo y ambos factores son igualmente importantes pues afectan a las propiedades finales obtenidas.

Una mala formulación o condiciones de procesado inadecuadas conllevan en general pérdidas de calidad, necesidad de sobre-aditivación, extracostes etc. lo que se traduce en definitiva en una reducción de la competitividad de la empresa. El concepto de industria 4.0, consigue mejorar de forma global la competitividad de la empresa implantando sistemas de automatización y digitalización aplicando el concepto de fábricas inteligentes (Smart manufacturing). En el proceso de compounding aporta importantes beneficios a las empresas transformadoras porque permite reducir los costes de producción, conseguir una mayor autonomía, reducción de la mano de obra, mayor trazabilidad, mejora de la calidad, mayor adaptación al cambio, servicio más especializado, reducción de los tiempos y mayor velocidad de respuesta entre otros.

Hoy en día el mercado de compounding es altamente competitivo y con la deslocalización de las empresas es complicado poder competir con países emergentes donde los sueldos y en general la mano de obra es más barata. Gracias a la implantación de la industria 4.0 es posible mejorar la competitividad de las empresas de compounding, donde no sólo es importante el coste del producto, sino también la adaptación al cambio y la especialización, tan necesaria en mercados que están en constante evolución como son la industria del packaging, automoción, eléctrico-electrónico, construcción etc. que son ejemplos de mercado donde van destinados los productos fabricados a partir de compuestos plásticos.

### 2. Estudio y Selección de Sistemas de Compounding

#### 2.1 Sistemas de compounding en la industria del plástico.

Desde el punto de vista de procesado para la transformación de compuestos plásticos se emplean diferentes tipos de equipos que son los siguientes:

- Extrusoras mono-husillo:
  - Mono-husillo convencionales
  - Amasadoras mono-husillo, co-kneader
- Extrusoras de doble husillo:
  - Co-rotativa
  - Contra-rotativa
- Extrusoras contra-rotativa cónicas
  - Multi-husillo
  - Planetaria

##### 2.1.1 Extrusoras mono-husillo

El sistema de transformación de termoplásticos más extendido es la extrusión monohusillo debido a su bajo coste y menor complejidad tecnológica. Este equipamiento utiliza un único husillo con una configuración más o menos compleja que además de fundir, transportar y comprimir el material permite la inclusión de diferentes elementos mezcladores dispersivos

(Maddock, Blister, Zorro, etc..) o distributivos (cavidades, pines, Saxon, CTR, Dulmage, etc..)<sup>17</sup>.

El husillo es el elemento principal de una extrusora, es un tornillo de Arquímedes al cual se le imprime un movimiento de rotación sobre su eje por medio de un motor y un sistema de engranajes y cojinetes. El husillo se encuentra alojado en el interior del cilindro y gira dejando una pequeña holgura entre ambos. Cada material, necesita de un tipo diferente de husillo, si se quiere conseguir un rendimiento máximo. En la figura 85, se pueden observar diferentes husillos dependiendo del material que se vaya a procesar.

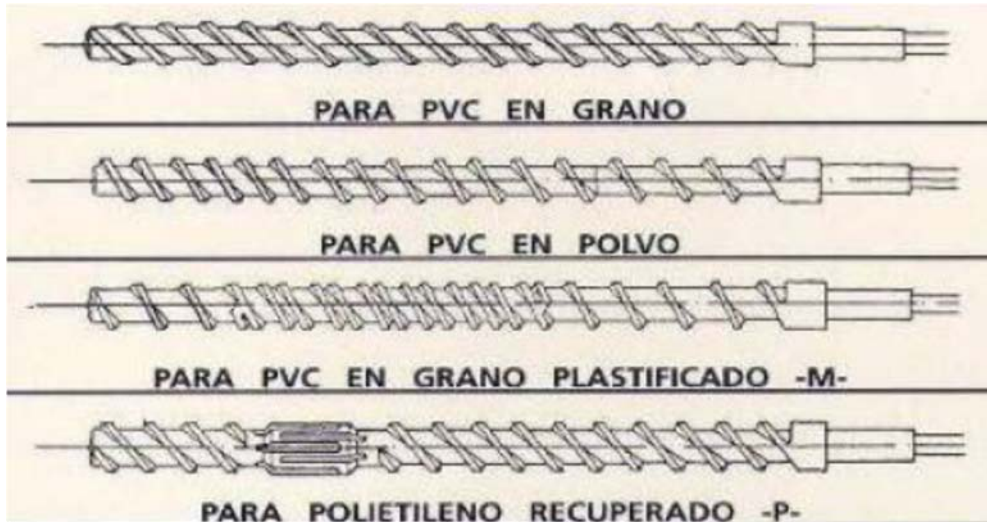


Figura 104. Ejemplos de husillos según el material a procesar.

### 2.1.2 Extrusoras co-kneader

Esta máquina es una extrusora de compound mono-husillo que opera en continuo. Su husillo especial y el diseño de los barrels la diferencian de las extrusoras mono-husillo tradicionales.

Poseen elementos de husillo que fomentan la correcta mezcla, pero además en el interior de la camisa tienen una especie de filetes fijos (pins) que quedan intercalados entre los filetes del husillo, de forma que la capacidad de mezcla del husillo se ve incrementada sustancialmente. Como se muestra en la figura 86, el husillo realiza además de un movimiento rotatorio, un movimiento axial de avance y retroceso, lo cual aumenta la capacidad de mezcla de la máquina<sup>18</sup>.

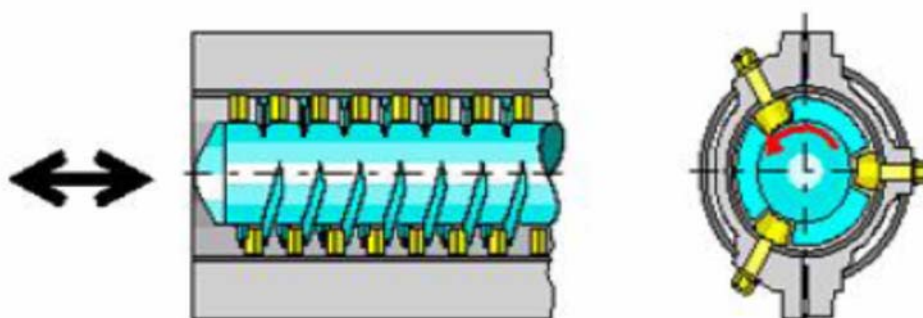


Figura 105. Movimiento de una Extrusora Amasadora Ko-Kneader Buss

<sup>17</sup> M. Gale, Advances in Polym. Technol., 16, 4, 251-262 (1997).

<sup>18</sup> Pierre H. M. Elemans, Han E. H. Meijer, Mixing and compounding of polymers, Hanser, 1994.

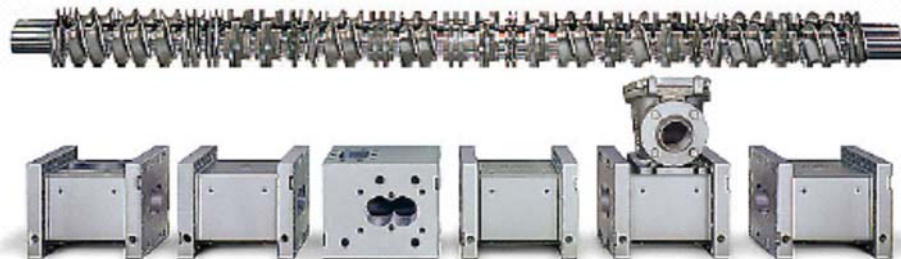
Este tipo de equipamiento permite la adición de cargas lateralmente y tiene un husillo y camisa configurables en función del tipo de material y el grado de mezcla necesarios. Además esta máquina dispone de desgasificación para la eliminación de gases y humedad. La longitud de este tipo de equipamiento es corto ( $L/D = 10-12$ ).

Aplicaciones:

- Es la máquina más apropiada para transformar el PVC, tanto rígido como flexible, debido a su baja cizalla, pero alta efectividad de mezcla debido a su diseño.
- Se emplea también para la realización de concentrados en termoplásticos convencionales y compuestos altamente cargados ( p.e. negro de carbono).
- Obtención de materiales en polvo, pinturas.
- Termoestables (fenol-formaldehído, urea formaldehído etc.).
- Polímeros de silicona.

### 2.1.3 Extrusora co-rotativa

La extrusora de doble husillo co-rotativa se caracteriza por tener dos husillos iguales que giran en paralelo en el mismo sentido. Son máquinas versátiles que constan de un husillo y camisa (barrels) modulares calefactados y refrigerados para el estricto control de la temperatura y la configuración pueden ser diseñada en función del material que vaya a ser procesado (ver Figura 106). En función del tipo de carga o fibra, polímero etc., se puede diseñar una configuración de husillo u otra y lo mismo con la colocación de los barrels.



**Figura 106. Husillo y camisa configurables de una extrusora co-rotativa**

Características<sup>19</sup>:

- Máquinas largas, desde 40 L/D hasta 56 L/D.
- Permite la aditivación de polvos, gránulos, fibras y líquidos mediante bombas de pistón o dosificadores gravimétricos.
- Es un proceso sencillo dada la baja presión interior con la que trabaja esta máquina.
- Permite una gran desgasificación, incluso el acople de bombas de vacío.
- Es una máquina que trabaja en starve-feeding, garganta vacía.
- Es una máquina autolimpiable, se vacía completamente.
- Son las más ampliamente utilizadas en la fabricación de compuestos.

Aplicaciones:

- Se utilizan para realizar compuestos plásticos de Polímero-carga inorgánica, polímero-

<sup>19</sup> Charlie Martin, The SPE on Extrusion Technology and Troubleshooting, Technical Editors, (2001)

fibra, polímero–polímero, polímero-aditivo en porcentajes muy diferentes, además de extrusión reactiva.

- Generan poca presión, por lo que son ineficaces para la obtención de perfiles y/o films.
- No es el equipo más adecuado para el procesamiento de PVC.

#### 2.1.4 Extrusora planetaria

La extrusora Planetaria se ha usado normalmente para la obtención de “compounds” sensibles al calor, con una mínima degradación debido a que finas capas de “compound” pueden ser expuestas a largas superficies de contacto, obteniendo así un intercambio efectivo de calor, mezcla y control de temperatura. Hace más de cuarenta años que existen las extrusoras planetarias pero es ahora cuando han ganado importancia en la tecnología del “compounding”, sobretodo desde que se han mejorado las secuencias de producción con ahorro de pasos clave de trabajo<sup>20</sup>.

