

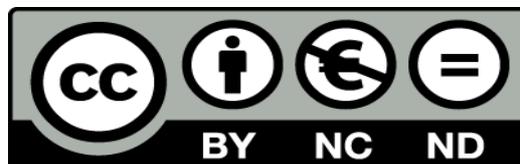


# UNIVERSIDAD DE LA RIOJA

## TESIS DOCTORAL

Título
<b>Técnicas inteligentes para la mejora en la producción de sistemas de estanqueidad en la industria del automóvil</b>
Autor/es
<b>Víctor Javier Muñoz Munilla</b>
Director/es
Fernando Alba Elías y Antonio Bello García
Facultad
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial
Titulación
Departamento
Ingeniería Mecánica
Curso Académico
2014-2015

Tesis presentada como compendio de publicaciones. La edición en abierto de la misma NO incluye las partes afectadas por cesión de derechos



**Técnicas inteligentes para la mejora en la producción de sistemas de estanqueidad en la industria del automóvil**

, tesis doctoral

de Víctor Javier Muñoz Munilla, dirigida por Fernando Alba Elías y Antonio Bello García (publicada por la Universidad de La Rioja), se difunde bajo una Licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 3.0 Unported. Permisos que vayan más allá de lo cubierto por esta licencia pueden solicitarse a los titulares del copyright.

© El autor  
© Universidad de La Rioja, Servicio de Publicaciones, 2015  
publicaciones.unirioja.es  
E-mail: publicaciones@unirioja.es



# UNIVERSIDAD DE LA RIOJA.

Departamento de Ingeniería Mecánica.

---

Programa de Doctorado:  
“Diseño e Ingeniería de Producto y de Procesos Industriales”.

Título:  
*“Técnicas Inteligentes para la Mejora en la Producción de Sistemas de Estanqueidad en la Industria del Automóvil”.*

---

Una disertación dirigida por el  
Prof. Dr. Fernando Alba Elías  
y por el  
Prof. Catedrático Dr. Antonio Bello García,  
y desarrollada por  
Víctor Javier Muñoz Munilla  
a fin de optar al grado de  
Doctor por la Universidad de La Rioja.

Tesis Doctoral defendida en la ciudad de Logroño en Junio de 2015.



## Resumen.

---

El Sector del Automóvil se caracteriza por su extremo dinamismo y competitividad en pos de obtener productos de mayor Calidad y con agresivas políticas de reducción de Costes.

Por esto, uno de los pilares estratégicos o fortalezas de la empresa, en la que el Doctorando de la presente disertación desarrolla su Actividad Profesional, se basa en el fomento de Acciones en el marco de I+D+i, pues se consideran cruciales para reforzar el Nivel de Competitividad, y con esto, identificar a la marca Standard Profil como una empresa de referencia en el Sector.

Así, la necesidad de Innovar en Nuevas Herramientas, Nuevos Productos y Nuevos Procesos representa la filosofía principal en las funciones de la empresa en pos de satisfacer las Necesidades de los Clientes.

De esta forma, el presente trabajo viene a mostrar los desarrollos que se han realizado en la empresa por el Doctorando, hacia unos enfoques temáticos muy específicos durante el periodo de tiempo que comprende la formalización del presente documento de Tesis Doctoral.

- Por un lado, y genéricamente, las herramientas CAE van a servir a los Ingenieros para analizar y simular los diseños, en la forma que permitan valorar sus comportamientos, características, propiedades, viabilidad, y rentabilidad. Así, la finalidad de estas herramientas es la optimizar su desarrollo y minimizar los costos productivos, y reducir al máximo las pruebas para la obtención del producto deseado.

En este caso, en la empresa, se han incorporado diferentes sistemas CAE que trabajan en entornos muy distintos, y así dirigidos a la resolución de problemas muy diferentes. Así, por ejemplo la herramienta MSC.Marc®, es un software de propósito general, y se utiliza para la resolución FEM de problemas Mecánicos de Contacto con Materiales que tienen un comportamiento no-lineal como es el caso de los Elastómeros (aunque también resuelve distintos tipos de problemas: Térmicos, Electromagnéticos, Fluidos, Piezoeléctricos, Electrostáticos, Acústicos, ...).



Además, también se han incorporado programas que trabajan en el área CFD para el tratamiento de Fluidos. Así, se trabaja habitualmente con el Software MoldFlow© de Autodesk, para el Diseño y Simulación del llenado de Moldes con Elastómeros; o el Software Ansys.PolyFlow©, para el Diseño y Optimización de los Utillajes de Extrusión.

Con la experiencia en el manejo de estas herramientas, es factible desarrollar, como se describe en los párrafos que se suceden en la correspondiente Unidad Temática, las Programaciones complejas para la Parametrización de los problemas que los Ingenieros se encuentran habitualmente en las Simulaciones con estas herramientas.

- Por otro lado, la participación en el sistema Productivo de la Empresa, permite comprender la problemática existente en cuanto a la correlación de la información entre los diferentes Equipos y Áreas Productivas que impiden, primero definir una Trazabilidad de los Productos acabados y semiacabados, y segundo establecer una predicción de la Calidad de los Productos.

Esta problemática es muy grave y costosa y, por esto, va a ser importante analizar en profundidad las Metodologías que nos permitan ir incorporando las mejoras en los Procesos y Sistemas de Información que nos ayuden a definir una Trazabilidad y con esto, conocer la Calidad de los Productos en cualquier fase de transformación.



## Índice general

---

Introducción .....	8
Antecedentes.....	8
Motivación y Objetivos. ....	8
Presentación de la Empresa.....	9
Contribuciones. ....	12
Líneas de Trabajo.....	12
Publicaciones. ....	23
Unidad Temática de la Tesis.....	24
Unidad Temática I.	
Desarrollo de Técnicas de Simulación. ....	25
Antecedentes.....	25
El Software MSC.Marc©. ....	25
Trabajo de Simulación Numérica en el área Mecánica que se realiza en la Empresa. ....	26
Primera programación de Parametrización de Bending Circular.....	27
Desarrollo del Programa de Parametrización de Bending como Morphing Lineal. ..	29
Publicación I.....	32
Resumen de la Publicación. ....	32
Formulación del Problema.....	34
Implementación Numérica. ....	36
Conclusiones. ....	38
Publicación II. ....	40
Resumen de la Publicación. ....	40
Formulación del Problema.....	40
Modelado Geométrico .....	42

---



---

Formulación del Documento .....	44
Conclusiones. ....	45
Unidad Temática II. Sensorización Industrial para la Optimización de los Diseños y Procesos Industriales. ....	46
Publicación III. ....	46
Resumen de la Publicación. ....	46
Metodología de Supervisión. ....	48
Aplicación Práctica: Industria de Extrusión de Caucho. ....	50
Conclusiones. ....	53
Resultados y Discusión. ....	55
Conclusiones. ....	57
Bibliografía. ....	58
Publicaciones. ....	63



## Índice de figuras.

---

<i>Figura 1. Imagen de un ejemplo de proceso de Simulación FEM de Bending 3D de puerta Completa. ....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 2. Imagen del Scada en el Dpto. de Mezclas para el Diseño, Control y Supervisión de Compuestos de EPDMs. ....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 3. Imagen de ejemplo del formato de la captura y visualización de los Datos <math>f(t)</math> de Producción. ....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 4. Imagen de ejemplo del Proyector PCA Multivariante de Parámetros de Extrusión y programado en formato ActiveX para visualización desde la Intranet Corporativa. ....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 5. Imagen para mostrar el formato de la DDBB Vectorial con codificación SVG de los Perfiles de Estanqueidad. ....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 6. Imagen del Prototipo desarrollado en la empresa y denominado "ViPer", para la Captura Periférica on-line de los Perfiles de Extrusión. ....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 7. Imagen de la Programación en Formato ActiveX para la verificación en tiempo real del trabajo de Sensor ViPer. ....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 8. Imagen del sistema tradicional de control seccional basado en un Proyector Óptico para la comprobación visual de las Secciones de Extrusión. ....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 9. Imagen del nuevo Sensor desarrollado para la Captura Digital de la Sección Completa de las Hileras de Extrusión. ....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 10. Imagen de un ejemplo de Simulación CFD de Inyección de Moldes con MoldFlow. ....</i>	<i>20</i>

---



---

Figura 11. Imagen del Scanner 3D y un ejemplo de captura de un Utillaje de Extrusión. ....	21
Figura 12. Ejemplos las Simulaciones tipo que se realizan en el ámbito CFD mediante Ansys.PolyFlow. ....	22
Figura 13. Ejemplo de los tipos de Simulaciones Mecánicas FEM que se realizan con MSC.Marc: Simulación 2D, y Simulación de Bending 3D.....	26
Figura 14. Imagen que describe conceptualmente la Parametrización de Bending Circular.....	28
Figura 15. Imagen del aspecto de la Rutina en VB.Net para la Parametrización de Bending Circular. ....	29
Figura 16. Imagen del aspecto de la Rutina en VB.Net para la Parametrización de Bending como Morphing Lineal. ....	30
Figura 17. Imagen que describe conceptualmente el tipo de transformación que se realiza con el programa de Bending como Morphing Lineal con Slerping. ....	31
Figura 18. Imagen que correlaciona el comportamiento de un Elastómero de Esponja entre su deformación real y su Simulación. ....	39
Figura 19. Imagen que muestra distintas aproximaciones a distintos Modelos HiperElásticos. 41	
Figura 20. Imagen que muestra la calidad del Modelo mediante adoptado en una Simulación mediante la correlación con el ensayo real.....	42
Figura 21. Imagen que muestra un Ejemplo de correlación entre un ensayo en Laboratorio y la Simulación correspondiente. ....	42
Figura 22. Imagen que muestra a partir del ViPer, la correlación existente entre un defecto en la alimentación de una extrusora y el cambio seccional del Perfil. ....	54

---



## Introducción

---

### Antecedentes.

En el área del Diseño y Fabricación de Sistemas de Estanqueidad para el Sector del Automóvil, existen herramientas de Ingeniería que permiten predimensionar el comportamiento de los perfiles de elastómeros antes de su implantación en las Líneas Productivas.

De esta forma, existen cada vez más, distintas aplicaciones que permiten implementar el comportamiento No Lineal de estos materiales Elastómeros y Esponjas. Sin embargo, son programas de propósito general, y donde no es posible adaptarse a los problemas particulares que pueden darse en cada sector productivo.

También, estudiando en detalle el desarrollo productivo concreto de la Multinacional en la que desarrolla la actividad profesional el Autor del presente documento, se observa el Sistema de Control en lazo abierto, donde no existe realimentación productiva de Información relativa al estado de los Equipos, la Calidad del Producto y de los Sensores que intervienen en los Procesos.

### Motivación y Objetivos.

Una de las principales Motivaciones que ha propulsado el estudio sobre los trabajos que se describen en el presente documento y en la que todavía existen líneas de trabajo abiertas, se inician en el Trabajo para la obtención del Diploma de Estudios Avanzados que dan acceso a la formalización de la Presente Tesis Doctoral.

Así, en el año 2000 a través de una Beca de Investigación del Dpto. de Ingeniería Mecánica de la Universidad de La Rioja (Proyecto "SATEM" de Investigación, para diseñar un "Sistema de Ayuda a la Concepción del Utillaje en la Extrusión de Perfiles para la Industria del Automóvil") en colaboración con la empresa llamada en dicha fecha "BTR" (actualmente con la denominación empresarial de "Standard Profil") ha propiciado el contacto con dicha empresa, y donde, hasta la actualidad, se ha desarrollado la actividad profesional del Autor del presente trabajo.

Desde entonces, dicho Autor entró a formar parte del Dpto. de Ingeniería de la Empresa, momento a partir del cual se han sucedido numerosos trabajos para la



---

Optimización de los diversos Procesos que se desarrollan en dicha empresa para el Diseño y Fabricación de Sistemas de Estanqueidad.

Así, aunque no se trabaja de forma específica en un área concreta, esta diversidad de trabajos ha propiciado la formación de un enfoque global donde se correlacionan los numerosos trabajos que se desarrollan en la empresa a través del Dpto. de Ingeniería, siempre con un Objetivo claro, el desarrollo de Herramientas que permitan mejorar los Procesos Productivos.

*Nota del Autor:*

“Es representativo indicar que, frente a la Motivación Positiva para incentivar el desarrollo creativo de la Investigación por la figura del Doctor D. Joaquín Ordieres y su Equipo de Colaboradores y Compañeros de la Universidad de La Rioja, y a los que siempre estaré eternamente agradecido; sorprendentemente, el Dpto. de IT de la empresa ha efectuado un papel constante de Motivación Negativa por los numerosos inconvenientes que han aportado en este camino, que me han desgastado física y emocionalmente y que acotan cada vez más el ámbito de aplicación, pero sobre la cual pienso, no merece la pena profundizar”.

## Presentación de la Empresa.

La empresa en la que el autor del presente documento desarrolla su actividad profesional, se menciona de distinta forma a lo largo de los párrafos que se suceden a continuación. Sin embargo, durante los cincuenta años que cumple la Empresa en este año 2015, se han sucedido distintos cambios de marca Corporativa que es necesario mencionar para realizar un mejor seguimiento del texto.

Standard Profil, S.A. dedica su actividad productiva al diseño y fabricación de juntas de estanqueidad que se incorporan en los automóviles, y que permiten aislar el interior del mismo del ruido, polvo y agua del exterior.

La Compañía obtiene mediante el proceso de co-extrusión en materiales elastómeros y elastómeros termoplásticos distintas geometrías de perfiles, que más tarde y tras diversos procesos de manipulado, se incorporan a los vehículos de los distintos fabricantes.

Buena parte de los productos incorporan igualmente materiales rígidos como el acero, aluminio o fibra de vidrio. Además, en las largas líneas de producción se aplican distintos tratamientos adicionales a la extrusión, como pueden ser la configuración de superficies flockadas o superficies con aplicación de recubrimientos para garantizar la funcionalidad de los perfiles de estanqueidad.

La demostrada experiencia de la empresa en este sector, la sitúa como principal proveedor de productos para una amplia variedad de fabricantes de automóviles, a



la vez que la implica la necesidad de investigar hacia nuevos productos y procesos con carácter innovador en el área de fabricación de juntas de estanqueidad en busca de la mejora continua y en la calidad del producto final.



El origen de la sociedad data del año 1965 como “Perfiles y Moldeados del Caucho” (Permolca), localizada en Logroño como proveedora de sistemas de estanqueidad para el Sector del Automóvil.

En el año 1987, el grupo norteamericano Sheller-Globe Corporation adquiere la empresa.



En 1990 la firma británica BTR se hace con el control de Permolca.



En el año 2000 la sociedad de Capital-Riesgo CVC adquiere la compañía y la incorpora al grupo Metzeler Automotive Profile Systems.

Durante los años 2006 y 2007, CVC desinvierte en el sector y se disgrega el grupo Metzeler en Europa.

La desinversión en las plantas españolas llevó en 2007 a la entrada en el capital social de la compañía de nuevos accionistas:

TEKNIA Manufacturing Group SL, empresa española fabricante de suministros para el Sector de la Automoción, con plantas en España, Brasil, Polonia y Chequia.

Tafripol S.L., también española, e instrumento de inversión de un empresario riojano.



En julio de 2008 la empresa actualiza su identidad corporativa una vez realizado el cambio de denominación social por la marca comercial Kaufil Sealing Technologies S.A.



En el año 2012 la Multinacional del Sector para el diseño y fabricación de Sistemas de Estanqueidad, Standard Profil, S.A., adquiere Kaufil Sealing Technologies, S.A.