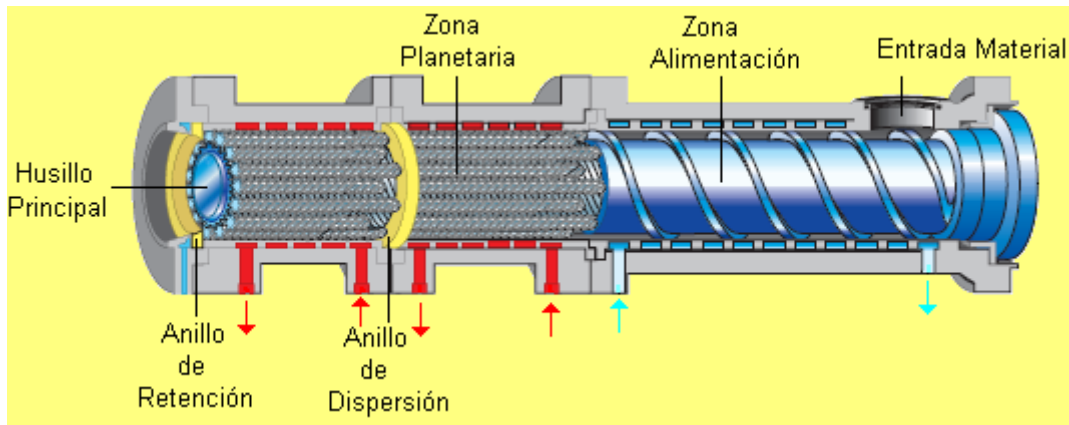


Figura 107. Esquema de una extrusora planetaria

Generalmente, poseen una sección de alimentación y una sección de “compounding”, como se muestra en la figura 88. La sección de alimentación incluye un husillo de transporte en el cual ciertas materias primas, son alimentadas continuamente. El husillo de transporte pasa el material a la sección de “compounding”. Esta sección, incluye un eje principal, que va acoplado al husillo de transporte y le confiere el movimiento, y un cierto número de husillos planetarios que giran alrededor del husillo principal y engranan al mismo tiempo en la hélice del cilindro. La velocidad de rotación del husillo principal y por consiguiente la velocidad de los husillos planetarios, pueden variar y es un parámetro a controlar durante el proceso de “compounding”. Los materiales circulan entre el husillo principal y los planetarios o entre los planetarios y el engrane helicoidal del cilindro, debajo de los cuales, son dispersados para formar una composición homogénea.

Características:

- Buena homogeneidad del fundido a bajas temperaturas (producción de compounds sensibles al calor)
- Exposición uniforme a la cizalla
- Baja degradación del material (finas capas de material son expuestas a grandes superficies de contacto (5 veces más que en otras máquinas de compound) (se obtiene

<sup>20</sup> A. Limper, S. Seibel, G. Fattmann, Macromolecular Materials and Engineering, 287, 815-823, (2002).

un intercambio de calor más efectivo y un mayor control de la temperatura

- Estrecha distribución del tiempo de residencia (mayor control sobre el proceso)
- Alta capacidad de autolimpieza
- Construcción modular según los requerimientos de cada proceso

Aplicaciones:

- Todos los tipos de formulaciones de PVC – alimentación de unidades de calandrado
- ABS, TPO, TPU, PE, PP, PET
- Poliolefinas de alto % de cargas.
- Industria de Colorantes y Pinturas
- Extrusión reactiva.

### 2.1.5 Extrusora contra-rotativa

La principal característica de esta maquinaria es que tienen dos husillos que giran paralelamente en sentido contrario uno del otro. Aunque son máquinas que pueden admitir dosificaciones laterales, lo más usual es alimentarla con un premix. Esto requiere que los componentes de la mezcla estén en el mismo formato, como es el caso de las mezclas de policloruro de vinilo con sus diferentes aditivos (“Dry Blend”).

Para la eliminación de gases, cuentan con desgasificadores. Éstos son claves para la obtención de unos pellets de calidad, exentos de burbujas. Al igual que las co-rotativas, son máquinas modulares en husillo y camisa, aunque su versatilidad no alcanza a las primeras<sup>21</sup>.

Trabajan como una bomba de fundido empujando el material hacia delante. Son máquinas más cortas que las co-rotativas (relación L/D) y trabajan a menor velocidad 50-120 rpm, hecho que las capacita para trabajar con materiales en polvo evitando las turbulencias. En la figura 89 se puede observar con detalle los husillos de una extrusora contra-rotativa.



**Figura 108. Husillos modulares de una extrusora contra-rotativa.**

Aplicaciones:

- Se utilizan para realizar compounds con materiales sensibles a la cizalla.
- Aún así se puede utilizar con un amplio rango de polímeros y cargas.
- Al trabajar como una bomba de fundido pueden acoplarse cabezales de perfilería, lámina, tubería etc.
- Debido a su gran capacidad de transporte es especialmente útil con materiales en forma de polvo o con densidades aparentes bajas, productos altamente cargados, concentrados de color etc.

### 2.1.6 Extrusoras cónicas

Este tipo de extrusoras son contra-rotativas o co-rotativas con la particularidad de que sus husillos tienen forma cónica, lo que implica una gran compresión del material. En la Figura 109 se pueden ver las diferentes zonas de los husillos. Suelen trabajar a muy pocas

<sup>21</sup> C. Rauwendaal, Polymer Mixing, Hanser, (1998)

revoluciones por minuto, aproximadamente 30 y en régimen de "starve feeding".



**Figura 109. Husillos de una extrusora cónica.**

Se utilizan normalmente para la obtención directa de productos extruidos, tales como perfiles, tuberías acoplando cabezales a la extrusora. El material más utilizado es el PVC, aunque actualmente se están utilizando también para realizar mezclas de polipropileno (PP) o polietileno (PE) con polvo de madera, decking. Las formulaciones se encuentran alrededor del 70% de madera y el resto está compuesto por polímero con los aditivos correspondientes<sup>22</sup>.

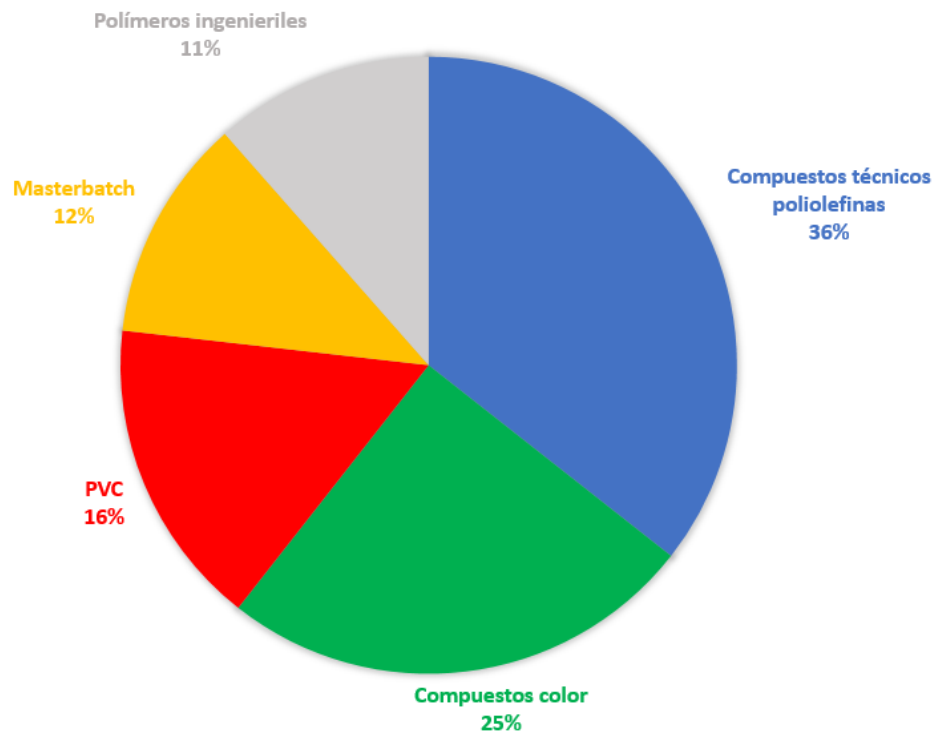
## 2.2 Formulación

Desde el punto de vista de la formulación podemos encontrar en general diferentes tipologías de compuestos en función de los materiales que componen el compuesto, como por ejemplo mezclas de diferentes tipos de polímeros, combinaciones de polímeros y aditivos (pigmentos, ignífugos, agentes espumantes, antioxidantes, nucleantes, etc.), de polímeros y cargas (carbonato de calcio, talco, negro de humo etc.) y de polímeros y fibras (carbono, vidrio, natural etc.). En general una formulación lleva asociada la combinación de varias de las alternativas citadas anteriormente.

Las empresas de compounding en España se dedican principalmente a la fabricación de compuestos en base poliolefinas, PVC, compuestos de color, fabricación de masterbatch (aditivos, negro, blanco o coloreado) y compuestos ingenieriles. En la Figura 110 se muestra la proporción de empresas dedicadas a la producción de compuestos en España segmentadas por tipología de producto. La producción de compuestos de color y masterbatches ocupa un 37% del mercado global, el PVC un 16% y la fabricación de compuestos técnicos un 47%.

<sup>22</sup> Charlie Martin, The SPE on Extrusion Technology and Troubleshooting, Technical Editors, (2001)

**PRODUCCIÓN DE COMPUESTOS TERMOPLÁSTICOS EN ESPAÑA EN 2010**



**Figura 110. Producción de compuestos termoplásticos en España en 2010<sup>23</sup>.**

### 2.3 Selección del caso de estudio

Dentro de la industria especializada en la fabricación de compuestos plásticos, la fabricación de compuestos ingenieriles y fabricación de masterbatches copan el 84% del global y en este caso las extrusoras de doble husillo co-rotativas son las más empleadas.

Las extrusoras monohusillo no son los equipos más adecuados para la fabricación de compuestos porque el grado de mezcla que consiguen es inferior a las extrusoras de doble husillo. Por otro lado, las extrusoras co-kneader y planetaria son equipos más específicos que fabrican un número determinado de marcas comerciales y no están tan extendidas como las extrusoras mono-husillo y doble husillo convencionales.

Si bien es cierto que las extrusoras de doble husillo contra-rotativas y cónicas son las más empleadas en la industria del PVC, representa un sector muy específico y lo que se espera del presente desarrollo es poder llegar a un mayor número de transformadores de plástico y causar el mayor impacto posible. Por tal motivo, se han decidido emplear extrusoras de doble husillo co-rotativas para el caso de estudio porque son equipos que fabrican un gran número de marcas comerciales (Coperion, Leistritz, Berstoff, etc.) y es muy común encontrarlas para la fabricación de compuestos plásticos.

Para el desarrollo del proyecto se va a seleccionar la fabricación de compuestos técnicos y concentrado de carga debido a que un 84% de las empresas transformadoras dedican su actividad a la fabricación de esta tipología de productos.

## 3. Selección del equipamiento

### 3.1 Descripción del equipamiento

<sup>23</sup> AMI's guide to the thermoplastic compounding industry in Europe - AMI's Guide Edition: 11.0, 2011.

El equipamiento empleado es el siguiente:

- Extrusora de doble husillo co-rotativa Leistritz SME 27MAXX.
- Dosificador gravimétrico Ktron-20.
- Baño de enfriamiento.
- Granceadora IPS-SG-E 30.

Para el caso de estudio se ha empleado una extrusora de doble husillo co-rotativa Leistritz Maxx 27, de 27 mm de diámetro de husillo y una relación L/D de 44 (ver Figura 111). Este equipo cuenta con 10 barrels independientes calefactados y refrigerados para un estricto control de la temperatura en cada uno de ellos. Cuenta con 3 zonas de venteo y un puerto de vacío para la extracción de gases. Por el interior de la extrusora giran dos husillos engranados en el mismo sentido que mezclan y transportan el material hacia la boquilla. Por otro lado se han empleado dosificadores gravimétricos para la alimentación de las cargas, un baño de agua para el enfriamiento de los hilos a la salida de la extrusora y una peletizadora para cortar los hilos.



**Figura 111. Extrusora co-rotativa de doble husillo Leistritz Maxx 27.**

	
<p>Dosificador gravimétrico KT-20 (doble husillo)</p>	<p>Granceadora IPS-SG-E 30.</p>
	
<p>Baño de agua para enfriamiento de hilos IPS</p>	

**4. Parámetros. Definición y descripción de parámetros de control iniciales. Justificación de su elección.**

Los parámetros de procesado son condiciones del proceso de mezclado que afectan a la calidad del material y por tanto a las propiedades obtenidas. Las principales ventajas que aporta un buen diseño de las condiciones de procesado son las siguientes:

- Mejora el rendimiento del proceso
- Reduce el coste de la formulación, ya que las condiciones de procesado inadecuadas pueden hacer necesaria la sobre-aditivación o mayores costes energéticos.
- Aumenta la eficiencia e incrementa la producción.
- Facilita la velocidad de reacción ante problemas inesperados durante el procesado.
- Sirve para estandarizar una metodología de trabajo.
- Consigue una alta trazabilidad de los compuestos desarrollados

Los parámetros de procesado principales empleados en la extrusión de compuestos son los siguientes:

- Producción
- Velocidad de giro del husillo
- Temperaturas de procesado
- Configuración de husillo

### Producción

Mide la cantidad de material que se procesa por hora. La producción dependerá de la capacidad de llenado que tenga la máquina, el diámetro del husillo y de la potencia del motor. Aspectos inherentes al plástico y a los aditivos son importantes a la hora de determinar la producción del proceso (viscosidad del polímero, sensibilidad a la cizalla) y en el caso de cargas, concentración, tamaño de partícula etc, morfología etc.

En la Tabla 7 se recoge la producción máxima que puede conseguir una máquina en función de su tamaño y del tipo de compuesto que esté transformando. Por ejemplo, mezclas de blends en una extrusora Leistritz de 27 mm de diámetro podría trabajarse a una producción máxima de 75 kg/h sin embargo un compuesto altamente cargado tendría que trabajarse a 25 kg/h en la misma máquina.

**Tabla 7. Producción en función del tamaño de la extrusora.**

	Leistritz	Diámetro husillo (mm)	Producción (mejores condiciones) kg/h	Escalado volumétrico, condiciones adversas (Kg/h)
Leistritz	ZSE 18 HP	18	0,2-40	
Leistritz	ZSE 27 HP	27	75	25
Leistritz	ZSE 40 HP	40	500	81.29
Leistritz	ZSE 50 HP	50	1000	158.77
Leistritz	ZSE 60 HP	60	1700	274.35
Leistritz	ZSE 75 HP	75	3500	535.84
Leistritz	ZSE 87 HP	87	5000	836.39
Leistritz	ZSE 110 HP	110	10000	1,690.55
Leistritz	ZSE 135 HP	135	-	3,125.00

### Velocidad de giro del husillo

La velocidad de giro del husillo se mide en revoluciones por minuto (rpm) y determina la velocidad a la que se mueven los husillos en el interior de la extrusora y tiene una influencia en el grado de mezcla del compuesto. Manteniendo constantes el resto de las condiciones de procesado, mayores velocidades de giro imparten mayores esfuerzos de cizalla por cada kilogramo procesado y reducen el tiempo de residencia del material en el interior de la extrusora.

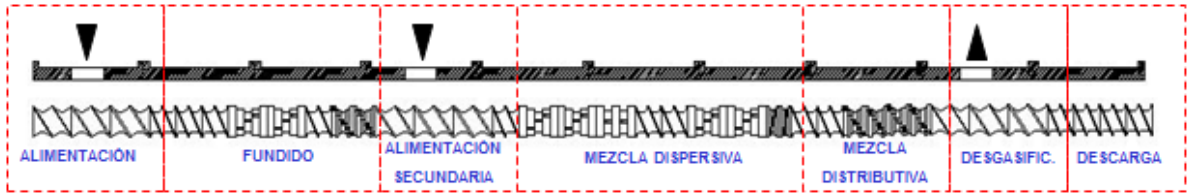
### Temperatura de procesado

Es la temperatura de cada uno de los barrels. El perfil de temperatura es adaptable a cada compuesto a procesar. En líneas generales el perfil de temperatura deberá ser descendente en la formulación de blends pues es al principio de la máquina es donde más energía se requiere para fundir el material y por otro lado, en la fabricación de compuestos altamente cargados puede ser necesaria la subida de temperatura posterior a la alimentación de la carga para reducir la viscosidad de la mezcla. Como referencia las temperaturas de procesado deben ser 20 °C por encima de las temperaturas de fundido para plásticos semi-cristalinos y temperaturas de inyección para amorfos

### Configuración de husillo.

La unidad de procesado está constituida por un husillo diseñado en función del material a transformar elemento a elemento para favorecer el transporte, fundido y mezclado del

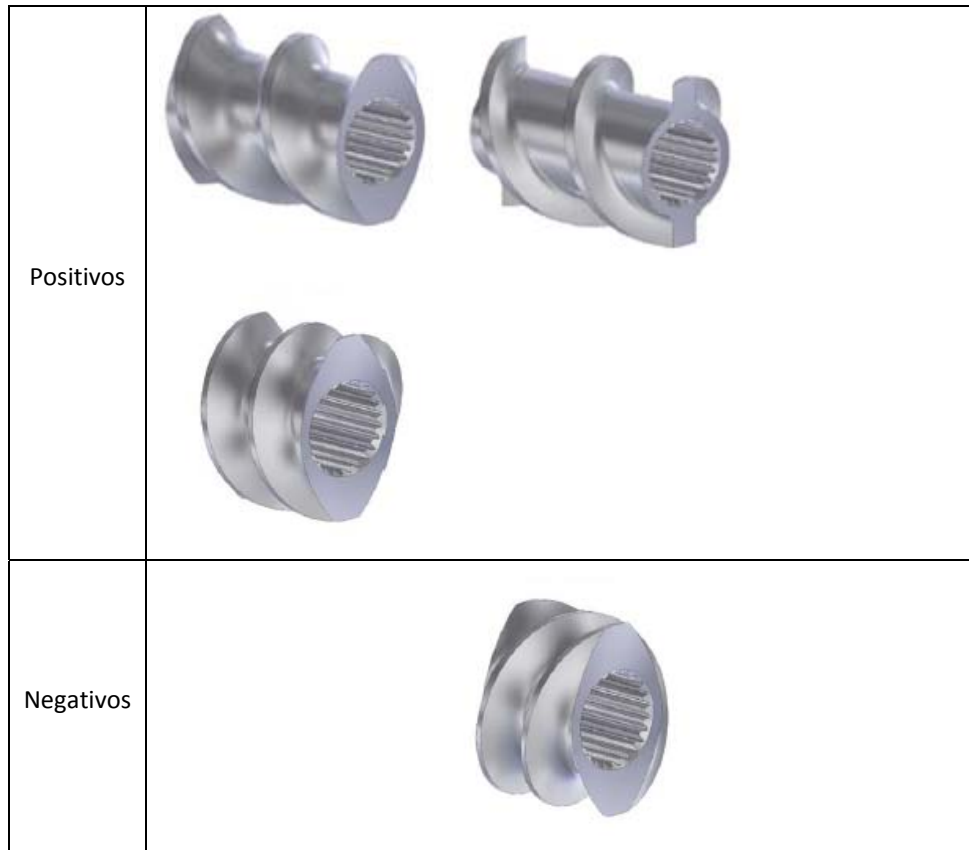
plástico (ver Figura 112). Sus diferentes geometrías generan flujos en el material plástico que favorecen la incorporación de los diferentes materiales al plástico que queremos modificar.



**Figura 112. Unidad de procesamiento extrusora de doble husillo co-rotativa<sup>24</sup>.**

Los elementos principales que conforman el husillo son los siguientes:

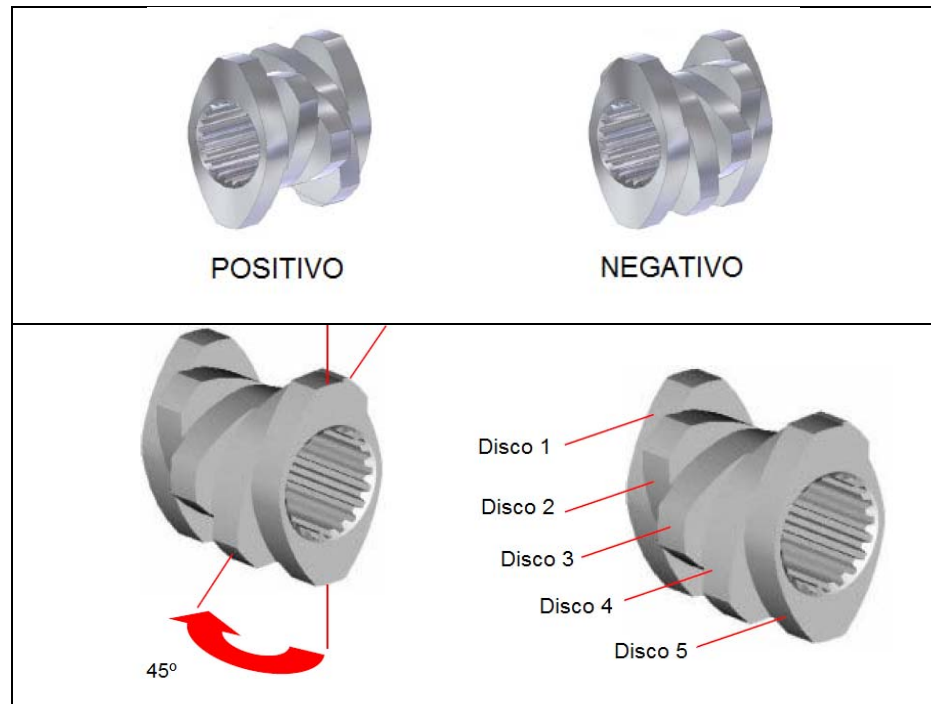
- Elementos de transporte, tienen la función de hacer avanzar el material dentro de la extrusora. Se colocan en zonas de alimentación de material y de desgasificación (ver Figura 113).



**Figura 113. Elementos de transporte<sup>24</sup>.**

- Elementos de amasado, son elementos de mezcla y están constituidos por un grupo de discos bi o trilobulares desfasados cierto ángulo. Con ellos se consigue mezcla dispersiva y/o distributiva, dependiendo de la anchura de los discos, de su ángulo y del número de discos. Se colocan en la zona de fundido o de mezcla.

<sup>24</sup> Dreiblatt, A. Introduction to Screw Design, 2010.



**Figura 114. Elementos de amasado24.**

- Elementos dentados, son los ideales para mezcla distributiva, pues dada su geometría rompen el flujo del material en muchas direcciones, favoreciendo así la homogenización. Pueden ser positivos y negativos. Se colocan en zonas de mezcla al igual que los elementos de amasado (ver Figura 115).



**Figura 115. Elementos dentados24.**

Las variables respuesta del proceso se emplean como método de control y son una consecuencia de los parámetros de entrada, es decir que los valores de estas variables no pueden modificarse directamente. Estas variables del proceso aportan los siguientes beneficios:

- Como parámetros de control de calidad
- Para comprobar la estabilidad del proceso
- Para comparar dos extrusoras diferentes entre sí.
- Para escalado industrial
- Influencia de diferentes tipos de carga en la viscosidad del fundido.