Standard Profil se configura como el segundo mayor proveedor de Sistemas de Estanqueidad para el Sector del Automóvil en Europa por volumen de ventas, emplea aproximadamente a 6500 personas y opera 12 plantas de producción (incluyendo Joint Ventures) en Turquía, España, Marruecos, Rusia, India, Sudáfrica y China.

*Nota del Autor:*

“Además, a nivel personal, aprovecho la ocasión para agradecer a la Empresa la confianza depositada en mí durante los años que formo parte de ella, y para la cual puedo asegurar nuevos éxitos derivados de las Investigaciones que se están desarrollando durante los últimos años en la empresa”.

## Contribuciones.

### Líneas de Trabajo.

Entre las Contribuciones del Programa se pueden establecer Cronológicamente las Líneas de Trabajo para comprender mejor la estructura Integral de este desarrollo profesional.

- El trabajo inicial comienza con un estudio de los Materiales Elastómeros para iniciar los primeros trabajos de Simulación Numérica en la rama CFD (Computational Fluid Dynamics). Así, durante la Beca de Investigación realizada en el año 2000 se inician los primeros trabajos en la Simulación de los Procesos de CoExtrusión de los Materiales Elastómeros que se suceden en el trabajo de Conformado de los Perfiles de Estanqueidad.

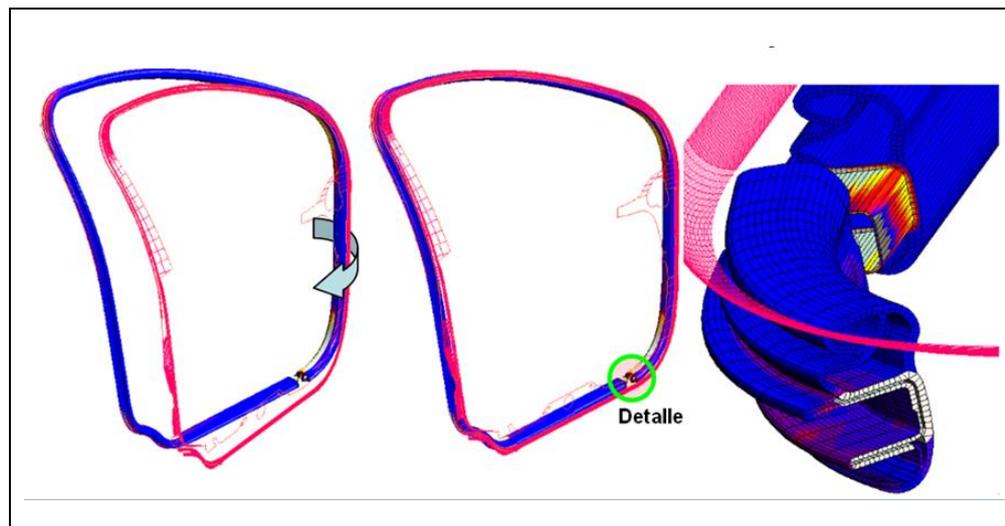


Figura 1. Imagen de un ejemplo de proceso de Simulación FEM de Bending 3D de puerta Completa.

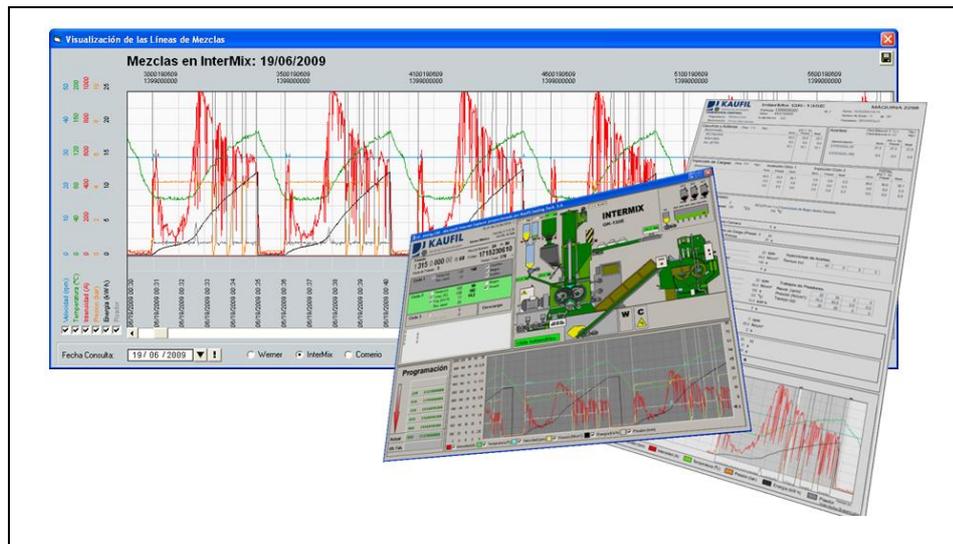
Estos estudios iniciales nos permitieron conocer el Estado del Arte de las Herramientas de Ingeniería en el ámbito CFD en dicho momento, con las limitaciones Técnicas en el tratamiento de los Compuestos Elastómeros que se utilizan en la empresa.

Estos trabajos han servido para dar forma y presentar en año 2001 el Trabajo de Investigación para obtener el Diploma de Estudios Avanzados.

Esta Colaboración entre Universidad-Empresa ha permitido la incorporación a la empresa del autor del presente documento donde

desde un punto de vista de acceso a la Información, se favorece la continuidad del proceso Investigador centralizado es esta área Productiva.

- A partir de entonces, se estudia la implementación que se realiza en la Empresa de las Técnicas de Simulación Mecánica en la adaptación funcional de los Sistemas de Estanqueidad, donde se plantean optimizaciones en el conformado de los Perfiles en casos de Simulaciones complejas 3D.



*Figura 2. Imagen del Scada en el Dpto. de Mezclas para el Diseño, Control y Supervisión de Compuestos de EPDMs.*

Así, estos estudios dan origen al inicio de los Procesos de Parametrización de los Procesos de Bending para asegurar el correcto funcionamiento de los Sistemas de Estanqueidad.

Inicialmente, se Parametrizaron procesos sencillos de Bending con adaptación matemática del desarrollo de arcos circulares con trabajo en distintos planos del triedro.

Más adelante, se Parametriza el desarrollo completo de las curvas que definen las líneas de cierre donde se proyecta la instalación de los Perfiles de Estanqueidad. De esta forma, se habilita mediante Morphing Lineal, y de forma novedosa en el Sector, la Adaptación FEM con MSC.Marc de los Perfiles de Elastómeros a la forma de las zonas a proteger y, en los casos donde se requiera, acoplar movimientos de cierre como sucede en las juntas que se instalan en Puertas y Portones de los Vehículos.

Esta Programación ha dado origen a dos Publicaciones Técnicas de distinta índole: Por un lado, con el Título “*Finite element analysis of the hyper-elastic contact problem in automotive door sealing*” donde se explica, cómo se acomete este trabajo Matemático de Parametrización de la Simulación; y por otro lado, con el Título “*A simulation method to estimate closing forces in car-sealing, rubber elements*”, donde se analizan los distintos métodos de deformación de los Perfiles de Estanqueidad y la importancia tensional que se observa con la Parametrización propuesta respecto al caso real.



Figura 3. Imagen de ejemplo del formato de la captura y visualización de los Datos  $f(t)$  de Producción.

- Además, se realizan mejoras en el Área de Mezclas con la Programación del Scada de Mezclas donde se Supervisan los procesos productivos de las numerosas Fórmulas de Elastómeros que más tarde se procesarán en las líneas de CoExtrusión de la Empresa. Toda esta información registrada en las correspondientes Bases de Datos ha permitido en colaboración con la Universidad de la Rioja, el Estudio en Minería de Datos para la Predicción de Parámetros característicos de los distintos Compuestos Elastómeros de Macizos y Esponjas que se diseñan y fabrican en la Empresa.
- También, se Estudian los Procesos Productivos y se configura el motor de Captura de Datos de los Procesos Productivos del Conformado por CoExtrusión de Elastómeros como complemento a las necesidades de Sensorización que, como se mostrará más adelante, y que además de ser vitales para el Control de los Procesos, van a ser necesarias como

Parámetros de Entrada las Simulaciones Numéricas en el ámbito de cálculo CFD.

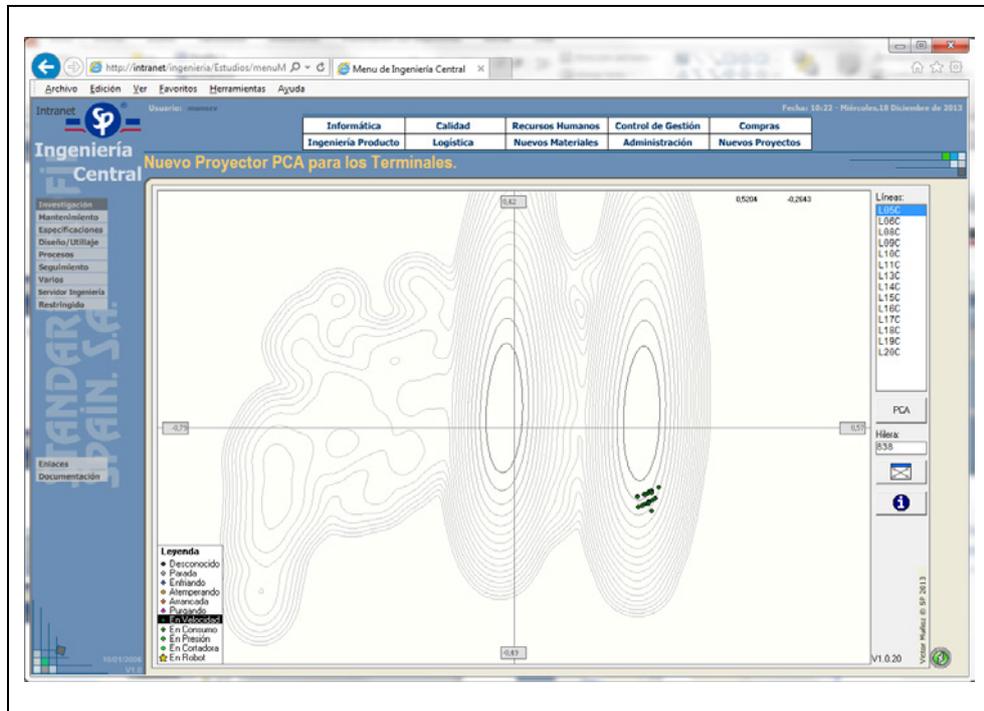


Figura 4. Imagen de ejemplo del Proyector PCA Multivariante de Parámetros de Extrusión y programado en formato ActiveX para visualización desde la Intranet Corporativa.

Esta Sensorización se ha configurado como una Herramienta necesaria para los distintos Dptos. de la Empresa donde, cada vez más, se acopla nueva información procedente de distintos Sensores con el fin de definir los Indicadores Calidad de los Procesos Productivos y de los Productos, en la Estrategia Empresarial de Mejora Continua.

Sobre esta Base de Datos Productiva se han desarrollado Trabajos en colaboración con el Grupo "Edmans" del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de La Rioja, con implementación de modernas Técnicas de Data Mining para simplificación en la visualización de Datos Multivariantes mediante un Proyector de Mapas de Proceso.

Este Motor de Registro de Datos todavía está operativo y en la actualidad podemos decir, en auge, tal y como se detalla en la correspondiente Unidad Temática, para desarrollar un Monitor de Producción que permita expresar en Tiempo Real el Estado del Proceso Productivo de la Empresa en correlación a las distintas y numerosas

Bases de Datos de la Empresa (CEP, SAP, datos de Producción, Sensores de Extrusión, ...).

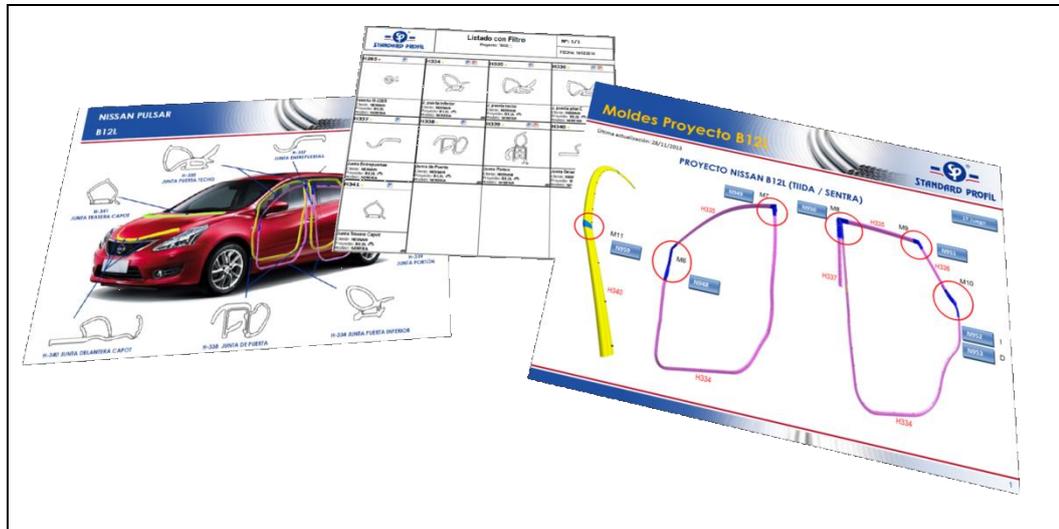


Figura 5. Imagen para mostrar el formato de la DDBB Vectorial con codificación SVG de los Perfiles de Estanqueidad.

- Además, se ha diseñado la Base de Datos Vectorial de los Perfiles de Estanqueidad de la Empresa para permitir el Desarrollo de nuevas Herramientas para el Control de la forma Seccional de estos productos.

Así, mediante Programación con Visual Basic y la codificación SVG (Scalable Vector Graphics), se ha diseñado un motor de exportación a Base de Datos Gráfica desde el Software de Cad 2D MicroStation que dispone la Empresa para el Diseño de Producto.

Esta DDBB ampliada a Hileras y Plantillas de Producto, Flejes y Clices (Clips, Insertos, Cintas y Esponjas) está diseñada de tal forma que se puede consultar a nivel gráfico desde cualquier navegador de la Intranet Corporativa de la Empresa, y nos permitirá la implementación en Sensores de Comprobación Seccional como se verá más adelante.

- A partir de entonces, se ha trabajado en la forma de conocer la Calidad de la Extrusión en Tiempo Real y así, en Colaboración con la Universidad de La Rioja se ha desarrollado en la Empresa un Sensor de Visión Periférica (denominado internamente como "ViPer") que mediante el emparejamiento de Cámaras y Barreras de Luz Láser y la Programación del correspondiente Software, nos permite reproducir la Sección 2D Periférica de los perfiles en Extrusión sin intervención de contactos y en Tiempo Real.