Las variables respuesta del proceso que se miden en el proceso de compounding son las siguientes:

- Torque
- Presión
- Temperatura de fundido
- Energía mecánica específica

Par motor o torque (%)

El torque o par motor es un valor porcentual de la potencia de la extrusora y proporciona una indicación directa de la energía absorbida por el material debido a la cizalla ejercida por el husillo y la boquilla de salida. El par de torsión puede definirse como la energía empleada por la máquina para fundir, mezclar y extruir la mezcla. Normalmente, se asocia a la energía que consumen los husillos.

Los pares de torsión bajos implican máquinas vacías a ciertas velocidades y producciones, alta velocidad de giro de los husillos o baja producción. Por otro lado, grandes pares de torsión son consecuencia de lo contrario, baja velocidad y alta producción. Es un valor que indica por otro lado el grado de llenado del equipo. El método normal de procesar, una vez hemos conseguido la dispersión y la calidad es trabajar a la mayor producción posible a pares de torsión del 70-80 %.

Presión (bar)

La presión generalmente se mide en la boquilla y es una medida indirecta de la viscosidad del fundido. Manteniendo el resto de las condiciones de procesado constantes, (producción, velocidad de giro del husillo, temperaturas de procesado y husillo), una mayor presión es indicativa de mayor viscosidad del fundido. Si la presión es excesivamente alta puede deberse a alta viscosidad del compuesto o a condiciones de procesado inadecuadas, por ejemplo, temperaturas de procesado bajas. Cuando la presión oscila excesivamente es indicativo de una alimentación que no es constante.

Temperatura de fundido (°C)

La temperatura de fundido se mide generalmente en la boquilla y mide la temperatura real de la masa fundida a diferencia de las temperaturas de los barrels donde se mide la temperatura de la superficie metálica. Si la temperatura de fundido es bastante más alta que la temperatura de procesado es porque el material se ha calentado por efecto de la cizalla, que es consecuencia de las condiciones de procesado o de la excesiva viscosidad de la masa fundida (por ejemplo, compuestos altamente cargados).

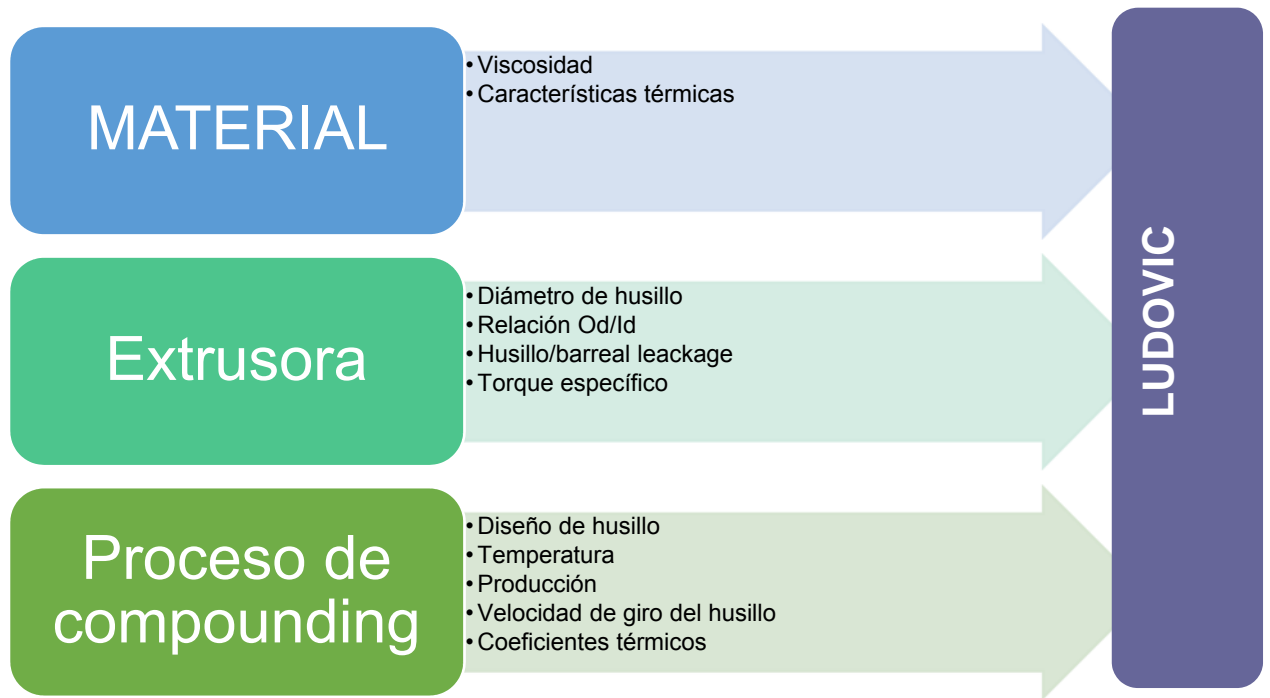
Energía mecánica específica, SME (kWh/kg)

La energía mecánica específica proporciona una guía sobre la energía de mezcla aplicada al material por cada kilogramo de mezcla. Normalmente la SME se asocia con la cizalla y es muy útil a la hora de comparar diferentes procesos o enfoques de mezcla. Con diferentes parámetros de procesado podemos tener la misma SME, de modo que los materiales podrían ser muy similares.

$$SME = \frac{\eta \cdot Potencia (kW) \cdot velocidad\ del\ husillo (rpm) \cdot Par\ motor (\%)}{Producción (kg/h) \cdot velocidad\ del\ husillo\ max (rpm)}$$

Existen una serie de variables respuesta adicionales que son útiles para controlar el proceso de producción que actualmente se obtienen mediante un software de simulación de husillos en extrusoras de doble husillo corrotativas, Ludovic 6.1.0. Para la definición del proceso es necesario introducir una serie de parámetros de entrada teniendo en cuenta el equipamiento, el material

y las condiciones de procesado (ver Figura 116), una vez definido el proceso, es posible modelizar el proceso de producción y predecir las variables respuesta.



**Figura 116. Datos necesarios para la simulación con Ludovic**

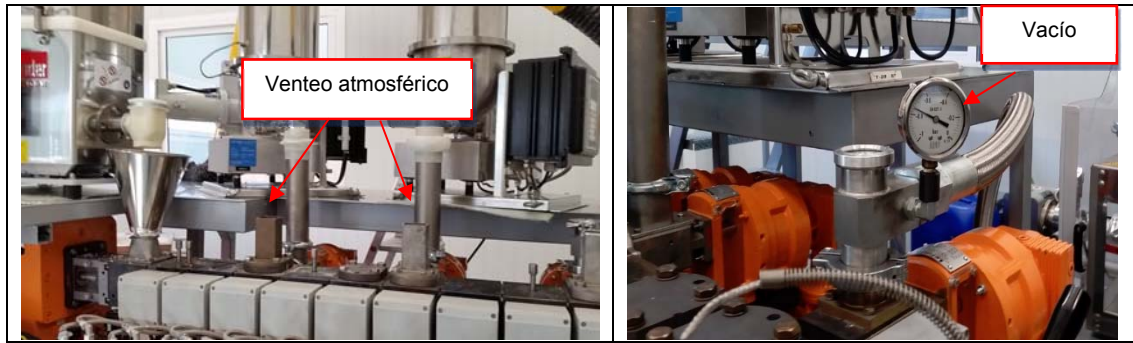
El programa de simulación permite comparar diferentes configuraciones de husillo y parámetros de procesado como producción, velocidad de giro del husillo y temperatura para estudiar previo a la extrusión de los compuestos cuales son los parámetros de entrada óptimos. Para ayudar a seleccionar los parámetros de procesado adecuados el programa obtiene las siguientes variables respuesta:

Grado de llenado

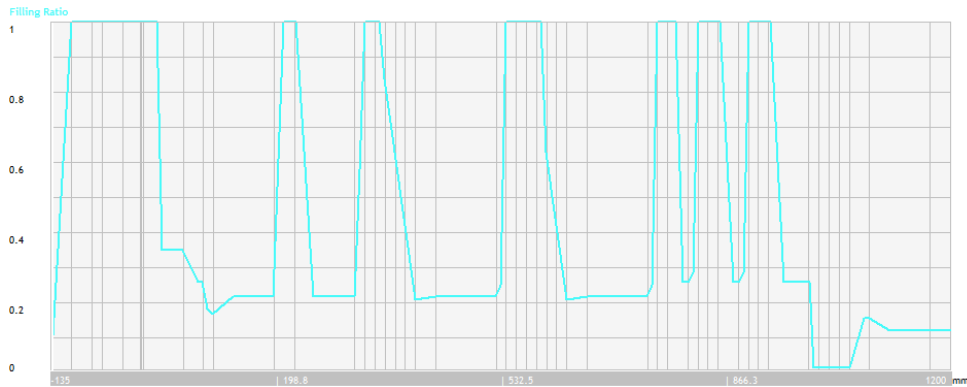
El grado de llenado es importante y se relaciona con la distribución del tiempo de residencia y la historia térmica de la resina dentro de la extrusora. Adicionalmente es útil para la eliminación de volátiles (monómeros, humedad, disolventes...) por los puertos de venteo de la extrusora. Las máquinas pueden equiparse con múltiples orificios de ventilación por vacío o atmosférico.

Para la extracción de volátiles es necesario que se produzca una descompresión del material donde antes de la zona de desgasificación los husillos estén llenos y en el vacío atmosférico estén a un bajo nivel de llenado.

Si el diseño de husillo o las condiciones de proceso no son las adecuadas se puede salir el material por las aberturas de ventilación de la extrusora o el pellet puede tener volátiles ocluidos dentro que se traducen en poros.



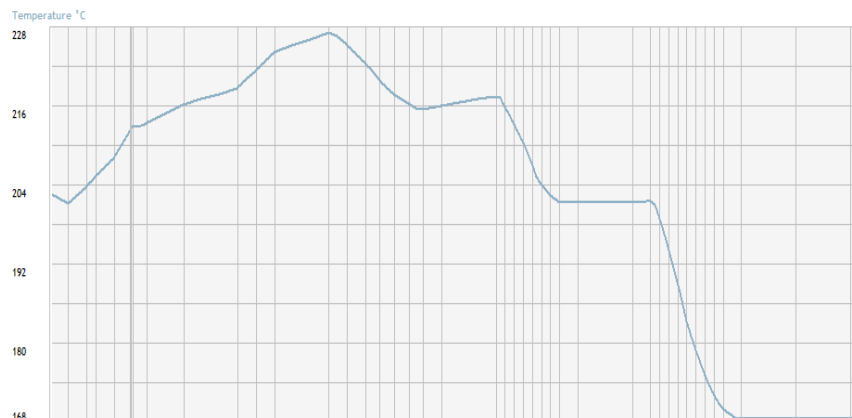
**Figura 117. Puertos de desgasificación**



**Figura 118. Grado de llenado**

Temperatura de fundido a lo largo del husillo.