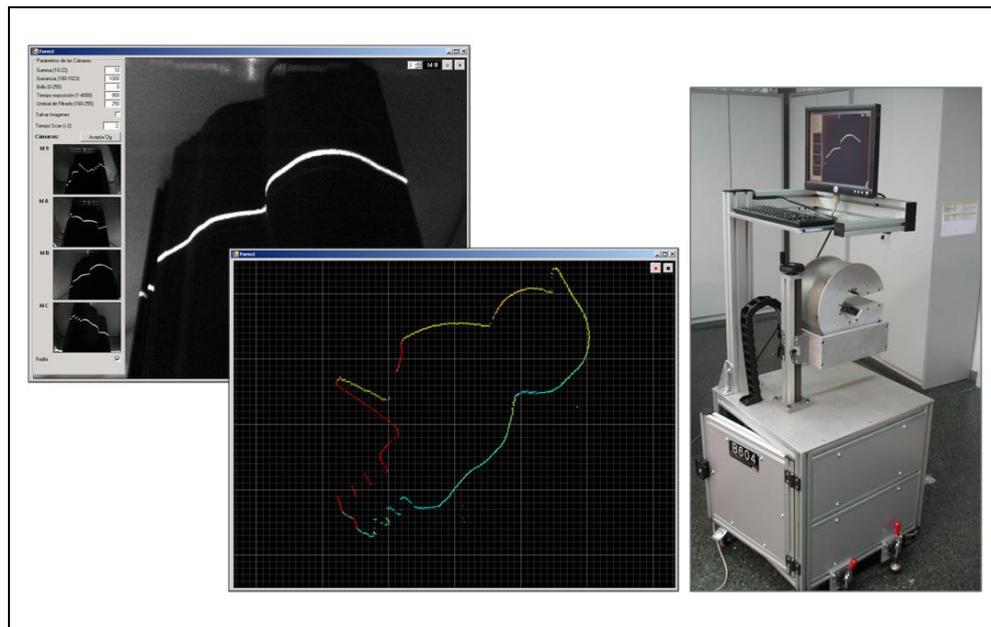


Figura 6. Imagen del Prototipo desarrollado en la empresa y denominado "ViPer", para la Captura Periférica on-line de los Perfiles de Extrusión.

Así, la correlación en Tiempo Real de esta Sección Periférica de CoExtrusión y su Geometría Vectorial codificada mediante SVG, nos permite dimensionar la Calidad de los Productos y de los correspondientes Procesos.

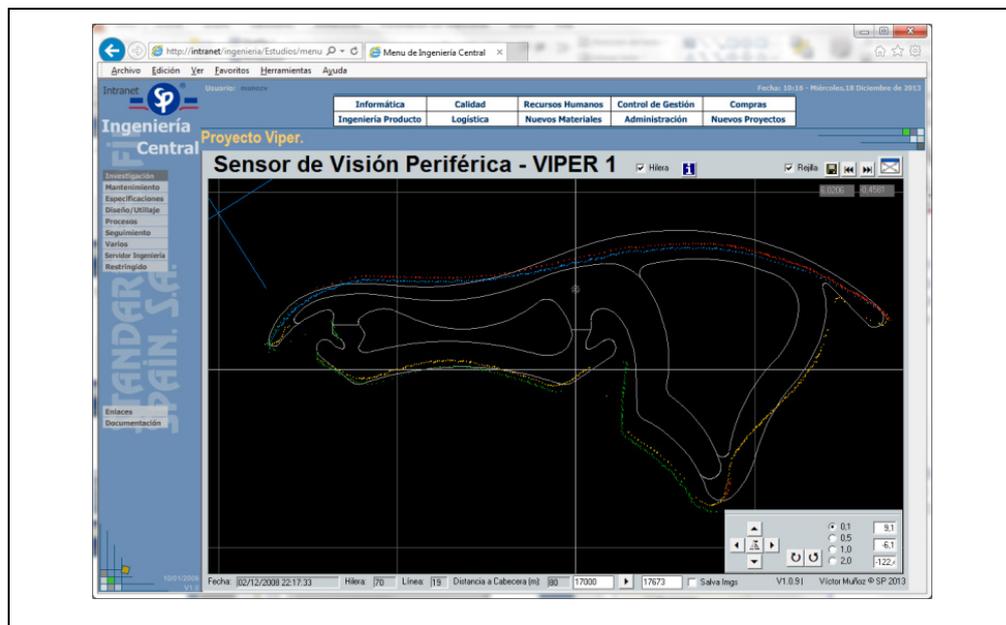


Figura 7. Imagen de la Programación en Formato ActiveX para la verificación en tiempo real del trabajo de Sensor ViPer.

Con esto, se han estudiado problemas concretos que se han observado en las líneas productivas para aprender de los procesos y así, esta documentación han dado origen al Artículo publicado con el título “*An intelligent supervision system for open loop controlled Processes*” que se describirá en detalle más tarde.

Sin embargo, la Tecnología utilizada en el desarrollo de este Sensor, aunque eficiente y fácil de implementar, limita la visualización de la Sección de Extrusión, y requiere trabajar en nuevas herramientas.

- Por esto, se ha trabajado en un nuevo Sensor donde se solventan los problemas del Sensor de Visión Periférica, de esta forma, se captura mediante una Cámara Lineal la Sección completa de los Perfiles de Estandarización y se correlaciona con la Base de Datos Vectorial de los Diseño de la empresa.

Se trata así, de un Sensor muy simple donde el mayor esfuerzo se ha realizado en las herramientas de visualización y control del movimiento de las imágenes respecto a los Datos Gráficos y Teóricos del Producto, implementando algoritmos de Manipulación Gestual sobre una pantalla táctil para simular el trabajo que se realiza en los Proyector ópticos tradicionales.

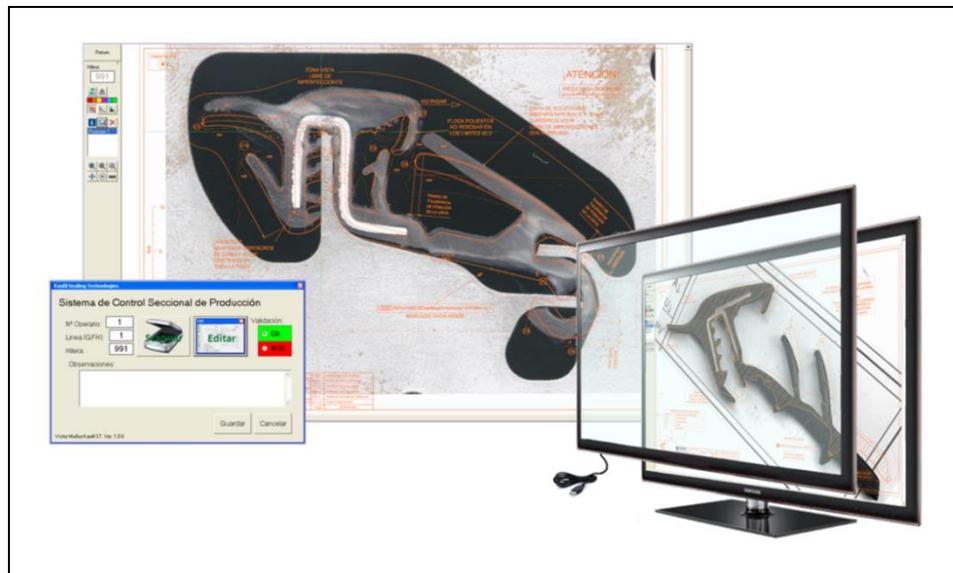


*Figura 8. Imagen del sistema tradicional de control seccional basado en un Proyector Óptico para la comprobación visual de las Secciones de Extrusión.*

Todo este trabajo de alineación se archiva en la correspondiente Base de Datos, y con esto, analizar la correlación de los Parámetros Productivos con la Geometría Seccional del Producto final.

- Además, se han realizado trabajos de Colaboración con la Universidad de La Rioja para trabajar en Técnicas de Diseño y Aplicación de nuevos tipos de Recubrimientos basados en NanoTecnología. Y así, la demostrada eficacia de la Tecnología de implantación de determinados tipos de NanoMateriales, va a concluir con las primeras pruebas de implantación en los Procesos de la empresa. Este tipo de Tecnologías sin duda van a simplificar los Procesos Productivos de la empresa.
- Se ha implantado una nueva herramienta CAE para el Dpto. de Ingeniería que nos permite estudiar mediante Simulación CFD la Optimización de los Procesos de Inyección y llenado de Moldes con Compuestos TermoPlásticos y TermoEstables.

Así, la incorporación del Software MoldFlow© de la casa Autodesk permite optimizar los Procesos de Moldeados que conforman mediante distintos Perfiles los Sistemas de Estanqueidad para el Sector del Automóvil.



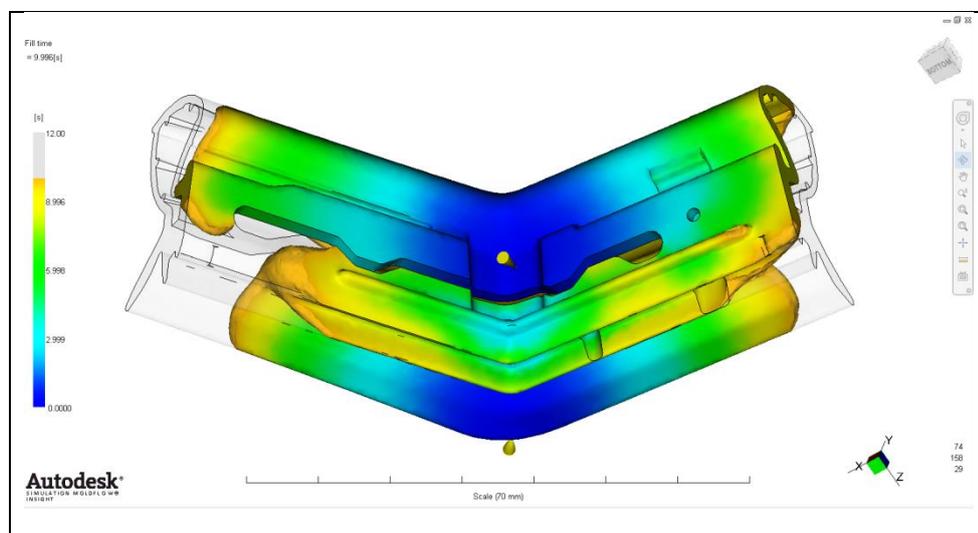
*Figura 9. Imagen del nuevo Sensor desarrollado para la Captura Digital de la Sección Completa de las Hileras de Extrusión.*

Con dicha Herramienta CAE, el Autor ha realizado trabajos de colaboración con la Universidad de La Rioja para el Dpto. de Ingeniería Mecánica mediante un Seminario Formativo en el presente año 2015.

- En la actualidad, se está realizando un trabajo para mejorar la Conectividad de los Sensores de Extrusión para favorecer la difusión de la información procedente de estos Sensores para dimensionar la Calidad de Extrusión y trabajar en los Sistemas de Control.

Así, con toda la Información existente se están dimensionando los canales para la Correlación de la numerosa Información que se está generando en la Empresa. Toda esta Información procedente de distintas fuentes en Tiempo Real relacionadas con el proceso productivo de la empresa, van a proporcionar la fuente para nuevos y más completos Estudios Multivariantes que mejoren los Diseños Predictivos de la Calidad de los Procesos.

- Además, la reciente incorporación de un Equipo de Escaner 3D, nos va a permitir trabajar sobre los Diseños reales de los Utillajes de CoExtrusión, y así, solventar uno de los problemas más complejos de solucionar en los trabajos de Simulación Numérica en el campo de Análisis CFD.

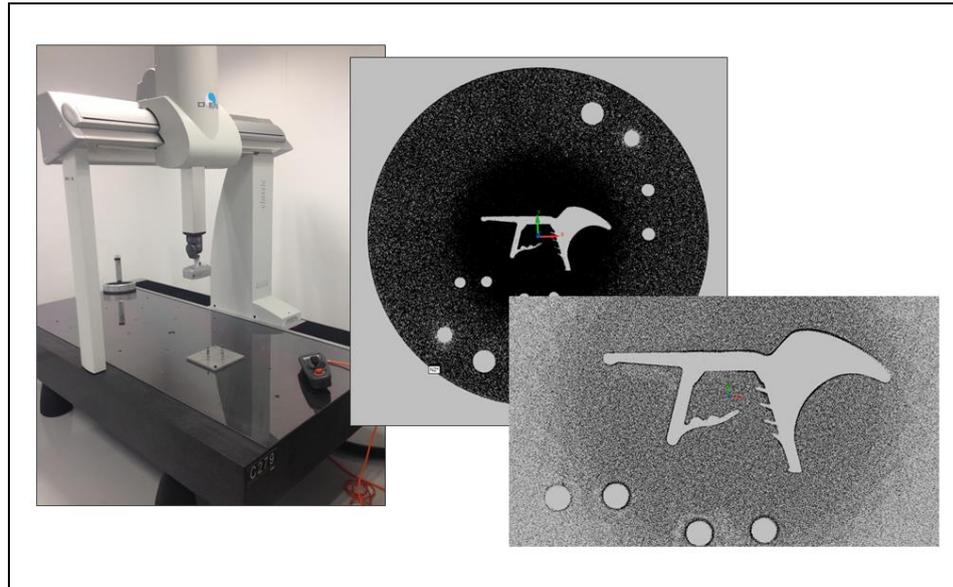


*Figura 10. Imagen de un ejemplo de Simulación CFD de Inyección de Moldes con MoldFlow.*

Trabajos de Simulación en Análisis de Fluido que se retoman tras 15 años de trabajo en la empresa donde ahora se dan las condiciones óptimas en cuanto a captura de Información Real y Sensorización de los Procesos, Tecnologías Numéricas CAE en CFD, y Conocimiento de los

Materiales y de los Procesos para aplicarlas a la Optimización de los Utillajes de Extrusión.

Así, los trabajos iniciales en esta Tecnología Numérica se han mantenido vivos hasta la actualidad donde, las nuevas implementaciones en las Herramientas de Ingeniería, permiten solventar las dificultades que existían entonces en el comportamiento de estos tipos de Materiales y de estos Procesos.



*Figura 11. Imagen del Scanner 3D y un ejemplo de captura de un Utillaje de Extrusión.*

De esta forma, con todo lo aprendido durante esta etapa de la vida del Autor del presente trabajo, se canaliza para tratar de conocer y optimizar el proceso más crítico, complejo e importante de la Empresa: El puro proceso de Conformado por Coextrusión de Elastómeros para la fabricación de Sistemas de Estanqueidad y el Diseño de los Utillajes.

Para esto, la Empresa ha incorporado recientemente un Solver CFD de la marca Comercial ANSYS denominado PolyFlow©, donde se empieza a trabajar los Procesos de Conformado por Coextrusión de Elastómeros y sobre el cual se van a producir numerosos avances en los próximos meses.

En este caso, se han definido dos líneas de trabajo muy interesantes y diferenciadas, respecto a las iniciadas hace aproximadamente 15 años:

- Por un lado, gracias a las herramientas de Parametrización, se han implementado estrategias para la Optimización Geométrica a partir de Técnicas en Diseño de Experimentos.
- Por otro lado, y posiblemente más interesante para nuestras necesidades en Simulación, mediante la aplicación de mejores técnicas numéricas en “Superficie Libre” o “Frontera Libre”, es posible obtener información formal geométrica del Perfil de CoExtrusión en fases posteriores a la salida del Utillaje de Conformado.

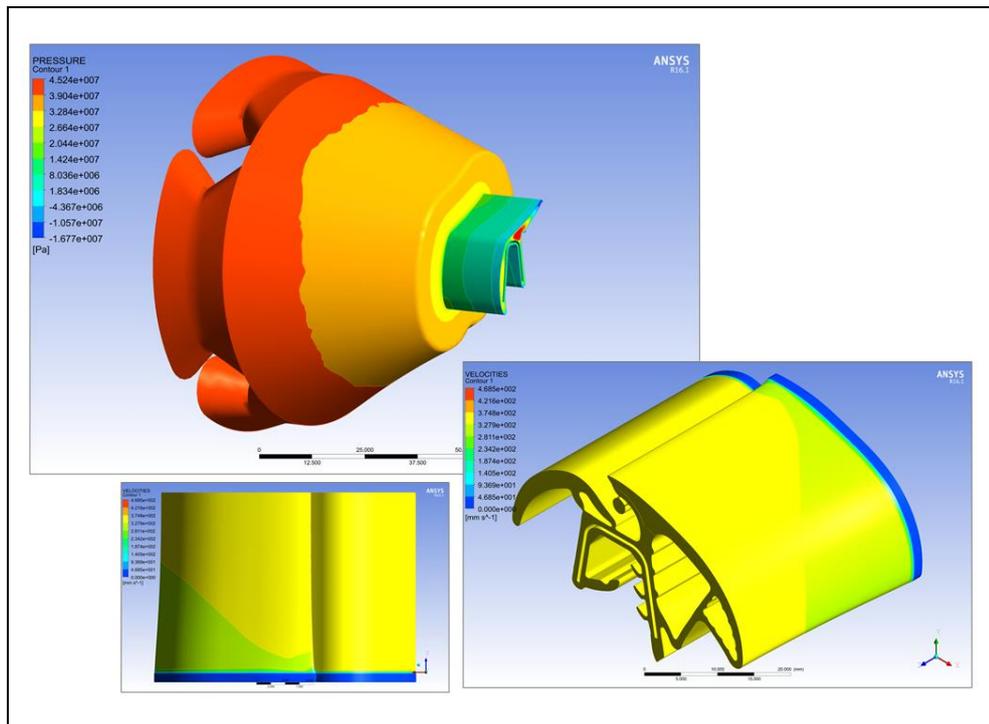


Figura 12. Ejemplos las Simulaciones tipo que se realizan en el ámbito CFD mediante Ansys.PolyFlow.

Además, se ha trabajado en numerosos Proyectos de Investigación que quedan reflejados en la Documentación presentada a los distintos Organismos Oficiales para la CoFinanciación de estos Trabajos.



---

## Publicaciones.

El trabajo que se desarrolla en la presente disertación se desarrolla en distintos ámbitos.

Así, por un lado, la Herramienta de Simulación Numérica para estudiar el comportamiento de los Compuestos Elastómeros es un trabajo característico del Dpto. de Ingeniería de Producto y Supervisado por el Dpto. de Ingeniería en los problemas más complejos.

Con esto, una de las Líneas de Investigación fundamentales del presente trabajo para la obtención del Título de Doctor, estudia la implementación en el diseño de las Técnicas CAE de Simulación Numérica y la programación de Herramientas complementarias al Software de Simulación MSC.Marc.

De esta forma, el primer Artículo presentado y con título *“Finite Elements Análisis of the Hyper-Elastic contact problem in Automotive door sealing”*, Publicado en Octubre de 2008, analiza el Estado del Arte existente para la caracterización de compuestos elastómeros en el entorno del Cálculo Numérico que implementa la Técnica de los Elementos Finitos, y la aplica en el Sector del Diseño y Fabricación de Sistemas de Estanqueidad para el Sector del Automóvil.

En el segundo Artículo presentado, *“A simulation method to estimate closing forces in car-sealing, rubber elements”*, Publicado en Abril de 2012, se describe en detalle la implementación del Cálculo Numérico que se estudia en el primer Artículo que se analiza en la presente disertación y la Metodología implementada para desarrollar el proceso de Bending 3D de Puerta completa.

Por otro lado, el trabajo que se desarrolla sobre los Procesos Productivos, han permitido el estudio para la optimización de los Procesos en base al diseño de las Herramientas para controlar en Tiempo Real el conformado que se realiza de los Perfiles de Elastómeros en las Líneas de CoExtrusión de la Empresa.

De esta forma, surge la tercera publicación: *“An intelligent supervision system for open loop controlled Processes”*, publicado por Springer Science+Business Media en Abril de 2011.



## Unidad Temática de la Tesis.

La Unidad Temática que se desarrolla en la presente Tesis se desarrolla en distintos ámbitos muy diferenciados, y en la forma que se ha descrito en los párrafos anteriores:

- Por un lado, se desarrollan las actuaciones para analizar e implantar las Herramientas CAE para la Simulación Numérica y estudiar el comportamiento de los Compuestos Elastómeros.
- Por otro lado, se trabaja sobre los Procesos Productivos de la Empresa para tratar de diseñar un motor de Supervisor que nos permita controlar y correlacionar los Procesos y los Productos.

Así, el Documento se organiza manteniendo estas dos Unidades Temáticas para facilitar el seguimiento de la información.



---

# Unidad Temática I.

## Desarrollo de Técnicas de Simulación.

---

### Antecedentes.

La oportunidad de desarrollar la actividad laboral en una empresa de este sector ha fomentado el rápido aprendizaje en dichas técnicas numéricas mediante la utilización del Software MSC.Marc, y conocimientos en el comportamiento en laboratorio de estos materiales.

### El Software MSC.Marc®.

Marc es un paquete informático de propósito general para Ingeniería, de la casa MSC, especializado en la utilización de Compuestos Elastómeros y Esponjas que requieren un Modelado especial por su comportamiento HiperElastico, y evidentemente No-Lineal, y que proporciona herramientas para el Análisis que implementa el Método de los Elementos Finitos.

Así, los materiales Elastómeros, genéricamente denominados EPDMs, en este entorno de Simulación Numérica con MSC.Marc se modelizan distintos aspectos de sus propiedades físico-químicas:

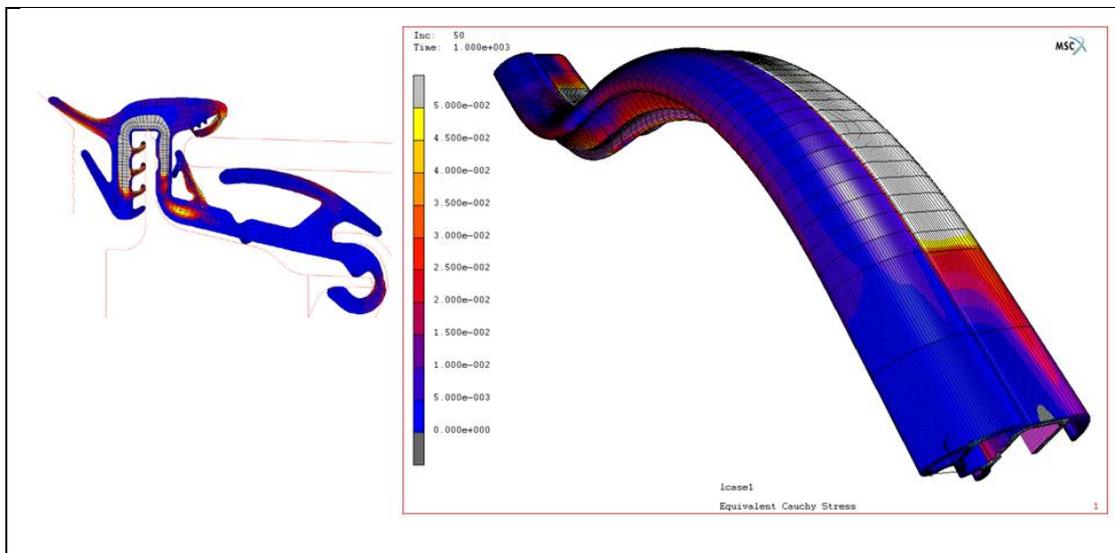
- Los materiales Termoestables en su comportamiento Elástico, que se sucede tras el proceso de Vulcanizado o Curado, pueden desarrollar con la aplicación de una carga distintos grados de deformación y que en ocasiones pueden superar alargamientos de 500%.
- El comportamiento, en cuanto a la relación existente entre la aplicación de cargas y las deformaciones que se producen, es marcadamente No-Lineal.
- Debido a las propiedades ViscoElásticas, se produce una relajación de sus características con dependencia de las variables de Tiempo y Temperatura.
- Los Elastómeros son compuestos con comportamiento cuasi-incompresibles.

Con esto, MSC.Marc integra distintos tipos de formulaciones de Elementos, ayudas para la Caracterización de Materiales, modelos de Fricción y Procedimientos para el Análisis de Contactos, fundamentalmente entre Elastómeros, que proporciona una análisis realista para el Diseño de Productos que contemplan estos Materiales.

## Trabajo de Simulación Numérica en el área Mecánica que se realiza en la Empresa.

El tipo de trabajo de Simulación Numérica que realiza la Empresa con el Software MSC.Marc, lo realiza generalmente el Dpto. de Producto y supervisadas en los trabajos más complejos por el Dpto. de Ingeniería. Esto se debe, a que el personal que maneja este Sistema CAE en el Dpto. de Producto es personal No Técnico en estos métodos de Ingeniería y formado internamente por el Autor para el manejo de estas herramientas.

Así, generalmente las Simulaciones son Estudios 2D para analizar el comportamiento de los perfiles de estanqueidad en distintas secciones comprometidas de las zonas de los vehículos a proteger para la Optimización de los Diseños.



*Figura 13. Ejemplo de los tipos de Simulaciones Mecánicas FEM que se realizan con MSC.Marc: Simulación 2D, y Simulación de Bending 3D.*

Sin embargo, una de las Simulaciones Mecánicas tipo más habituales en el Sector de los Diseños de Sistemas de Estanqueidad, consiste en Simulaciones 3D para



comprobar la estabilidad de las secciones de elastómeros en la toma de radios en distintas zonas de Puertas y Portones.

Hace aproximadamente 14 años, este tipo de Simulaciones se parametrizaban mediante el movimiento de Superficies que en el Contacto 3D con determinadas zonas de los Perfiles reproducían estos procesos de “Bending” o Doblado de los Perfiles de Estanqueidad.

La preparación de este tipo de problemas, aunque simple, conceptualmente hablando, resulta muy engorrosa por la parametrización de las superficies que es necesario generar, y la resolución mediante Contactos no tiene una Convergencia sencilla que requiere mayor densidad de la Malla 3D y, en consecuencia, un mayor incremento en el tiempo de Cálculo.

Estas Simulaciones de Bending generalmente se acotan a las zonas más conflictivas y, en algunos casos, se pueden aproximar a un Arco de Circunferencia para una Radio y Ángulo de doblado conocidos.

Así, en el año 2002 se estudió la Programación de herramientas externas a MSC.Marc para simplificar el conformado numérico de los perfiles a estas aproximaciones de Bending Circulares.

## Primera programación de Parametrización de Bending Circular.

Por esto, se ha diseñado una primera Herramienta de Bending Circular, y la forma de interactuar en la Simulación de MSC.Marc, es muy sencilla. Se accede al fichero en formato Ascii que genera el Pre-Post procesador de MSC.Marc (MSC.Mentat), y se introduce la Parametrización del Movimiento sobre determinados Nodos de los Elementos de la Simulación que más Rigidez presentan (generalmente sobre los flejes o almas metálicas que dan estabilidad a los perfiles de estanqueidad y permiten su anclaje a las chapas de los Vehículos) siempre manteniendo identificada la elección en el posicionamiento de la Fibra Neutra en la Sección de la Simulación de Bending.

Las ventajas de utilizar esta rutina de Parametrización, diseñada en el lenguaje de Microsoft VB.Net© (y anteriormente en VB6) vienen derivadas, tanto del ahorro de tiempo en la preparación de la Simulación; como en el tiempo relacionado con la mejora de la Convergencia de la Simulación al no existir Superficies 3D en el contacto para la realización del Bending, así como de los menores requerimientos de la densidad de Malla, lo que conlleva a menores necesidades en recursos de Hardware para el cálculo.

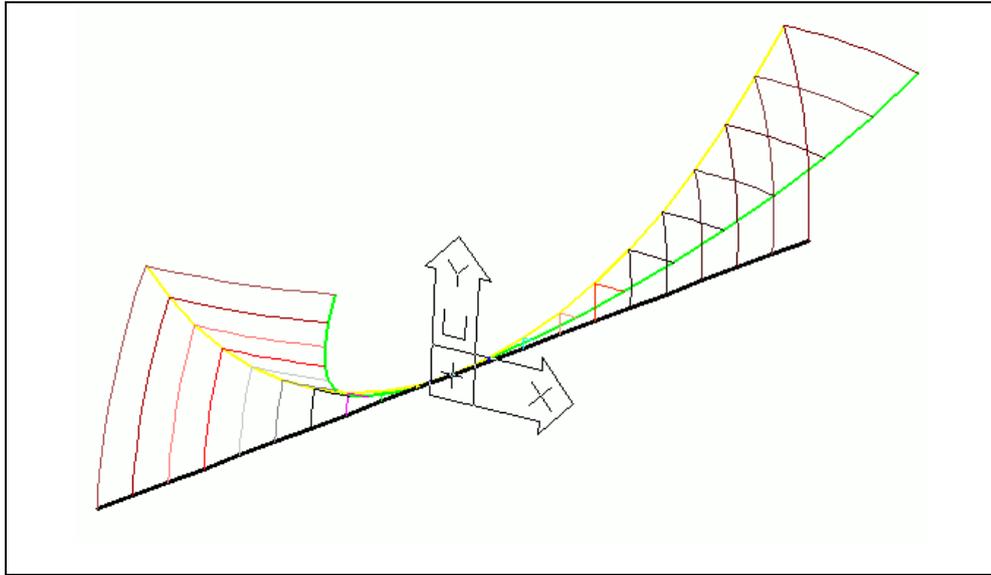


Figura 14. Imagen que describe conceptualmente  
la Parametrización de Bending Circular.

De esta forma, la Rutina de Bending, está basada en la conservación axial en el Eje Z, en el momento inicial de la Simulación, de la longitud de la Fibra Neutra y la parametrización entre una línea, entendida como una circunferencia de Radio Infinito, a la circunferencia de Radio Objetivo.

Así, el programa permite la parametrización del desarrollo circular sobre una sección del perfil con extrusión en el Eje Z, sobre distintos Planos de trabajo (XZ e YZ, y sobre una combinación de estos).

Además, para tratar de aproximarse a los Alabeos que desarrollan las chapas de los Vehículos, la rutina de Bending Circular también incorpora una programación de un movimiento de Torsión acoplado sobre el Eje de Extrusión.

Pese a tener más de diez años, este programa todavía está en uso por su sencillez en la Programación del Cálculo.

Sin embargo, los actuales diseños de las zonas a proteger son en realidad mucho más complejos con poca aproximación a Arcos Circulares, en la forma que nos ha llevado al desarrollo de una nueva Metodología de Bending basado en un Morphing Lineal.

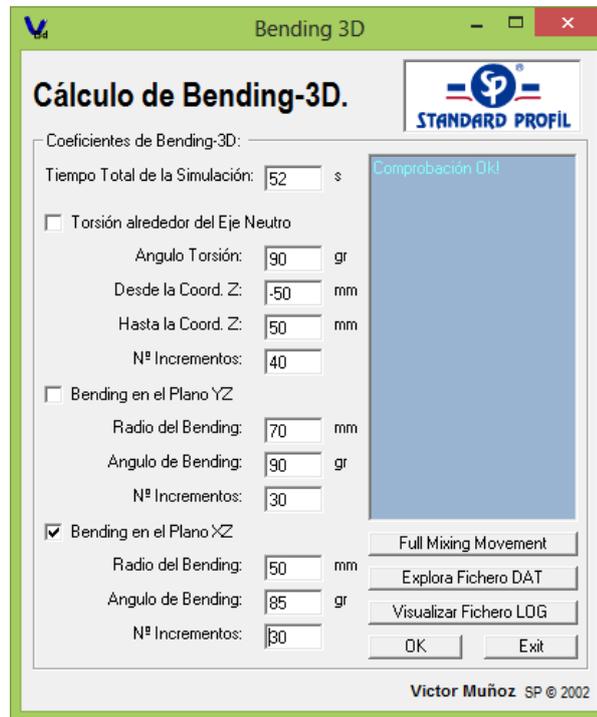


Figura 15. Imagen del aspecto de la Rutina en VB.Net para la Parametrización de Bending Circular.