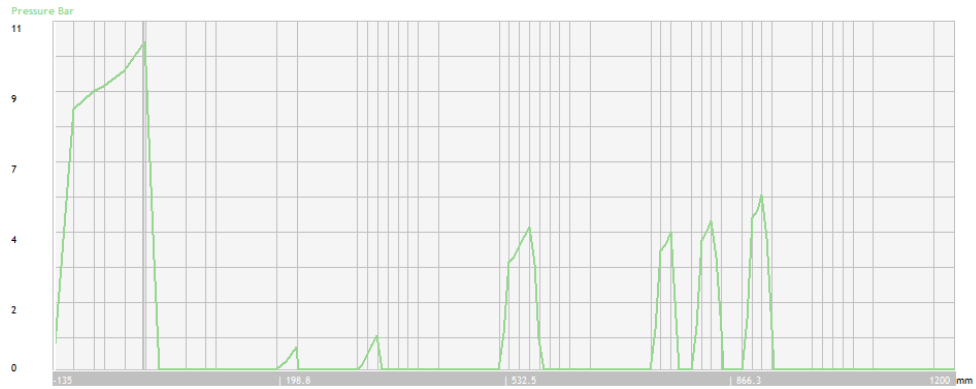
La temperatura de fundido del material a lo largo del husillo es importante porque es posible detectar si existen picos de temperatura que podrían degradar el material, especialmente en zonas de mezcla. En los procesos productivos generalmente se mide la temperatura de fundido a la salida de la extrusora pero no durante el procesado. Como variable respuesta es posible medir la temperatura del barrel, pero la temperatura de la masa fundida puede ser bastante superior a este dato ya que adicional al aporte de calor, el material aumenta su temperatura por efecto de la cizalla.



**Figura 119. Temperatura de fundido local**

Presión total y presión local

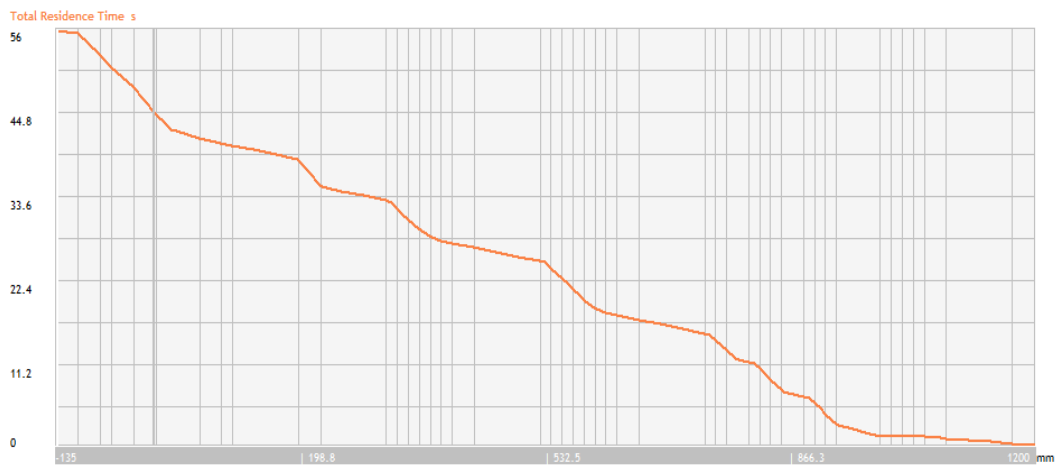
La presión local y presión a la salida de la máquina es una medida indirecta de la viscosidad del material y del grado de llenado. La presión local aumenta en las zonas de mezcla y cuanto mayor sea el llenado en una zona determinada mayor será la presión local. En función de los elementos de mezclados y la longitud de la zona se observan picos de mayor intensidad o de mayor anchura (ver Figura 120).



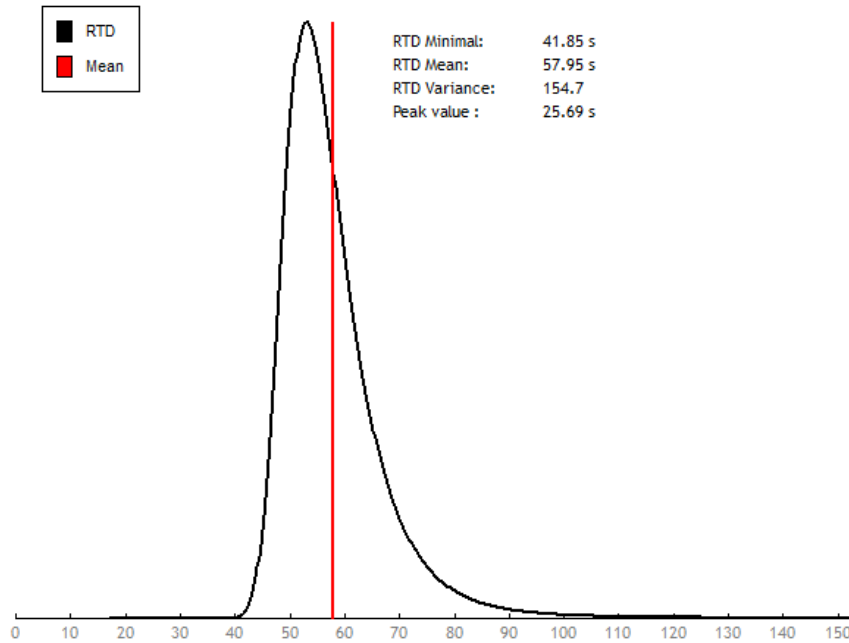
**Figura 120. Presión local**

Tiempo de residencia

El tiempo de residencia mide el tiempo que el material permanece dentro de la extrusora y puede medirse localmente a lo largo del husillo (Figura 121) o como una campana de Gauss donde el tiempo de residencia es una distribución de tiempos de residencia (Figura 122). En este último caso el inicio de la curva corresponde al inicio de salida del material por la boquilla, el punto máximo de la curva donde el material alcanza el régimen estacionario y la caída del se corresponde al tiempo que tarda el material en salir completamente de la extrusora. Esta información es útil en extrusión reactiva, donde se lleva a cabo una reacción química que requiere de un tiempo para llevarse a cabo, en escalados industriales cuando es necesario cambiar de equipamiento, o para mejorar la producción de un proceso de fabricación y garantizar que el tiempo de residencia es adecuado para el material que se está procesando.



**Figura 121. Tiempo de residencia local.**



**Figura 122. Distribución de tiempos de residencia.**

Para la medida de cada una de estas variables insitu sería necesario colocar sondas de presión y temperatura a lo largo del husillo o trabajar con sensórica avanzada mediante sistemas indirectos de detección para medir el tiempo de residencia o el grado de llenado mediante laser, colorimetría, ultrasonidos, FTIR, RMN o RAMMAN.

## 5. Descripción del experimental.

Para el diseño experimental se han seleccionado 3 formulaciones que van destinadas a diferentes aplicaciones. En primer lugar, un compuesto de polipropileno cargado con talco para aplicaciones de automoción, un compuesto de PA6 con fibra de vidrio y PC/ABS ignífugo para aplicaciones eléctrico-electrónicas. Con ello se cubren diferentes sectores de aplicación que son representativos en la fabricación de compuestos plásticos.

### 5.1 Materiales

#### 5.1.1 Base polimérica

- Promyde B24, Promyde. Poliamida 6 (PA6), viscosidad relativa 2,40.
- Bayblend T85, Bayer Material Science. PC/ABS, índice de fluidez volumétrico (260 °C; 5 kg) 12 cm<sup>3</sup>/10min.
- Isplen PP070Y1EPP, Repsol. Polipropileno homopolímero (230°C/2,16kg) 12 g/10 min.

#### 5.1.2 Cargas

- HydroStrand® 258 chopped strands, Owens Corning. Fibra de vidrio, 10 micras de diámetro y 3 mm de longitud.
- Luzenac 20MO, Imerys. Talco, 5 micras.
- Fyrolflex™ RDP, Resorcinol bis (diphenyl phosphate). Ignífugo no halogenado.

### 5.2 Metodología

La extrusión de los compuestos se ha llevado a cabo en un extrusora de doble husillo co-rotativa Leistritz SME 27MAXX, de 27 mm de diámetro de husillo y una relación L/D de 44. La alimentación del material en granza se realiza mediante un dosificador gravimétrico. A la salida de la extrusora los hilos son enfriados en un baño de agua y posteriormente son granceados en una peletizadora IPS-60. La fibra de vidrio se incorpora en el segundo side feeder para evitar su ruptura al igual que los ignífugos para evitar su degradación. El talco se alimenta en el primer side feeder para conseguir un buen grado de mezcla.

El diseño de husillo empleado se ha diseñado con el programa de simulación de husillos Ludovic 6.1.0 y está compuesto de zonas de mezcla dispersiva y distributiva para garantizar un buen grado de mezclado (Figura 123).

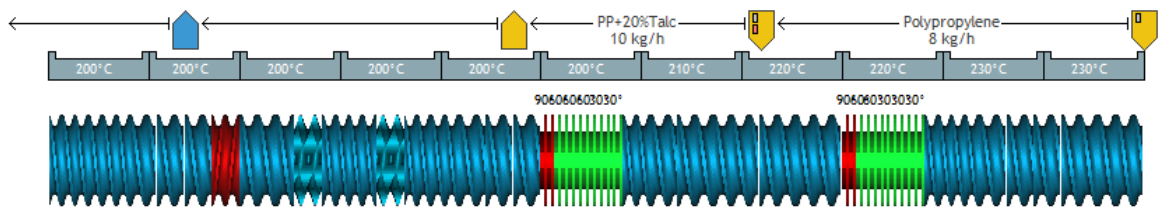


Figura 123. Diseño de la configuración de husillo.

Las condiciones de procesado son las siguientes:

Tabla 8. Parámetros de procesado de extrusión de compuestos en extrusora de doble husillo co-rotativa SME 27MAXX.

Parámetros de procesado	
Temperatura (°C)	230-200 (polipropileno)
	240-260 (PC/ABS)
	230-250 (PA6)
Producción (kg/h)	10
Velocidad de giro del husillo (rpm)	200

Las formulaciones obtenidas y las variables respuesta del proceso se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Muestras extruidas en base PA6 y cargas cerámicas.

Nº Muestra	Descripción	Torque %	Presión (bar)	Tm (°C)	SME (kW·h/kg)
PRO17-0173-01	PA6+10% HydroStrand® 258	25	5	245	0.125
PRO17-0173-02	PA6+30% HydroStrand® 258	32	8	247	0.160
PRO17-0173-03	PC/ABS+20% FyrolflexTM	30	10	253	0.150

PRO17-0173-04	PC/ABS+30% FyrolflexTM	32	12	255	0.160
PRO17-0173-05	PP+20% Luzenac 20MO	40	24	212	0.200
PRO17-0173-06	PP+40% Luzenac 20MO	62	32	223	0.310

En la Figura 124 se recogen imágenes del proceso de fabricación de los compuestos.

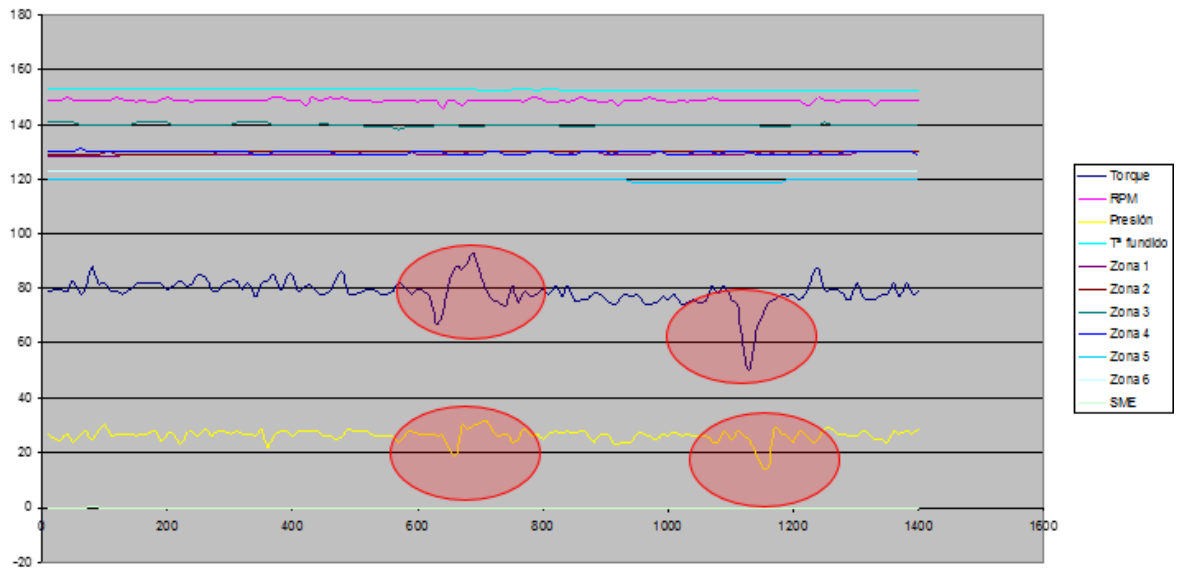


Figura 124. Extrusión de compuestos en la extrusora Leistritz SME 27MAXX.

**6. Determinación de producto/material óptimo (criterios empleados o sistemática de control para verificar calidad del material o producto).**

Como se ha citado anteriormente los parámetros de control empleados para comprobar la estabilidad del proceso de compounding son el torque, la presión, la temperatura de fundido y la energía mecánica específica (SME). Estas variables han permitido controlar el proceso en términos de consistencia y reproducibilidad. La falta de consistencia muestra errores que aparecen en la producción de un mismo lote y la falta de reproducibilidad los errores entre diferentes lotes.

En la Figura 125 se muestra una variación puntual del torque y de la presión que puede influir en la falta de consistencia. Gracias al control del proceso es posible no recoger el material que presenta diferentes variables respuesta y continuar con la recogida cuando las condiciones de procesado sean estacionarias para que el lote tenga propiedades homogéneas.

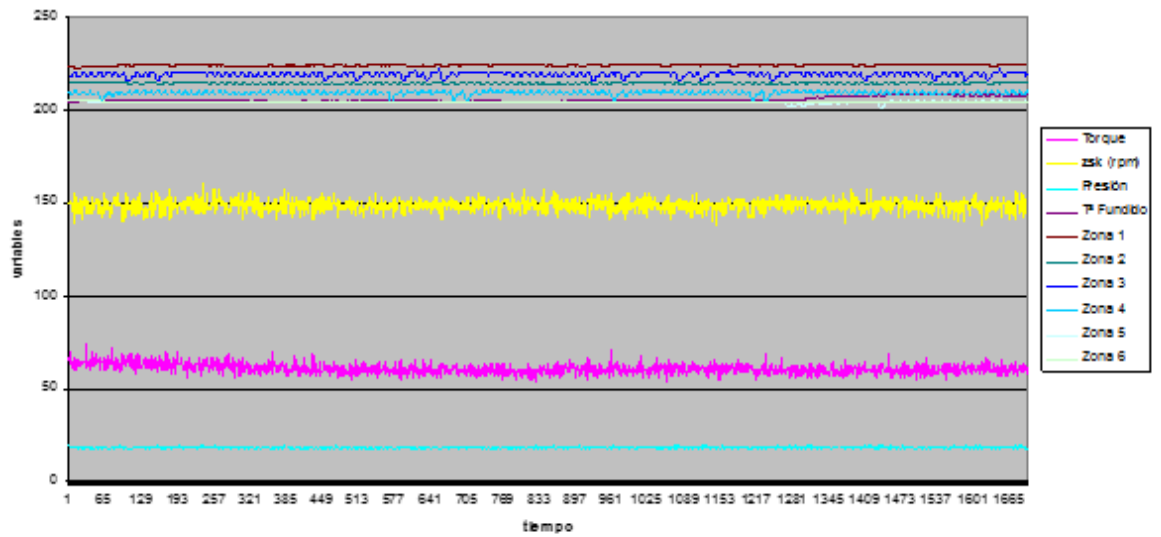


**Figura 125. Variables respuesta proceso de extrusión.**

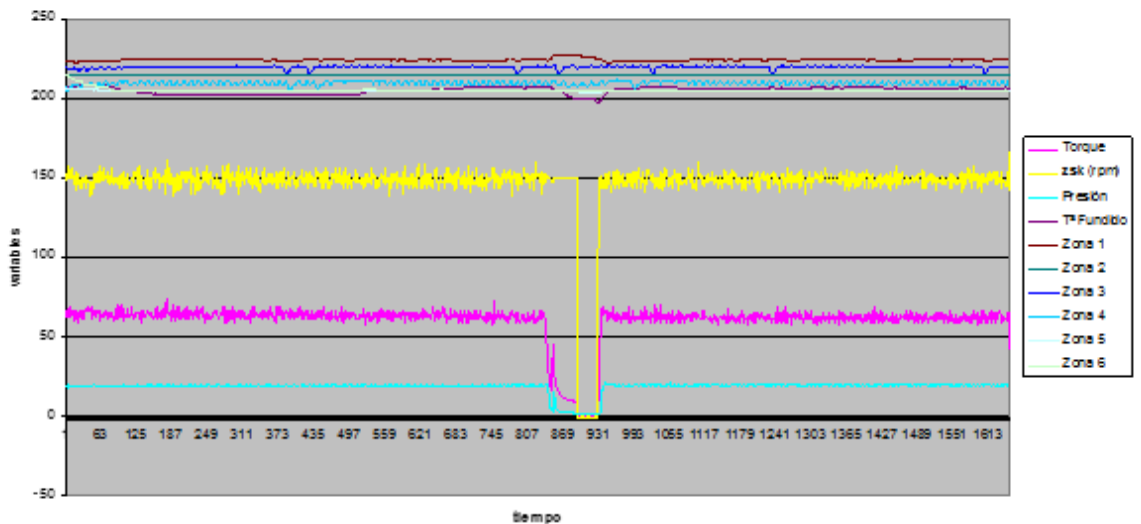
Por otro lado, en la Figura 126 se compara un proceso de extrusión obtenido en días distintos y como puede observarse las variables respuesta son del mismo orden de magnitud con lo que puede predecirse que las propiedades del material serán iguales y por tanto habrá trazabilidad/reproducibilidad.

Si las variables respuesta son diferentes es indicativo de que las condiciones de procesado han cambiado y la causa puede ser un error en el montaje del husillo, condiciones del proceso distintas (producción, temperaturas etc.), desgaste de los elementos de husillo o barrels que afectan al mezclado, o problemas con los dosificadores.

**Extrusión día 1**

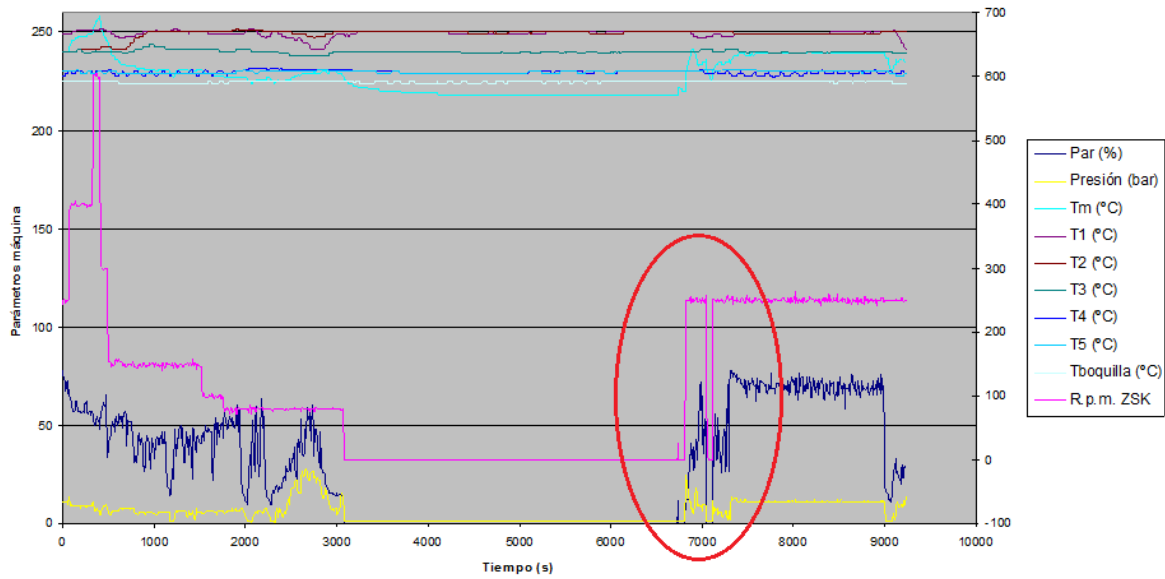


**Extrusión día 2**



**Figura 126. Variables respuesta del proceso de extrusión de dos días distintos de producción.**

En la puesta en marcha de una prueba, las variables respuesta oscilan hasta conseguirse el régimen estacionario y es el momento de la recogida, como puede apreciarse en la Figura 127 las variables respuesta no son estables hasta pasado un tiempo donde el régimen se considera estacionario y es el momento donde se empieza a recoger material. Gracias a este control es posible garantizar que la formulación tiene la composición correcta. Por otro lado, en la parte inicial de la gráfica se observa que las variables respuesta no son estables como consecuencia de un fallo en el dosificador. Gracias al control del proceso se ha conseguido detectar el error que de no haber sido controlado hubiera pasado inadvertido.



**Figura 127. Variables respuesta, puesta marcha prueba.**

### 7. Mejoras propuestas para el proceso probado, asociadas a incorporación de sensores, monitorización, medidas online, visión artificial, etc.

Dentro de las tecnologías facilitadoras de la industria 4.0, existen algunas más estrechamente relacionadas con las mejoras de los procesos productivos y otras con la gestión de los datos y tareas de gestión.

Desde el punto de vista de impacto inmediato en los resultados de las empresas formuladoras de plásticos, las tecnologías facilitadoras a integrar podrían ser las siguientes:

- Implementación de sistema de sensorización en línea (sensor de presión, par motor y temperatura de fundido. Generalmente las empresas productoras no cuentan con un sistema completo de sensorización en línea por lo que es difícil llevar un estricto control del proceso.
- Simulación de extrusión de doble husillo: puede minimizar el número de pruebas para la obtención de una fórmula, poder prever producciones, optimizar husillos o realizar escalados industriales, minimizaría costes de desarrollo (tanto en materia prima como, en energía o recursos humanos) y reduciría el “time to market”.