## Desarrollo del Programa de Parametrización de Bending como Morphing Lineal.

Así, mediante esta nueva herramienta se habilita el Diseño de Bending de Puerta Completa por el seguimiento de las Líneas de Estilo (AB-Lines) que definen los sistemas de Cierre de la estanqueidad en el Sector.

Este tipo de Parametrización desarrollada mediante Microsoft VB.Net, se detalla en la exposición del segundo Artículo que se entrega en el presente documento, por lo que nos remitimos a dichos párrafos posteriores para exponer en detalle dicha Metodología.

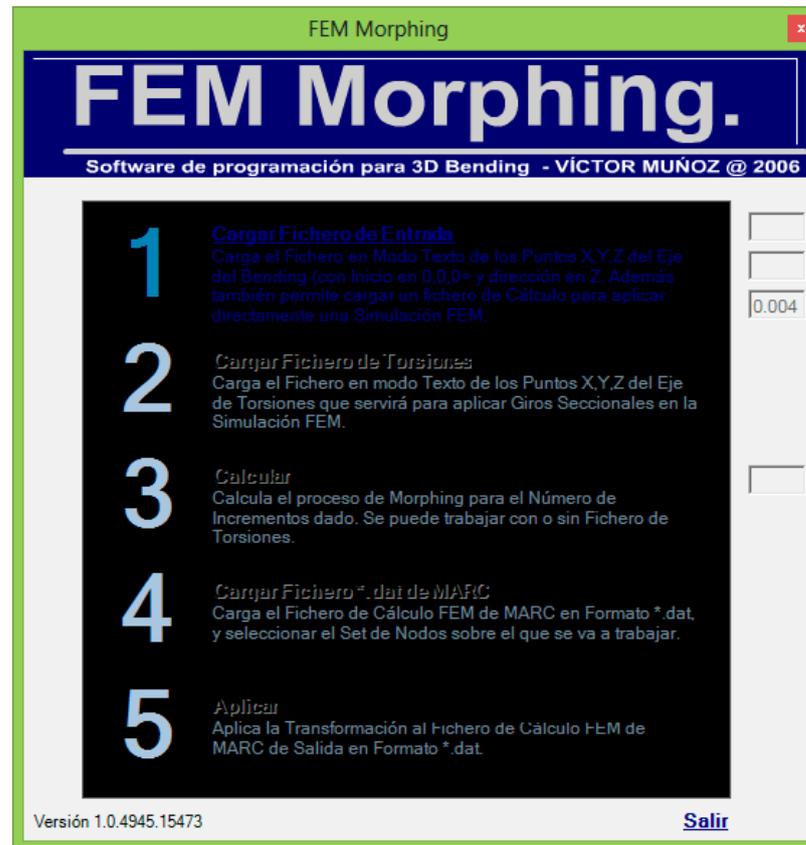
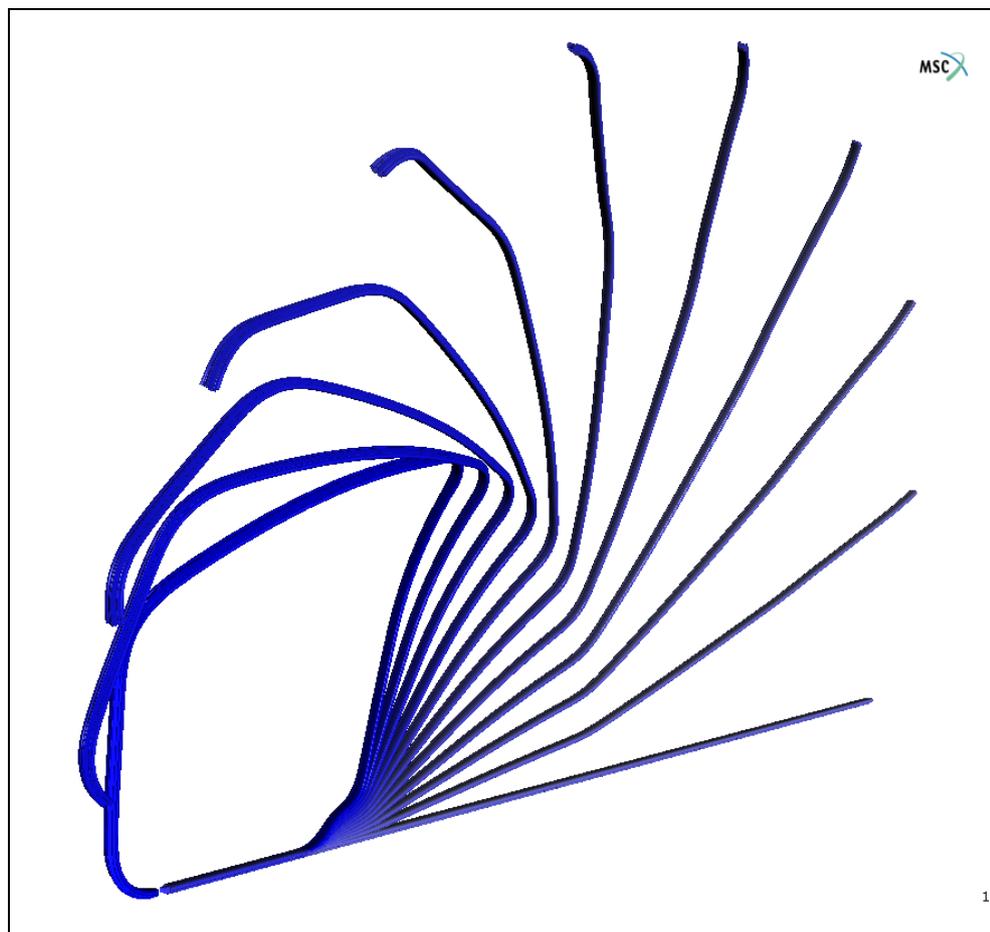


Figura 16. Imagen del aspecto de la Rutina en VB.Net para la Parametrización de Bending como Morphing Lineal.



*Figura 17. Imagen que describe conceptualmente el tipo de transformación que se realiza con el programa de Bending como Morphing Lineal con Slerping.*



## Publicación I.

Así, la primera Publicación, viene a describir el desarrollo realizado para la incorporación de las Herramientas CAE para la aplicación en el Diseño de Sistemas de Estanqueidad, y titulada: "*Finite element analysis of the hyper-elastic contact problem in automotive door sealing*", publicada en Journal of Non-Crystalline Solids en Octubre de 2008.

## Resumen de la Publicación.

En dicho documento se describe la implementación del Método de los Elementos Finitos sobre materiales Elastómeros caracterizados como HiperElásticos para analizar el trabajo del contacto de los Sistemas de Estanqueidad con las Superficies rígidas de las zonas de los Vehículos a proteger.

Existe, cada vez de forma más acusada, un aumento de las especificaciones de los productos que intervienen en el desarrollo del Sector del Automóvil. En particular, en el sector del diseño y fabricación de sistemas de Estanqueidad, existen una serie de condicionantes funcionales que es necesario contemplar desde las fases tempranas de diseño para asegurar el éxito en el desarrollo de los productos (D.R. Daughton, 2003).

Una de las principales líneas de trabajo en investigación consiste en la identificación de nuevos materiales como los sólidos multifuncionales (J.D. Mackenzie, 2007) que proporcionan funcionalidades interesantes en este tipo de aplicaciones, aunque en paralelo, también se desarrolla gran número de trabajos de investigación basados en la formulaciones clásicas de Elastómeros con la denominación de EPDMs.

En la concepción de este tipo de elementos, es necesario evaluar que, junto con las necesidades funcionales para efectuar una línea de Estanqueidad continua a lo largo de la Línea de cierre de las zonas a proteger del interior de los vehículos, es necesario considerar las limitaciones que imponen los Clientes fabricantes de automóviles en cuanto a las fuerzas máximas de cierre en las zonas donde se instalan dichos sistemas de Estanqueidad.

La consideración de estas restricciones hace que sea necesario evaluar estas fuerzas de cierre, ya desde las fases conceptuales iniciales de los productos, para tratar de prever las consecuencias de los diseños antes de su implantación



en la fase productiva, y donde los rediseños de cambio posteriores suponen un sobrecoste de graves consecuencias.

Así, antes de la fabricación de Prototipos, los ingenieros necesitan disponer de herramientas numéricas que les permita evaluar los complejos fenómenos mecánicos de los primeros diseños, en la forma, que sea posible optimizar estos elementos de estanqueidad, teniendo en cuenta todos estos efectos. De esta forma, las herramientas CAE de Simulación nos van a permitir representar los procesos físicos desde las primeras fases de los diseños considerando las no linealidades que intervienen en los procesos reales. Además, estas simulaciones se van a extender incluso a los diseños de los equipos de Utillajes de Extrusión (J.J. del Coz Díaz, 2007).

En la actualidad, la simulación numérica basada en el Método de los Elementos Finitos (FEM), es una herramienta establecida en el desarrollo de productos para evaluar el comportamiento de los diseños en el entorno de los elementos que intervienen en la fabricación de los vehículos. Por ejemplo, en el análisis dinámico de resistencia a los choques de automóviles se pueden conseguir resultados fiables. Esto permite a los ingenieros y diseñadores reducir el número de prototipos, y con esto, se benefician de una reducción considerable de tiempo y costo.

Las formulaciones de caucho que intervienen en el diseño de la estanqueidad, introducen una enorme complejidad en los análisis numéricos en mecánica computacional debido a la naturaleza del caucho que implica básicamente grandes deformaciones y cuasi-incompresibilidad.

Muchas metodologías que implementan técnicas FEM, se han desarrollado para controlar este bloqueo volumétrico resultante de la restricción de incompresibilidad. Entre ellos se encuentran la formulación mixta (W.-K. Liu, 1988), la integración selectiva reducida, la modificación de la formulación de Lagrange (J.-S. Chen, 1987), el método de proyección de presión (J.-S. Chen, 1994) y el elemento incompresible en plana (W.-K. Liu, 1985).

Además de las dificultades en el manejo de la incompresibilidad de los compuestos de caucho, los sistemas de simulación FEM, con frecuencia presentan problemas de convergencia cuando se aplica a los elastómeros de ingeniería, en el que la deformación excesiva en los componentes de caucho provocan la inestabilidad de las mallas.

El problema de contacto entre una geometría de elastómero y una superficie rígida, se analiza mediante contactos y se basan en la teoría tensional (A. Stenti, 2006). El comportamiento del caucho se clasifica como hiper-elástico donde se puede definir la función de densidad de energía de deformación.

Para la elección de la configuración del modelo matemático que se va a utilizar para cada uno de los materiales elastómeros, es necesario tener información

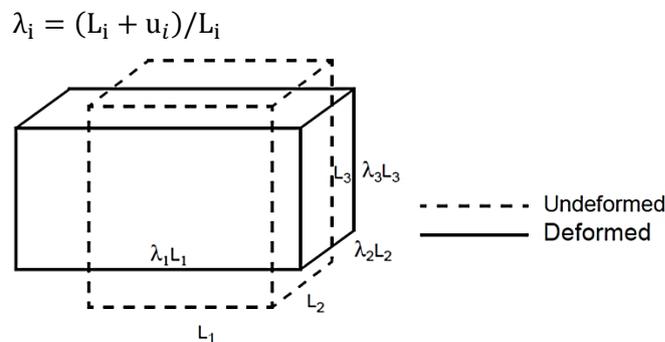
relativa a la cinemática de la simulación, y a las leyes constitutivas de los materiales. Por lo tanto, sus propiedades mecánicas son tensión, frecuencia y dependencia con la temperatura. En una fase inicial de ingeniería, sin conocer a priori, las condiciones de trabajo de los elementos de la estanqueidad, es difícil elegir las propiedades de los materiales más adecuados en un contexto de diseño.

El interés del artículo presentado consiste en mostrar un enfoque para la predicción realista de las fuerzas y el comportamiento de los elementos de la Estanqueidad que poseen propiedades elásticas basadas en el caucho.

## Formulación del Problema.

Los cálculos de tensiones considerando un material elastómero requiere la existencia de una función de energía de deformación que, generalmente, se define en términos de invariantes o relaciones de deformación en los ejes principales de la aplicación de cargas.

En un bloque rectangular,  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ , y  $\lambda_3$ , son las principales relaciones de deformación a lo largo de los ejes del sólido están definidas por:



En la práctica el comportamiento del material es aproximadamente considerado incompresible, lo que nos lleva a la ecuación:

$$\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1$$

Las invariantes de deformación se definen como:

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2$$

$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2$$

Así, en la medición cinemática para para la formulación Lagrangiana completa, las expresiones del Gradiente de Deformación  $F$ , la Deformación Green-Lagrangiana  $E$ , y el tensor de deformación Green  $G$ , se definen como:

$$F_{ij} = \frac{\partial x_i}{\partial X_j} = \frac{\partial u_i}{\partial X_j} + \delta_{ij}$$

$$E_{ij} = \frac{1}{2} (F_{ki} \cdot F_{kj} - \delta_{ij})$$

$$G_{ij} = 2E_{ij} + \delta_{ij}$$

Los modelos de Materiales Hiper-Elásticos son caracterizados por su función de densidad de energía de deformación  $W$ , donde el material se considera implícitamente isotrópico y elástico.

La segunda tensión Piola Kirchoff  $S$  -tensión energéticamente conjugada con la deformación Green-Lagrange, se define mediante:

$$S_{ij} = 2 \frac{\partial W}{\partial C_{ij}}$$

Y donde  $C_{ij}$ , es el tensor de deformación de Cauchy.

$$C_{ij} = F_{ki} F_{kj}$$

La caracterización del material Hiper-Elástico seleccionado en el presente documento, se corresponde a un modelo de material Mooney-Rivlin (J. Bonet, 1997), donde la función de densidad de energía de deformación,  $W$  se modeliza como:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3)$$

$$I_1 = tr C_{ij}; \quad I_2 = \frac{1}{2} (C_{ij} C_{ij} - (C_{ij})^2)$$

,donde  $C_{ij}$ , son las constantes del material obtenidas de las mediciones correspondientes a los ensayos realizados en laboratorio, y  $I_i$  son las invariantes de la deformación (K. Miller, 2004). Función que pertenece a una simplificación a tres coeficientes respecto a la función general de Mooney-Rivlin, justificado por el ajuste que se observa en el comportamiento respecto a los compuestos elastómeros que se diseñan en la empresa.

Las constantes de los materiales asociados con una velocidad de deformación independiente de la respuesta mecánica, tal y como por ejemplo sucede con el modelo Mooney-Rivlin, son dependientes de la temperatura, al igual que el



coeficiente de expansión térmica, la relación de Poisson y la conductividad térmica.

El fenómeno de la dependencia del tiempo de fluencia y la relajación de su estado tensional, también dependerá de la temperatura. El análisis viscoelástico es, por lo tanto, también dependiente de la temperatura. Además, en problemas de contacto, la fricción produce calor, que debe realimentarse en el análisis, en particular durante problemas de análisis dinámico con alta frecuencia de excitación.

## Implementación Numérica.

El Software MSC.Marc ([www.MSC.com](http://www.MSC.com)) es un programa CAE de propósito general donde integra en el cálculo numérico el comportamiento marcadamente No Lineal de los compuestos Elastómeros, que se diseñan y fabrican en la correspondiente Sala de Mezclas de la empresa Standard Profil Spain, para fabricación de Sistemas de Estanqueidad.