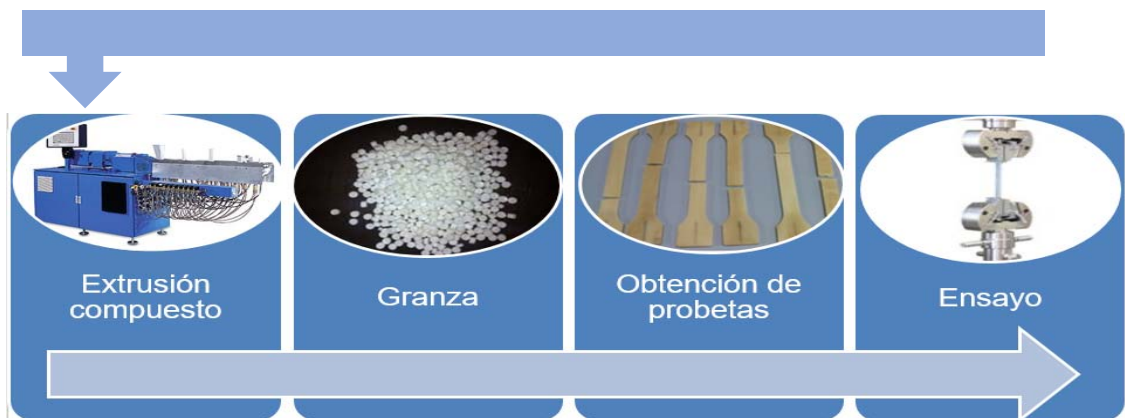
A medio y largo plazo la implantación de “Big Data” y sensorización avanzada permite aumentar la competitividad de la empresa.

El “Big Data”, es un conjunto de datos o combinaciones de conjuntos de datos cuyo tamaño (volumen), complejidad (variabilidad) y velocidad de crecimiento (velocidad) dificultan su captura, gestión, procesamiento o análisis mediante tecnologías y herramientas convencionales. En el proceso de extrusión es indispensable un sistema de captación de datos, almacenamiento y análisis de datos. La recogida y almacenamiento de las variables respuesta del proceso de extrusión permite generar un histórico del proceso asociado a un lote o a un grado concreto de material, de forma que pueda consultarse en caso de reclamaciones o faltas de conformidad. Por otro lado, la recogida de datos global de la fábrica incorporando, no sólo los datos del proceso de fabricación, sino también el tipo de extrusora, variables respuesta de cada máquina, formulaciones, turnos, operarios, días de la semana, fecha de fabricación, entradas de materias primas, consumo de agua, consumo de luz etc. permite generar un modelo estadístico que mejore la productividad, la velocidad de respuesta ante un hecho inesperado, por ejemplo la parada de una máquina o un dosificador, mejora la calidad y trazabilidad del proceso y detecta el origen de un fallo. Todo esto se traduce en una mejora de la competitividad de la empresa.

La sensorística avanzada, consiste en incorporar sensores para relacionar una señal con una propiedad determinada. Actualmente para la optimización de una formulación es necesario realizar una batería de ensayos para conseguir una propiedad determinada. Generalmente el orden establecido consiste en extruir un material, transformarlo para obtener una probeta y finalmente caracterizarlo (ver Figura 128). En este caso la propiedad se mide fuera del flujo de material que se está procesando (off-line) y el tiempo necesario para la medida puede llevar horas.

En función de lo cerca o lejos que se esté de la propiedad buscada el proceso se repite un número determinado de veces hasta conseguir el objetivo. La situación es análoga para el control de la calidad, es necesario extraer muestras de cada lote para controlar la calidad. En este caso el tiempo necesario para optimizar un proceso de fabricación se alarga y reduce drásticamente la velocidad de respuesta en caso de una no conformidad dado que y en ese momento toneladas de material cuya calidad se está muestreado puede haber sido ya procesados.

8. Adicionalmente cuando se testea una pequeña muestra fuera de línea, esta puede no ser representativa de las propiedades del compuesto global, obteniendo un resultado engañoso. Por otro lado, el procesado de plásticos lleva asociado una historia que va a afectar directamente a las propiedades del material. Esta historia depende del estrés, la tensión, la velocidad de deformación y la temperatura de fundido. Las evaluaciones estándar "fuera de línea" (es decir, en laboratorio) pueden, por lo tanto, ser engañosas, particularmente si las pruebas fuera de línea implican historias significativamente diferentes de las encontradas en el procesado, o si las características moleculares del polímero cambian en las pruebas.



**Figura 128. Pasos de optimización de un proceso de compounding**

9. La sensorización en línea es una herramienta en tiempo real para el diagnóstico y control de procesos que permite reducir el tiempo necesario para optimizar una formulación y controlar la calidad del proceso en línea tomando acciones correctoras "in situ" sin necesidad de detener el proceso.
10. La monitorización del proceso tiene como objetivo proporcionar una evaluación precisa, preferiblemente en tiempo real, de propiedades específicas del polímero, como la reología o la composición. Además, puede proporcionar un indicador sensible de la estabilidad del proceso, que incluye la variación de lote a lote y puede proporcionar la base para un proceso estadístico significativo.
11. El rango de técnicas de medición que se pueden aplicar al fundido en extrusión incluye reología, óptico, ultrasónico, eléctrico y espectroscópico (IR, UV, dieléctrico y RMN). Estos se utilizan para la medición de propiedades de flujo, estructura del polímero, morfología y composición, concentración

de aditivos, dimensiones, apariencia, color y consistencia de la producción. La toma de medidas puede ser in-line y on-line la diferencia principal se encuentra en la ubicación de sensor.

**In-line:** La medición en línea tiene como objetivo obtener datos del flujo del proceso principal, preferiblemente sin perturbar este flujo. Esto puede permitir que se muestree una proporción mucho mayor de material, pero tiende a dar solo una medida puntual única, bajo las condiciones de proceso correspondientes. Los dispositivos en línea actuales se utilizan para medidas reométricas, ópticas (incluido el color y la composición), dieléctricas, ultrasónicas, IR-cercano, UV y medidas de conductancia.

Un ejemplo específico de es un reómetro en línea, donde la velocidad de cizalla se define por la velocidad de flujo del proceso y la temperatura de fusión por las condiciones del proceso, por lo que la medición es normalmente no isotérmica.

La espectroscopía infrarroja y Raman puede proporcionar información sobre las vibraciones de enlace dentro de las moléculas. Las vibraciones moleculares producen características espectrales características en diferentes longitudes de onda en todo el rango espectral, que se puede identificar y asignar individualmente. Estas dos técnicas espectroscópicas proporcionan información complementaria entre sí, relacionándose a la composición química del polímero y la estructura de la cadena del polímero.

La espectroscopía UV -visible y de fluorescencia ha encontrado aplicación para la evaluación de la concentración de aditivos y para la medición de la distribución del tiempo de residencia.

Las mediciones de ultrasonido se basan en la medición de la velocidad del ultrasonido, la atenuación, los coeficientes de reflexión y las señales dispersas en el polímero que se procesa y también se ha explorado para analizar la composición de una muestra y la distribución de tiempos de residencia.

En la Figura 129 puede verse un montaje de una línea con diferentes sensores acoplados para el control del proceso.

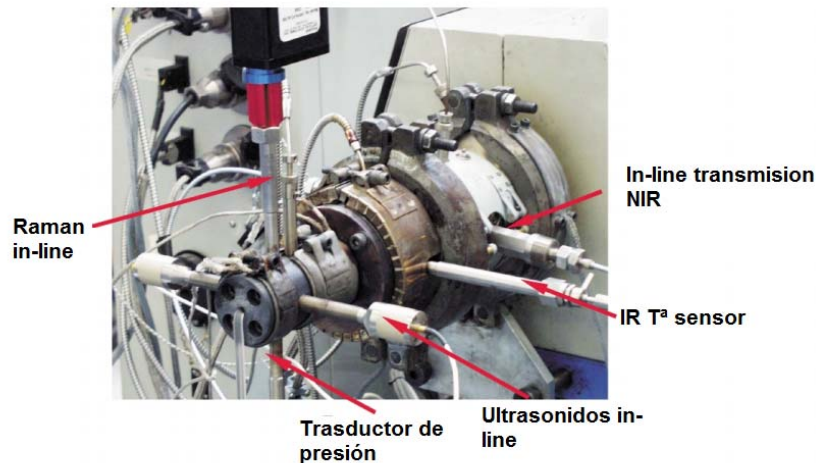


Figura 129. Sensorización en línea<sup>25</sup>

<sup>25</sup> Coates, P.; Barnes, S.; Sibley, M.; Brown, E.; Edwards, H.; Scowen, I. In-Process Vibrational Spectroscopy And Ultrasound Measurements In Polymer Melt Extrusion. Polymer 2003, 44, 5937-5949.

**On-line:** Las mediciones on-line requieren que se desvíe la corriente de polímero fundido del proceso principal (con volúmenes de muestra relativamente pequeños en comparación con los del proceso principal), a menudo utilizando bombas de engranajes (añadiendo tensión e historial de temperatura). Esto provoca un retraso y una perturbación del proceso al eliminar parte del flujo de la corriente principal y también plantea cuestiones sobre qué tan representativa es la pequeña muestra respecto al flujo global del proceso, especialmente cuando la corriente de muestra debe tomarse cerca de la pared del equipo. Sin embargo, permite el acondicionamiento de la muestra, para proporcionar consistencia; también es posible llevar a cabo pruebas en un rango de condiciones. Un ejemplo de un dispositivo on-line es un reómetro capilar, donde las velocidades de deformación se controlan mediante una bomba de engranajes y la geometría de la matriz capilar elegida; la temperatura de fusión de la muestra puede controlarse también.

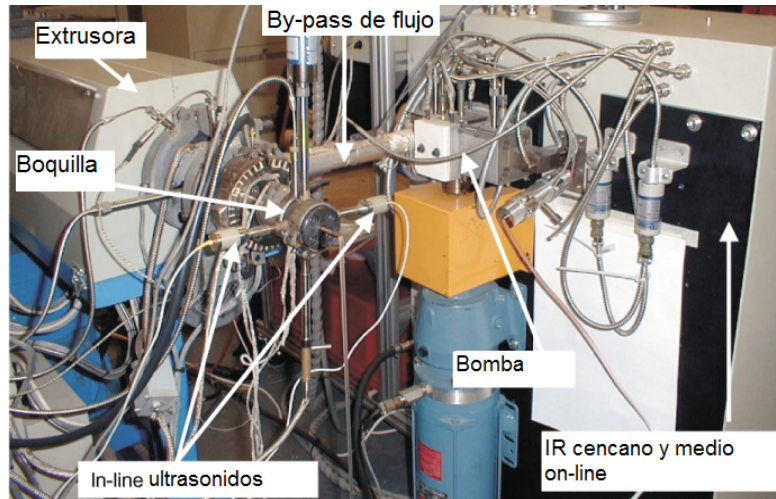


Figura 130. Montaje equipamiento de medidas on-line<sup>25</sup>.

## Conclusiones

Para la actualización de las empresas a la industria 4.0 es necesario partir de una **concienciación de las mismas**, que las empresas sean conocedoras de la revolución que supone para la industria la y las nuevas oportunidades que brinda, los nuevos modelos de negocio y los posibles escenarios que llevan a la **reindustrialización del sector**, pero sin ignorar tampoco los posibles peligros que conlleva como son las brechas de seguridad consecuencia de la convergencia de los sistemas OT/IT.

Resulta importante que conozcan cual es el punto de partida en el sé que encuentra en base a los **modelos de madurez** propuestos y definan su **matriz de priorización** en base a sus condiciones particulares, antes de embarcarse en la implementación, conocer que **estándares** se están proponiendo a nivel europeo en los distintos ámbitos de aplicación de la industria 4.0.

Finalmente, las empresas deberán desarrollar su propia **Hoja de Ruta**, que ser la guía para la digitalización de las empresas del sector, se define a partir de la situación actual de la empresa. La hoja de ruta se concreta en un plan de acciones a emprender por la empresa donde se detallan las tecnologías que se debería incorporar, **valorando y cuantificando** su impacto de forma aproximada, de manera que la empresa tenga un criterio objetivo para decidir su adopción, y en qué momento debería hacerlo. Y ayude a identificar oportunidades en la generación de nuevos productos o servicios.