Mediante dicho software se habilita la metodología para la caracterización de materiales hiperelásticos a partir del trabajo en colaboración con el Laboratorio de la empresa y los ensayos correspondientes (K. Miller, 2004).

Los compuestos Elastómeros que se utilizan en la empresa se aproximan matemáticamente con formulaciones, generalmente, correspondientes al modelo general de Mooney-Rivlin (*gmr*) de cinco coeficientes y el Modelo Odgen corresponden a materiales elásticos cuasi-incompresibles, donde la función de la Energía de Deformación  $W$ , toma la forma:

$$W_{deviatoric}^{gmr} = \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N C_{mn} (I_1 - 3)^m (I_2 - 3)^n$$

,donde  $I_1$  e  $I_2$  son la primera y segunda invariantes de deformación.

Aunque según el tipo de formulación de Laboratorio, el producto se puede aproximar a distintas simplificaciones de este modelo, donde las más habituales se corresponden a:

Modelo No-Hookean:

$$W_{deviatoric}^{nh} = C_{10}(I_1 - 3)$$

Modelo Mooney-Rivlin de dos coeficientes:



$$W_{deviatoric}^{mr} = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3)$$

Modelo de Deformación de Tercer Orden:

$$W_{deviatoric}^{tod} = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3$$

Este modelo Elástico Mooney-Rivlin corresponde a la teoría clásica (Ward 1983), aunque, también existe adaptación en Marc a otros modelos más modernos (Charlton et al. 1994). Sin embargo, la Modelización al Modelo de Mooney representa de forma bastante fiel el comportamiento mecánico de las Formulaciones que se Diseñan y Fabrican en la Empresa en el ámbito de las Simulaciones que se realizan.

El proceso de Caracterización es la primera fase de la utilización CAE y, posiblemente el proceso más importante, donde se definen las leyes que van a expresar el comportamiento matemático de los Materiales. De la simplificación al modelo adoptado, dependerán directamente la calidad de las correlaciones de las simulaciones con las reacciones elásticas reales de los materiales.

Los elementos seleccionados para la resolución numérica de estos problemas, son generalmente hexaedros 3D distorsionados como formulación Hermann (ocho nodos isoparamétricos con un noveno nodo adicional central para la presión), como modelo de deformación correspondiente a la caracterización Mooney.

Es importante recordar, debido a la flexibilidad o elasticidad del caucho, existe un alto grado de no linealidad debido al problemas de contacto, ya que no es fácil de identificar la ubicación del contacto en una discretización que implemente el Método FEM, y por esto, el alto coste en convergencia en el método de multiplicación de Lagrange, debido a variables adicionales para el modelado de contacto (tanto entre contactos deformables, como entre contactos rígidos-deformables).

También, es relevante considerar el problema de la fricción, generalmente modelizada con la aproximación "Stick-Slip", debido a que las superficies discretizadas incorporan muchas irregularidades que se agravan con el movimiento de los contactos.

Con todo esto, se ha implantado en la Empresa esta herramienta CAE de simulación, MSC.Marc, donde en las primeras fases de los Diseños ya se pueden conocer los comportamientos de los perfiles en cuanto a la deformación que les confiere su estado tensional por el movimiento con los contactos, como las fuerzas que van a ofrecer frente a la estanqueidad.



Sin embargo, tal y como se ha descrito en los párrafos anteriores, Marc es un programa de propósito general, y resulta muy complejo diseñar trabajos de simulación 3D de los sistemas de estanqueidad para casos de Bending. A partir de la implementación de este Solver Numérico, se ha desarrollado una metodología inicial de Bending Circular que permite parametrizar este tipo de conformado en Marc.

De la misma forma, y posteriormente se ha programado un segundo tipo de metodología más compleja de parametrización que permite el Bending como Morphing Lineal para habilitar el conformado respecto a la posición de las denominadas líneas ABLines de los Perfiles de Estanqueidad.

En la posición del Vehículo donde se instalan, y a partir de dicha transformación, realizar la Simulación Estática del movimiento de los Contactos para verificar, por un lado, las tensiones que se producen en la Simulación; y por otro lado, la deformación los Perfiles de Estanqueidad para formar una línea de contacto continua y la no formación de Arrugas (como defecto más extremo que rompe la estanqueidad)

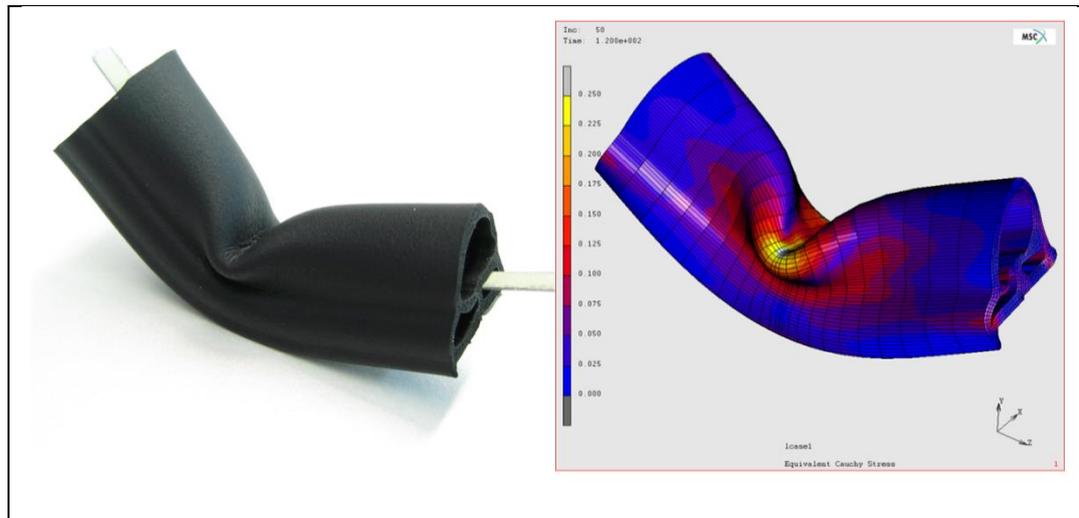
Aunque el Software que se referencia en el presente Artículo, es un paquete CAE disponible en el mercado, el carácter innovador de documento consiste en la aplicación de dicha tecnología para adaptar los Perfiles de Estanqueidad a las Curvas de Estilo o ABLines de los Vehículos en una simulación donde existe un marcado componente no Lineal, por los materiales que se utilizan.

## Conclusiones.

El desarrollo de nuevas herramientas CAE de Simulación, incorporan entre sus mecanismos de caracterización las últimas leyes de modelado de Materiales. Así, en el caso del software MSC.Marc que se menciona en el presente trabajo, existen, además, herramientas de soporte para implementar el modelo matemático que mejor se adapte y aproxime al compuesto real.

No obstante, es importante indicar que esta Tecnología requiere de esfuerzos en diferentes áreas de la Empresa, como es por ejemplo el Laboratorio, para habilitar a partir de Ensayos, la Caracterización de Materiales, en la forma que las Simulaciones junto con las Hipótesis de Simplificación realizadas representen, los problemas y comportamientos Básicos.

En este sentido, en los últimos años, se han realizado numerosos esfuerzos para modernizar los Ensayos de Caracterización, en pos de la Optimización que permite, no solo una correlación cualitativa en cuanto a la forma que adquieren los Sistemas de Estanqueidad, sino además una correlación cuantitativa de los Valores Tensionales que nos permiten estimar las Fuerzas de Cierre.



*Figura 18. Imagen que correlaciona el comportamiento de un Elastómero de Esponja entre su deformación real y su Simulación.*

Así, la validación de las herramientas de simulación, han permitido el Diseño y la Evolución de nuevos métodos de Cálculo que permiten el desarrollo del Artículo que se muestra a continuación.



## Publicación II.

De esta forma, surge la segunda publicación: *“A simulation method to estimate closing forces in car-sealing, rubber elements”* publicado en Inderscience Enterprises Ltd en Abril de 2012.

### Resumen de la Publicación.

En el segundo Artículo presentado se describe en detalle, la Implementación del Cálculo Numérico que se estudia en el primer Artículo que se analiza en la presente disertación y la Metodología implementada para desarrollar el proceso de Bending 3D de Puerta completa.

Así, a partir de las herramientas que nos aporta el Método de los Elementos Finitos y del conocimiento de los Materiales y su Modelización Numérica, se han desarrollado los Algoritmos en Microsoft VB.Net para efectuar Estudios de Bending 3D basados en Slerping (Spherical Lineal Interpolation)

De esta forma, el Artículo analiza un caso práctico para comprender los errores a los que nos enfrentamos si tratamos de ignorar las tensiones y deformaciones que adquieren estos Componentes Elastómeros durante el nuevo proceso de conformado por Bending 3D o la Instalación de las juntas en la posición del Vehículo.

En el área del Diseño y la fabricación de Sistemas de Estanqueidad, el controlar este proceso, puede ser la clave del éxito para marcar las ventajas competitivas y la diferenciación en el Sector.

### Formulación del Problema

En la aproximación numérica CAE con los materiales que implementan en el Área de los Sistemas de Estanqueidad, el proceso más importante, sin lugar a dudas, consiste en modelar, de la forma más realista posible, los compuestos Elastómeros que van a intervenir en las Simulaciones.

Así, el primer paso consiste en conocer el Estado del Arte de esta Modelización Matemática y su aplicación mecánica a través del Cálculo FEM.

De esta forma, revisando la teoría Clásica sobre Materiales Elásticos (Ward 1983) frente a las nuevas Modelizaciones matemáticas (Charlton et Al. 1994) y documentación relativa a su aplicación en simulaciones mecánicas que implantan el Método de los Elementos Finitos (Mackerle 1998, 2004), es posible representar con bastante fidelidad el Comportamiento de estos Materiales Elastómeros.

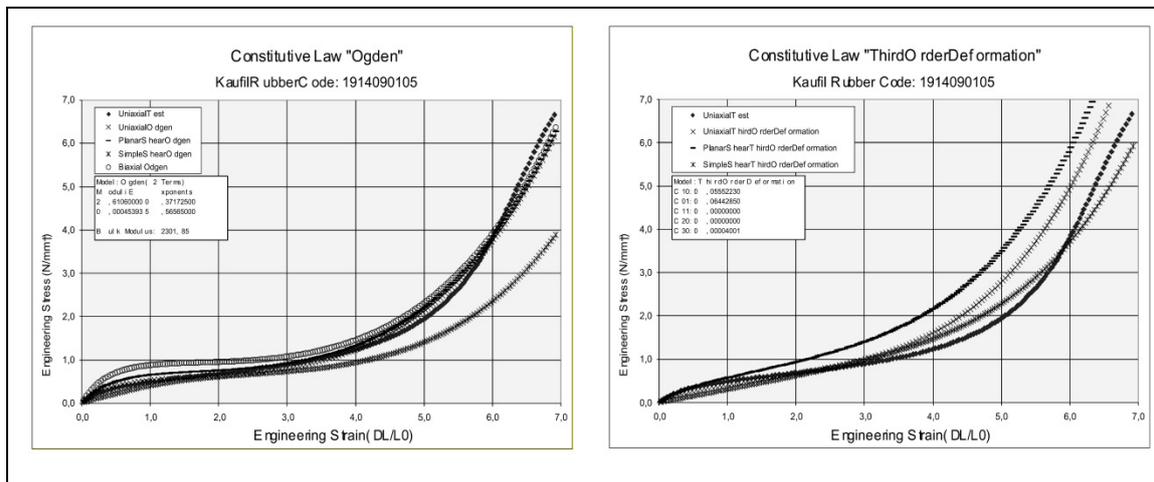


Figura 19. Imagen que muestra distintas aproximaciones a distintos Modelos HiperElásticos.

Así, el comportamiento Elástico no lineal que, hasta la fecha mejor representa estos materiales, viene de la Modelización Genérica de Mooney-Rivlin (y a través de los distintos sub-modelos: Neo-Hookean, Signorini, Mooney de 2 coeficientes, Mooney de 3 coeficientes, Second Order Invariant, Third Order Deformation, Yeoh) y de otros modelos Hiperelásticos Anisotrópicos (Ogden, Foam, Arruda-Boyce, Gent) entre los más extendidos e implementados en MSC.Marc.

De esta forma, además de necesitar conocer estas formulaciones, la forma de adoptar la mejor aproximación posible, se realiza a partir del trabajo en Laboratorio, donde a partir de distintos tipos de Ensayos Mecánicos (Tensión Uniaxial, Tensión plana, Tensión Biaxial, Compresión Axial, Compresión Volumétrica Confinada) podemos implementar cada modelo de elastómeros para evaluar el que mejor describe el Comportamiento Mecánico Real.

No obstante, es necesario adjuntar el modelo con una correlación numérica del material entre la Simulación y el Ensayo en laboratorio para comprobar el comportamiento FEM de la Caracterización acorde al tipo de simulación a realizar.

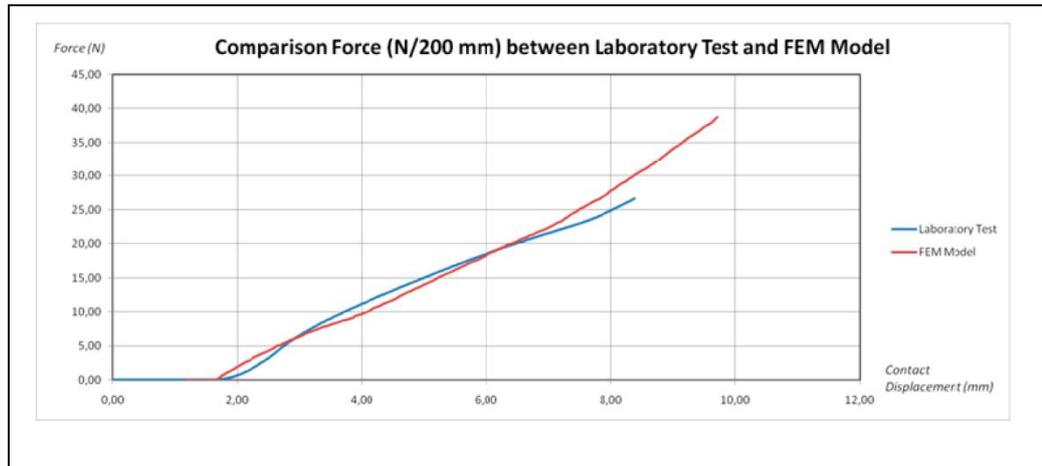


Figura 20. Imagen que muestra la calidad del Modelo mediante adoptado en una Simulación mediante la correlación con el ensayo real.

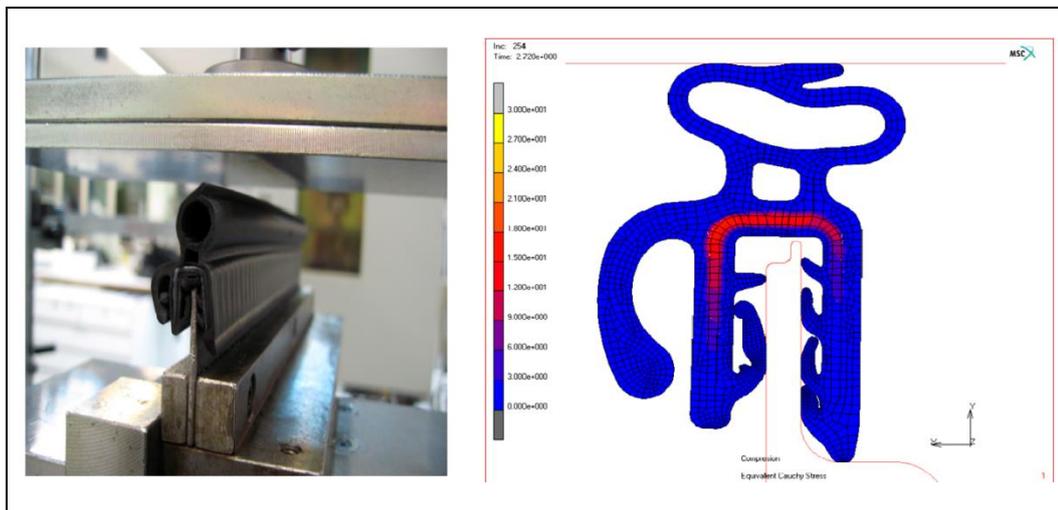


Figura 21. Imagen que muestra un Ejemplo de correlación entre un ensayo en Laboratorio y la Simulación correspondiente.

## Modelado Geométrico

La aportación más interesante del presente artículo, viene de la programación del Algoritmo para favorecer el Bending 3D para el Conformado del perfil a las curvas ABLines de diseño de los Vehículos.

Los programas CAE, y en este caso el utilizado para el cálculo No lineal por la implementación de Modelos de Elastómeros, son herramientas de propósito



general y no disponen de las rutinas necesarias para los innumerables problemas que existen en el ámbito Ingenieril.

En este caso, la aplicación es muy específica y conceptualmente no muy compleja, pero perfectamente viene a cubrir las necesidades existentes y muy concretas respecto a la simulación de Perfiles de Estanqueidad.

El principio básico matemático es el Cuaternio Rotacional (Hamilton 1843), un sistema operacional de cuatro dimensiones (un Escalar que indica la Rotación  $s$ , y tres Vectores que expresan el Posicionamiento Tridimensional  $v$ ) que simplifica enormemente la forma operativa del problema que tratamos.

$$Q = (q_0, q_1, q_2, q_3) = (s, v)$$

El tratamiento Tridimensional es sencillo aplicando las propiedades operativas específicas de los Cuaternios, y el Algoritmo trabaja de dos formas:

- Por un lado, se analiza la curva ABLine maestra, correspondiente al Eje de la Fibra Neutra, que controla la posición relativa respecto al punto anterior, para aplicar una Interpolación Esférica Lineal (Slerping) con transformación en base a la mínima energía de deformación.
- Por otro lado, y la forma más habitual de trabajar, además de la transformación tridimensional, se entrega una segunda curva que informa del Trabajo Rotacional o la Torsión en el proceso de Bending 3D.

Así, en el proceso de Slerping se da información acerca de la rotación que debe utilizar el Cuaternio respecto al punto anterior.

Con esto, se trabaja el proceso que podemos denominar de Morphing Lineal, donde las condiciones de contorno se basan en mantener la Estabilidad Tensional Dimensional de la fibra neutra (localizada en la primera curva ABLine que informa de la transformación tridimensional)

A partir de entonces, el Cuaternio permite representar, además del cambio posicional, la rotación respecto al Sistema Triédrico definido en el punto anterior de la curva ABLine.

Con el análisis inicial de las curvas ABLine de posicionamiento Tridimensional y Rotación se aplica el proceso de Slerping (o Interpolación Esférica Lineal) donde para el número de incrementos deseados en el Tiempo se aplica una transformación de interpolaciones entre las líneas de Extrusión origen y las ABLines de destino con la forma de las curvas que definen la posición y rotación de los Perfiles de Estanqueidad en el Vehículo.



Conceptualmente se considera sencillo, aunque operacionalmente costoso. Sin embargo, los actuales equipos de Hardware resuelven sin problemas dicha rutina de transformación en el Solver de MSC.Marc y permite acoplar problemas anteriores y posteriores de contacto que aportan un valor añadido a las simulaciones numéricas.

Si bien, es necesario decir, que el software de la rutina de Bending 3D, requiere de unas curvas ABLines (la primera para el Posicionamiento, y la segunda de Información Rotacional de la Torsión) con unas características matemáticas muy específicas y restrictivas en cuanto al posicionamiento y control tridimensional. Mediante este Software la rutina de Parametrización nos permite simular cualquier curva para el conformado de los perfiles de Estanqueidad, en un Proceso Numérico que hasta la fecha es único.

Además, esta rutina diseñada en el año 2006 en VB.Net está modernizada en la misma medida que evoluciona el código fuente del Solver o motor de cálculo de MSC.Marc.

## Formulación del Documento

Para dar mayor validez al diseño de las Rutinas de Bending proyectadas, el artículo presenta a modo de ejemplo un caso concreto reducido donde trata de mostrar las consecuencias tensionales y formales que pueden producirse cuando no consideramos las tensiones y deformaciones que se producen por el mero hecho de realizar un conformado en 3D sobre los perfiles de Elastómeros en funciones de Estanqueidad.

De esta forma, se analizan tres casos o hipótesis:

- Un primer caso, "a", donde utilizando las rutinas de Bending 3D se mantienen las tensiones en los materiales durante el proceso de doblado o montaje de la junta en la posición del vehículo.
- Un segundo caso "b", donde tras el proceso de Bending se ignoran las tensiones que se producen durante dicho conformado y se mantienen las deformaciones del proceso.
- Un tercer caso "c", donde no existe información ni en aspecto tensional ni en aspecto de forma. Esto es, como si consideramos una Coextrusión, respecto a la Traslación y Rotación que indican los Cuaternios a través de las curvas ABLines de Trabajo.

De esta forma, el Cálculo Numérico, muestra las consecuencias derivadas de utilizar una u otra simplificación; siendo la más realista, la conservación



---

Energética que se deriva de utilizar la rutina natural desarrollada de Bending 3D.

Es importante indicar que dichas consecuencias del Análisis no son triviales, sino que requieren de un minucioso trabajo de Ingeniería que permita correlacionar los aspectos de la Simulación CAE, con los ensayos cuasi-estáticos que se pueden realizar en el Dpto. de Ingeniería de Producto de la Empresa.

Además, en el sector de Diseño y Fabricación de Sistemas de Estanqueidad, es necesario analizar distintos requisitos funcionales:

- Por un lado, la Rotura de la Estanqueidad mediante la acumulación de tensiones que puedan degenerar en diferentes niveles de Arrugas.
- Por otro lado, el análisis para la identificación continua a lo largo del contacto con las Superficies de chapa de los Vehículos y las tensiones del mismo, para asegurar la funcionalidad de la Estanqueidad frente a Fluidos y Agentes Externos como el agua, el aire o el ruido.

## Conclusiones.

Con la implementación de esta Tecnología de Simulación desarrollada en la Empresa, se ha observado que no se pueden realizar simplificaciones derivadas de la eliminación de Tensiones y Deformaciones que aparecen durante el proceso de conformado por Bending 3D.

Cualquier otra consideración, nos llevaría a cometer errores en la aproximación Numérica que nos conducirían a Rediseños en los perfiles de Estanqueidad con la consiguiente penalización tanto en tiempo como en costo.

El desarrollo, por otra parte novedoso, que se muestra en el presente Artículo aporta una serie de ventajas con respecto a nuestros competidores en el Área del Diseño y Fabricación de Sistemas de Estanqueidad, fortaleciendo nuestra posición en dicho Sector.



## Unidad Temática II. Sensorización Industrial para la Optimización de los Diseños y Procesos Industriales.

---

### Publicación III.

Los dos Artículos descritos anteriormente a través de la Unidad Temática I, mantienen un nexo de unión relacionado con las técnicas FEM de Simulación de Compuestos Elastómeros.

Sin embargo, el periodo de tiempo que existe desde que se inician los trabajos de Doctorado hasta la presente fecha de finalización, se han realizado nuevos desarrollos, tal y como se enumeran en los párrafos anteriores Así, existen diversas acciones desarrolladas en el ámbito de la mejora de los procesos productivos.

De esta forma, surge la tercera publicación: *“An intelligent supervision system for open loop controlled Processes”*, publicado por Springer Science+Business Media en Abril de 2011.

### Resumen de la Publicación.

Los Sistemas de Fabricación en Línea para la Producción Continua, están tradicionalmente controlados por las constantes basadas en función del Tiempo.

Así, la observación del sistema productivo de las largas cadenas de procesado que existen en la Empresa donde el Autor del presente trabajo desarrolla su actividad profesional, para el conformado de Perfiles de Estanqueidad, obedece a este tipo de Sistemas de Control, denominado, en “Lazo Abierto” (Open Loop).



En estos casos, no existe Realimentación en el sistema productivo de información relevante sobre la Calidad de los Productos finales. Esto quiere decir, que no es posible definir una correlación entre las Variables o Estado de los procesos y los Perfiles de Elastómeros fabricados.

Esto supone un grave problema para los responsables de Planta respecto a los enormes trabajos de Vigilancia que es necesario implantar para la toma de decisiones en relación a la Calidad de los Productos.

Los sistemas de Supervisión Inteligentes aplicados a los procesos Industriales suponen un área de Investigación en intenso desarrollo.

Un Sistema de Supervisión Inteligente requiere una estructura productiva que permite la extracción de información a partir de datos numéricos de los procesos, y que represente de una manera cualitativa o semicualitativa la calidad de los productos finales (Charbonnier et Al. 2005)

De esta forma, la primera intervención para dicha implantación requiere de un sistema robusto para la Captura de Información productiva en continuo en sus correspondientes bases de datos en función del Tiempo.

Para esto, es de crucial importancia, la identificación de las Variables Críticas de los procesos para su registro.

Sin embargo, la Monitorización de datos de los procesos adquiridos como mediciones convencionales, no son sencillos de procesar por los Operarios de línea debido a que el proceso de razonamiento de la Calidad del producto es un aspecto cualitativo y no puede basarse en una serie de valores numéricos.

Para esto, los métodos de Monitorización y Supervisión Inteligente de los procesos deben procesar gran cantidad de datos Numéricos y dar como resultado una simplificación de la información del estado de forma que sea de fácil comprensión para los trabajadores que operan en las Líneas.

El Objetivo es convertir esta gran cantidad de datos numéricos en una información en tiempo real que sirva de apoyo para la toma de decisiones en el ámbito productivo.

De esta forma, es posible diseñar un Sistema de Diagnóstico para anticiparnos a los cambios que pudieran afectar al estado actual del funcionamiento del Sistema.

La Supervisión de las plantas de producción continua, se realiza principalmente para evaluar la calidad de los productos mediante la identificación de las condiciones de Funcionamiento Inesperado (Odgaard and Wickerhauser 2007 y Liao et Al. 2010)



Estas condiciones de funcionamiento inesperado, generalmente aparecen como variaciones no deseadas (Thornhill 2005; Thornhill y Horch 2007) y pueden estar asociadas con fallos de una parte de la línea productiva que van a causar una degradación de la Calidad de los productos, e incluso un fallo extensible al resto de la planta (Jiang et Al. 2007).

Los procesos de producción, son procesos no deterministas intrínsecamente complejos (Raddatz et Al. 2006) que se ven afectados por multitud de variables.

Además, con el reto añadido de demandas cada vez más exigentes en aspectos relacionados con productos finales de mayor calidad.

Una consecuencia común de los procesos de captura de datos productivos, es que se generan gran número de mediciones (Zang y Howell 2005). Debido a que las mediciones se realizan con diferentes equipos de la planta, la identificación de las variables que controlan los procesos y su relevancia para la Calidad del Producto, resulta un desafío.

El Control de los Procesos en lazo abierto plantea metas adicionales. Por su naturaleza, no proporcionan Información sobre la Calidad de los productos finales.

Generalmente, las Estrategias de control en Lazo Abierto, se implementan cuando hay dificultades para medir las Variables de Interés y con esto decidir las acciones necesarias a realizar.

En ocasiones, las razones para usar un Sistema de Control en "Open Loop", están relacionadas con las dificultades para medir de forma continua los Parámetros considerados de interés, o con las dificultades para relacionar las características multidimensionales de parámetros físicos con las condiciones de Productos de Entrada (por ejemplo, la Viscosidad de los Elastómeros que se procesan en las Líneas de Extrusión).

## Metodología de Supervisión.

La primera tarea en la creación de un Modelo para implementar posteriormente estrategias de Clasificación y Supervisión consistirá en:

- La adquisición de variables o características de los Procesos.
- La identificación de la Variables más relevantes.
- Incorporar Indicadores de Calidad relacionada a los Productos.
- Diseñar los Clasificadores que nos permitan simplificar la visualización de datos y la Supervisión de la Líneas de Producción.



Es importante indicar, que el Modelo mejorará significativamente si tratamos de Correlacionar información con diferentes sistemas de adquisición; Por ejemplo, además de las variables de los procesos, hay que tratar de incorporar parámetros que informen de la Calidad de los Productos, o trazabilidad de las Materias Semielaboradas, ...Con todo esto, es factible diseñar un Clasificador Predictor (Ordieres-Meré et al. 2010).

En este sentido y a nivel teórico, cuantos más datos existan como variables de entrada en el clasificador, mejor será y más precisa, la predicción. Sin embargo, en la práctica se observa como cuando se trabaja con enormes conjuntos de datos y elevados números de variables, además de ralentizar el Proceso de Aprendizaje del Clasificador, también puede confundir a dicho Motor Estadístico debido al gran número de variables redundantes o irrelevantes (Menéndez et al. 1996).

De esta forma, la aplicación de los correspondientes Filtros, nos va a permitir identificar las Variables más críticas de los procesos, y de la misma forma la eliminación de Parámetros Irrelevantes, Redundantes, o que introducen algún tipo de "Ruido".

Con esto, mejora notablemente el rendimiento del Clasificador, se reducen los Costes Computaciones, y proporciona, debido a la simplificación que se realiza, una mejor comprensión de los Conjuntos de Datos.

Una vez que se filtran las variables de entrada, existen distintas técnicas disponibles para definir un Clasificador: la Red Neuronal MLP, el modelo SVM (*Support Vector Machines*), los *k*-vecinos cercanos, el modelo de mezcla Gausiano, modelo Gausiano, el modelo de Bayes, los Árboles de Decisión y los Clasificadores RBF. Sin embargo, los diferentes tipos de Algoritmos deben ser evaluados antes de seleccionar el Clasificador más conveniente (Ordieres-Meré et al. 2010).

Entre los Clasificadores más utilizados están las Redes Neuronales, los modelos SVM, y los Árboles de Decisión:

- Las Redes Neuronales tratan de imitar al cerebro humano para realizar tareas inteligentes. Pueden representar relaciones complejas entre los datos de entrada y salida, y adquirir el conocimiento de estas relaciones directamente de las variables. Las redes neuronales pueden construir complejos límites de decisión no lineales, sin condicionantes previos sobre las Estadísticas de los datos de entrada.

Por desgracia, una sola red neuronal, a menudo carga de forma incompleta un mapeado de los datos, y en consecuencia no generaliza bien. Incluso el aumento del tamaño y el número de capas ocultas de una sola red a menudo no nos lleva a mejoras. Los Conjuntos de Redes-Neuronales son un paradigma en el aprendizaje, debido a que un



conjunto finito de redes neuronales es entrenado para la misma tarea; en general, muestran un mejor rendimiento en la generalización en comparación con las redes neuronales individuales.