Se definieron las acciones a realizar para favorecer el desarrollo de la industria 4.0 a partir de las acciones exitosas identificadas y de los resultados parciales obtenidos en las pruebas ejecutadas en planta, con los principales ámbitos de mejora identificados, permitió ver para cada proceso de transformación los principales **puntos de mejora**, así como de la retroalimentación obtenida en él acerca del grado de digitalización del sector transformador del plástico en la Comunitat Valenciana.

## Tabla de figuras

Figura 1. Convergencia OT/IT Fuent: LNS Reseach.....	5
Figura 5. Comparativa de los diferentes modelos de madurez.....	10
Figura 6. Proceso para el Estudio de caso.....	11
Figura 7. Etapas de desarrollo para la industria 4.0. Fuente: Acatech.....	12
Figura 8. Áreas estructurales - índice de madurez. Fuente: Acatech.....	13
Figura 13. Estructura del modelo de madurez PwC.....	14
Figura 14. Ejemplo de la autoevaluación- diagrama radar. Fuente: PwC.....	16
Figura 15. Ejemplo de la autoevaluación- Nivel de madurez. Fuente: PwC.....	16
Figura 16. Modelo de madurez. - PwC.....	17
Figura 17. Estructura RAMI 4.0.....	19
Figura 18 Resumen ISA -95 Fuente: HMS.....	20
Figura 19. Modelo conceptual - Administration Shell. Fuente: Plattform Industrie 4.0.....	21
Figura 20. Visionado de la información. Fuente: Plattform industrie 4.0.....	22
Figura 21. Modelo industrial 4.0. Fuente EtherCAT.....	23
<i>Figura 4. Modelo de Hoja de Ruta.....</i>	<i>30</i>
Figura 22 - Sectores en la industria del plástico.....	32
Figura 23 - Envases de PP empleados para el sector de la alimentación.....	32
Figura 24 - Micrografía de una mezcla PC+ABS. Podemos observar la heterogeneidad en la mezcla de los dos componentes, cada uno con sus propiedades singulares.....	33
Figura 25 - Piezas de automoción fabricadas en PC+ABS.....	33
Figura 26 - Inyectora KraussMaffei KM 160 EX (160 TN), Inyectora con una unidad para la inyección.....	33
Figura 27 - <i>Dosificador MORETTO DPM 24X instalado en la inyectora KRAUSS MAFFEI.....</i>	<i>35</i>
Figura 28 - <i>Dimensiones del dosificador MORETTO DPM 24X.....</i>	<i>36</i>
Figura 29 - <i>Atemperador PUCHADES.....</i>	<i>37</i>
Figura 30 - <i>Deshumidificador MORETTO XD2T utilizado para secar el PC-ABS.....</i>	<i>38</i>
Figura 31 - <i>Molde empleado para el experimental del sector automoción.....</i>	<i>39</i>
Figura 32 <i>Inyectora ENGEL Victory 50 TN, Inyectora con una unidad para la inyección.....</i>	<i>39</i>
Figura 33 - Dosificador MORETTO DPM 02 instalado en la ENGEL.....	41
Figura 34 - Dimensiones del dosificador MORETTO DPM 02.....	42
Figura 35 - Atemperador MORETTO.....	43
Figura 36 - <i>Molde empleado para hacer las pruebas en el experimental destinado para envase alimentario.....</i>	<i>44</i>
Figura 37 - <i>Rangos típicos de temperaturas de procesamiento para algunos termoplásticos.....</i>	<i>45</i>
Figura 38 - <i>Rangos de temperatura de molde óptimos para algunos termoplásticos.....</i>	<i>45</i>
Figura 39 - <i>Espesor de capa fría cuando el fundido entra en contacto con las paredes del molde en función de la velocidad.....</i>	<i>46</i>
Figura 40 - <i>Diferencia de contracciones entre un polímero amorfo y uno semicristalino.....</i>	<i>47</i>
Figura 41 - <i>Grafica tipo de una transición llenado-compactación óptima.....</i>	<i>47</i>
Figura 42 - <i>Gráfica de presión en cavidad con punto de conmutación temprano.....</i>	<i>47</i>
Figura 43 - <i>Grafica con un punto de conmutación tardío.....</i>	<i>48</i>
Figura 44 - <i>Izda.: Área proyectada de la pieza a inyectar. Dcha.: Diferentes fuerzas de cierres para diferentes números de cavidades en el molde. La fuerza de cierre aumenta con el número de cavidades.....</i>	<i>48</i>
Figura 45 <i>Cantidad de material que es aconsejable utilizar como cojín.....</i>	<i>49</i>
Figura 46 - <i>Etapas en el proceso de inyección.....</i>	<i>49</i>
Figura 47 - <i>Presión de inyección en función de: viscosidad del material, recorrido del flujo, velocidad de inyección y espesor de la pieza.....</i>	<i>50</i>
Figura 48 - <i>Presión en cavidad en las diferentes etapas de la inyección.....</i>	<i>50</i>
Figura 49 - Perfiles de postpresión e inyección.....	51
Figura 50 - <i>Perfil de velocidades de inyección.....</i>	<i>52</i>

Figura 51 - Izda.: Perfil de temperaturas de cilindro. Dcha.: Temperaturas de molde y boquilla antirretorno .....	54
Figura 52 - Perfil de dosificación 1 .....	54
Figura 53 - Perfil de dosificación 2 .....	55
Figura 54 - Presión en cavidad.....	55
Figura 55 - Tiempo de ciclo .....	56
Figura 56 - Perfiles de inyección y postpresión .....	57
Figura 57 - Perfil de plastificación y contrapresión.....	57
Figura 58 - Perfil de presiones en fase de llenado y compactación .....	58
Figura 59 - Temperaturas de cilindro y boquilla .....	58
Figura 60 - Temperaturas de cámara caliente.....	59
Figura 61 - Presión en cavidad.....	59
Figura 62 - Tiempo de ciclos inyección.....	60
Figura 63 - Termopares para moldes CORETERM .....	67
Figura 64 - Sensores de presión KISTLER .....	68
Figura 65. Esquema línea de extrusión de film soplado.....	69
Figura 66. Componentes de una línea de extrusión de tubería flexible: a) extrusora monohusillo, b) cabezal, c) y d) calibración por vacío, e) unidad de enfriado, f), g) y h) recogida y bobinado .....	70
Figura 67. Fotos de equipamiento utilizado en línea extrusion film soplado.....	72
Figura 68. Fotos de equipamiento utilizado en línea extrusion tubería.....	73
Figura 69. Bandas calefactoras a lo largo de la camisa en una extrusora. ....	74
Figura 70. Perfil de temperaturas típico en un material plástico convencional.....	74
Figura 71. Relación entre la velocidad de giro de extrusión y la producción obtenida.....	75
Figura 72. Sensor de temperatura para medir la temperatura del fundido.....	76
Figura 73. Cambios significativos al variar los parámetros de entrada. ....	77
Figura 74. Esquema de un proceso de control de bucle cerrado. ....	79
Figura 75. Razones para controlar la presión en fundido.....	79
Figura 76. Beneficios del control de la presión en fundido. ....	80
Figura 77. Ejemplo de fluctuaciones de la presión, producción y dimensiones con el tiempo.....	80
Figura 78. Sensor de presión. ....	81
Figura 79. Colocación de sensor de temperatura y presión al final de la extrusora. ....	82
Figura 80. Kits de extrusión. ....	82
Figura 81. Visual Fecon.....	83
Figura 82. Visualización de los parámetros por zonas. ....	83
Figura 83. Visualización de los parámetros en forma de gráfica. ....	84
Figura 84. Ejemplo de representación gráfica de los datos exportados.....	85
Figura 85. Parámetros representativos del proceso de extrusion de la mezcla de LDPE+LLDPE para la obtencion de film soplado .....	86
Figura 86. Parámetros representativos del proceso de extrusion de tubería de LDPE .....	86
Figura 87. Foto de bomba de engranaje. ....	89
Figura 88. Esquema del flujo en interior de bomba de engranaje. ....	89
Figura 89. Comparativa perfiles de presión en fundido en línea con y sin bomba de engranaje. ....	90
Figura 90. Variación del perfil de espesores.....	90
Figura 91. Esquema montaje de línea de extrusión con bomba de engranaje. ....	91
Figura 92. Esquema montaje de sensores de inspección en línea de extrusión de lámina/film.....	92
Figura 93. Ejemplos de mediciones por equipos de inspección film .....	92
Figura 94. Observación de defectos según tipo de iluminación y tipo de detector. ....	93
Figura 95. Esquema de reometro on line. ....	94
Figura 96. Ejemplo de curva de viscosidad con el tiempo.....	95
Figura 97. Variacion en viscosidad durante extrusión.....	95
Figura 98. Tipo de sensor Sistema EC150 y gráfica registro variacion de temperatura. ....	96
Figura 99. Registro de imagen obtenida con el sensor.....	96
Figura 100. Imágenes de sensores .....	97



Figura 101. Sensores control de espesores alrededor globo film soplado.....	98
Figura 102. Corrección perfil de espesores de film soplado con el tiempo.....	98
Figura 103. Sensores en línea para línea de extrusión de tuberías. ....	100
Figura 104. Pantalla de análisis sensor en línea de espesor y diametro de tubería. ....	100
Figura 105. Colocación de sensores en línea de extrusión tubería. ....	101
Figura 106. Ejemplos de husillos según el material a procesar. ....	104
Figura 107. Movimiento de una Extrusora Amasadora Ko-Kneader Buss.....	104
Figura 108. Husillo y camisa configurables de una extrusora co-rotativa.....	105
Figura 109. Esquema de una extrusora planetaria.....	106
Figura 110. Husillos modulares de una extrusora contra-rotativa. ....	107
Figura 111. Husillos de una extrusora cónica. ....	108
Figura 112. Producción de compuestos termoplásticos en España en 2010. ....	109
Figura 113. Extrusora co-rotativa de doble husillo Leistritz Maxx 27.....	110
Figura 114. Unidad de procesado extrusora de doble husillo co-rotativa <sup>8</sup> . ....	113
Figura 115. Elementos de transporte. ....	113
Figura 116. Elementos de amasado <sup>8</sup> . ....	114
Figura 117. Elementos dentados <sup>8</sup> .....	114
Figura 118. Datos necesarios para la simulación con Ludovic.....	116
Figura 119. Puertos de desgasificación .....	117
Figura 120. Grado de llenado .....	117
Figura 121. Temperatura de fundido local .....	117
Figura 122. Presión local.....	118
Figura 123. Tiempo de residencia local. ....	118
Figura 124. Distribución de tiempos de residencia. ....	119
Figura 125. Diseño de la configuración de husillo. ....	120
Figura 126. Extrusión de compuestos en la extrusora Leistritz SME 27MAXX. ....	121
Figura 127. Variables respuesta proceso de extrusión.....	122
Figura 128. Variables respuesta del proceso de extrusión de dos días distintos de producción. ....	123
Figura 129. Variables respuesta, puesta marcha prueba. ....	124
Figura 130. Pasos de optimización de un proceso de compounding .....	125
Figura 131. Sensorización en línea .....	126
Figura 132. Montaje equipamiento de medidas on-line <sup>9</sup> .....	127