- Las Máquinas de Soporte Vectorial (SVM), se basan en la teoría del Aprendizaje Estadístico, y son capaces de aprender funciones de Reconocimiento Supervisado de Patrones de clasificación, o de realizar la estimación funcional en problemas de Regresión. Una SVM construye un hiperplano o conjunto de hiperplanos en un espacio multidimensional que puede ser utilizado en problemas de clasificación o regresión. Una buena separación entre las clases permitirá una clasificación correcta.
- Los Árboles de Decisión son herramientas poderosas y populares para la clasificación y la predicción. Un árbol de decisión es un clasificador en forma de una estructura arbórea, donde cada nodo es un nodo "hoja" o un nodo de "decisión". Un nodo hoja indica el valor del atributo de destino (clase). Un nodo de decisión especifica alguna prueba a realizar en un solo atributo-valor, con una rama y sub-árbol por cada posible resultado de la prueba. Un árbol de decisión se puede utilizar para clasificar un ejemplo comenzando en la raíz del árbol y se mueve a través de él a un nodo de hoja, que proporciona la clasificación de la instancia.

El atractivo de los árboles de decisión se debe al hecho de que, en contraste con las redes neuronales, representan reglas que se pueden expresar fácilmente y de modo que los seres humanos puedan entender. Tal y como sucede con las redes Neuronales, conjuntos de árboles de decisión, aumentan la precisión respecto a la de un solo árbol.

## Aplicación Práctica: Industria de Extrusión de Caucho.

El primer paso en la aplicación de estas Técnicas, supone realizar Capturas en tiempo real de las Variables que controlan los procesos productivos. Sin embargo, no existe, hasta la fecha, correlación con la información del producto.

De momento la primera línea de trabajo, ha consistido en el Análisis estadístico de las variables de Estado que se capturan de los procesos.

Esto ha posibilitado, en trabajos de colaboración con el grupo "Edmans" de la Universidad de la Rioja, la aplicación de Técnicas de Data Mining para el diseño de un Proyector Multivariante y construir un Motor Estadístico en tiempo real que represente la estabilidad de los procesos.



Sin embargo, observamos que este Proyector no nos informa sobre la Correlación de la Calidad del producto final.

Para esto, se han desarrollado distintas líneas de trabajo:

- Por un lado, el tratamiento anterior de los materiales Elastómeros que se introducen como materias primas en las Líneas de Extrusión. En este caso es necesario recopilar información sobre la Calidad de los compuestos que se diseñan y fabrican en la Sala de Mezclas de la Empresa.

Así, se ha trabajado en primer lugar, en el diseño de un sistema Scada que nos informa de todas las variables que intervienen en las tres líneas de Mezclas de la Empresa.

Con todo esto, desde el año 2004 se ha registrado información de los procesos productivos de Mezclas, en las correspondientes bases de datos.

Con esta información, y en colaboración con el Dpto. de Ingeniería Mecánica de la Universidad de la Rioja, se ha diseñado un motor para la predicción de los principales parámetros que definen las curvas de curado de los compuestos Elastómeros y con esto, la Calidad de las Mezclas.

No obstante, la disparidad de sistemas operativos y fabricantes de los equipos de laboratorio del Dpto. de Mezclas de la Empresa, no han permitido la extracción de datos relativos a los compuestos fabricados que permitan validar el motor predictivo diseñado.

- Por otro lado, se ha tratado de correlacionar información de las posibles bases de datos ya existentes que puedan aportar un valor a la Calidad del producto final.

De esta forma, se ha trabajado sobre el sistema de Control Estadístico de Proceso (CEP de producción), para tratar de extraer información, en pos de valorar la calidad del material fabricado.

Sin embargo se trata de un sistema de información obsoleto y pendiente de sustitución y modernización por un sistema más flexible y robusto, que habilite esta funcionalidad.

- También, para tratar de recopilar información del producto final en las Líneas de Conformado de la Empresa, se han realizado esfuerzos para



desarrollar distintas Sensorizaciones de las líneas que nos aporten información relativa a la Calidad del producto final.

Entre los sensores implantados, existen, desde los que realizan una acotación dimensional genérica en piezas muy sencillas, hasta los que han tenido un desarrollo más novedoso y merecen un comentario especial.

Entre los sensores que aportan directamente información de los productos finales, el más interesante y desarrollado en la empresa, se basa en una tecnología novedosa (en el momento en el que se fabricó el prototipo) para este tipo de aplicaciones. Así en colaboración con el Dpto. de Ingeniería Mecánica de la Universidad de la Rioja, se ha diseñado un sensor denominado "ViPer", de Visión Periférica.

El Sensor está basado en el emparejamiento de Cámara y Haz Lineal Laser. Este emparejamiento requiere una colocación de la Cámara en ángulo y a una distancia coherente con el Campo de Visión y Profundidad de Campo, respecto al plano que genera el Haz Laser Lineal.

Con esta disposición, el trabajo de la Cámara recogerá la Luz cuando incida sobre cualquier objeto que atraviese el plano del láser.

El siguiente paso consiste en la calibración de la visión que recogen las cámaras, apoyados en el algoritmo Tsai (R.Y. Tsai 1986), y en la que hay que efectuar dos operaciones. Por un lado, la corrección del error físico por aberración esférica de las lentes; y por otro lado, el "Abatimiento" del plano de trabajo para representar, en la Visión Tridimensional que realizan las Cámaras, el cambio de la Variable Pixel a Coordenadas Bidimensionales y correspondientes al plano que define el equipo Láser.

Con todo esto, se ha diseñado un sensor que mediante la disposición de cuatro emparejamientos de equipo cámara-Haz laser lineal, de forma radial en 360° y manteniendo siempre calibrado el mismo plano de trabajo de los equipos láser, permite reconstruir un espacio bidimensional correlacionado y de mayor dimensión.

Así, con este sensor y toda la programación diseñada en Microsoft VB.Net© (y posteriormente en Microsoft C#.Net©, para aprovechar mejor la potencia del Hardware) se habilita el sistema de medición On-Line, el registro de información (tanto a nivel gráfico como a nivel dimensional) en las correspondientes bases de datos y la correlación con la plantilla de producto.

Uno de los mayores inconvenientes a la hora de conceptualizar un sensor, consiste en ser conscientes de la necesidad de reportar



información al sistema productivo de la Línea para el Registro de Datos y toma de decisiones en tiempo real.

La finalidad de todo este trabajo, es la de tratar de diseñar a través de distintos tipos de sensores, un entorno que permita valorar la calidad del producto final. Y con todo esto, la programación de un motor de cálculo para correlacionar las variables que controlan los estados de los procesos productivos, con la trazabilidad de datos procedentes de otras DDBB (CEP de producción y procesos de Mezclas) y con los parámetros que generan los sensores de Producción.

## Conclusiones.

La Metodología descrita en el presente Artículo puede ayudar a mejorar el Sistema de control "Open Loop" mediante la adición de un mecanismo de monitorización de bajo coste y un sistema de supervisión inteligente con la implantación de un clasificador multivariante no lineal.

La aplicación presentada para la Industria del Caucho permite visualizar efectos prácticos y económicos derivados de la metodología propuesta, así como dotar de robustez en términos de Calidad a los productos referenciados.

La implementación de este estudio, utilizando la tecnología MAS (como se ha realizado en el desarrollo del sensor de visión periférica o ViPer), hacen un Sistema en su conjunto, más robusto y más descentralizado. Esto significa, que el Cuello de Botella Tecnológico, debido a la ausencia de dispositivos específicos de captura de información del producto, así como suciedad medioambiental, frecuente en este tipo de líneas de producción, se vea considerablemente reducido.

La línea de investigación está todavía abierta, y el periodo de implantación va a depender de la naturaleza del propio proceso supervisado.

Asimismo, sería interesante investigar la extensión de dicha Tecnología a otros Sensores, como corresponden a los Equipos para la Detección de Defectos Superficiales. En este caso en particular, la incertidumbre es mayor.

Por lo tanto, se requerirá mayor trabajo preliminar para producir una buena estimación basada en los parámetros de entrada. De esta forma, los trabajos realizados en la Empresa (Standard Profil Spain), en el intento de correlacionar toda la información y controlar un sistema en Lazo Abierto, no son suficientes para definir hasta la fecha, una Metodología robusta, en pos de la Supervisión Inteligente de los procesos y productos.

Estas líneas de trabajo, aun sin finalizar, requieren un mayor compromiso por parte de la empresa para implantar y trabajar con estos Sistemas de Supervisión.

Sin embargo, se ha realizado un trabajo muy importante que, aunque parece evidente, nos ha enseñado a conocer información crítica respecto a los Procesos Productivos, y que nos permite pensar de una forma más global en el entorno de Producción.

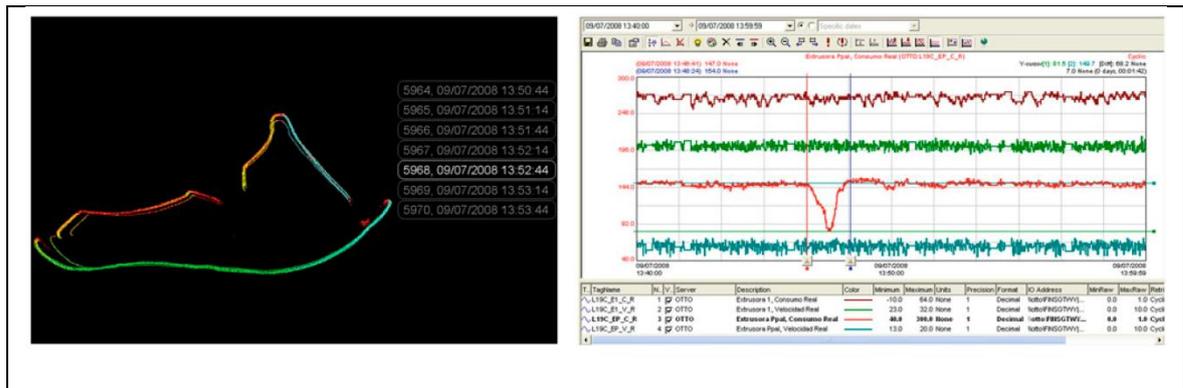


Figura 22. Imagen que muestra a partir del ViPer, la correlación existente entre un defecto en la alimentación de una extrusora y el cambio seccional del Perfil.

A través del diseño del sensor Viper, se ha podido correlacionar, con claridad, como los problemas de alimentación en un equipo de Extrusora, por funcionamiento inesperado y durante un breve periodo de tiempo, provocan cambios geométricos en la sección del producto final.

Entre las conclusiones más contundentes, podemos afirmar el éxito obtenido mediante el desarrollo de este sensor de Visión Periférica (hasta la fecha no existe un equipo comercial que realice esta funcionalidad), enfocado a generar una valoración del producto final y en Tiempo Real.

No obstante, además de las limitaciones de Hardware del prototipo diseñado, existen otras limitaciones derivadas de su propio concepto y por el cual solo permite visualizar la sección periférica de los perfiles.

Para tratar de solventar este inconveniente, se ha diseñado una nueva metodología. A partir del corte de una sección de perfil se recoge una imagen corregida de dicha sección. Esta imagen, posteriormente, se puede correlacionar con la geometría de la plantilla que genera el Dpto. de Ingeniería de Producto, y realizar una valoración de los correspondientes Indicadores de Calidad del Producto final.



---

## Resultados y Discusión.

---

Los Resultados globales derivados del Presente Trabajo de Tesis Doctoral satisfacen completamente los Objetivos inicialmente planteados. Sin embargo, es necesario tratar de analizarlos de forma independiente y respecto a las Unidades Temáticas indicadas en el documento.

- Así, por ejemplo, respecto a la Unidad Temática del Desarrollo de Técnicas de Simulación, se observa, como de la experiencia en la herramienta CAE y el análisis de los tipos de problemática que se plantean en la Empresa, se ha realizado una Evolución Investigadora en pos de Optimizar la Parametrización del Problema y con esto, agilizar la Metodología de Cálculo.

No obstante, es necesario advertir de las restricciones que presenta la propia entrega de Curvas AB-Lines en la Rutina de Parametrización, y que por esto va a requerir un tiempo para el procesamiento y optimización de dichas curvas de control. Esto tampoco supone un grave problema porque conocido el Algoritmo que realiza el Programa de Bending como Morphing Lineal, el procesamiento de las curvas resulta evidente.

Respecto a esta unidad Temática, también podemos destacar los esfuerzos que se están realizando para tratar de parametrizar otro tipo de Problemas. Por ejemplo, existe un proceso de conformado correspondiente al Laminado del alma o fleje de acero o aluminio que se suele incorporar en determinados Perfiles de Estanteidad. De esta forma, se está estudiando el diseño de las Herramientas acopladas al CAE MSC.Marc que permitan esta Parametrización.

Respecto a aspectos de Modelización de los Materiales, es necesario indicar que, aunque poco a poco, la empresa va tomando conciencia de la criticidad de esta parte de los programas CAE. De esta forma, el Laboratorio de la empresa empieza a implicarse en facilitar diversos tipos de ensayos que permiten la aproximación a distintos modelos de Elastómeros.

No conviene olvidar, que las Herramientas CAE, permiten tratar innumerables tipos de problemas, y es por tanto, labor de los Ingenieros trabajar la Autoformación para contemplar la aplicación de estos métodos numéricos.



- Respecto a la Unidad Temática de Sensorización Industrial para la Optimización de los Diseños y Procesos Industriales, las restricciones derivadas de las necesidades productivas diarias, en líneas de trabajo continuo, no permiten el acceso a los Equipos para la Mejora e implementación de Sensorizaciones y Capturas de Datos.

Sin embargo, consideramos existe mucho campo todavía sin explotar y que puede aportar mucha información relativa a la Calidad del Producto final.

Por ejemplo, es necesario acceder a las DDBBs que gestionan variables relativas a los Productos, en la forma que se ha comentado en los Párrafos anteriores, y que permiten interesantes trabajos de Correlación.

Posiblemente, uno de los mayores problemas que se observa, consiste en el concepto que existe en la empresa de "propiedad" de la Información. Con esto queremos decir, que existe un temor a la cesión de la Información que impide que se pueda efectuar una correlación, necesaria por otro lado, de los datos.

Este problema tiene una solución compleja, y en los últimos meses, además se está observando un empeoramiento de esta situación. Es este sentido, se observa cómo hay una tendencia peligrosa en el aumento de restricciones relativa a la captura y acceso a la Información.

Así, los trabajos de Capturas y Análisis de Datos, en vez de estar en manos de los Ingenieros de Planta, están adjudicándose al Dpto. de IT que tienen, por un lado, recelo a habilitar el acceso a los datos a los Ingenieros; y por otro, carecen de los conocimientos para realizar un Análisis de estos Datos.

Esta tendencia Empresarial de facilitar al Dpto. de IT unas atribuciones que no le corresponden, no tiene fácil solución, y frena enormemente la presente Línea de Investigación.

Estas decisiones, sin duda, van a penalizar a la empresa hasta que cambie la tendencia. Sin embargo, hay que advertir también, que en algunos casos las decisiones de cambio pueden aparecer demasiado tarde.



---

## Conclusiones.

---

Las Conclusiones Generales de la aplicación de trabajos de Investigación, en realidad son siempre positivos. La Clave del Éxito radica en plantear unos Objetivos Iniciales realistas, en la forma que se vayan cumpliendo los Hitos poco a poco.

En este sentido, las Líneas de trabajo del Doctorando que firma el presente documento, tratan de mantener una coherencia basada en el diseño de los mecanismos que permitan establecer una Trazabilidad Global de planta que permitan la Correlación Global de Información.

Este hecho podría parecer inalcanzable, sin embargo, no se trata más que de un Concepto de Conectividad Integral para, poco a poco, ir Integrando las Capturas que nos permitan en un futuro definir los Algoritmos para diseñar una Supervisión Inteligente.

Es complicado, pero se puede. El Método: es necesario implicarse, luchar, después volver a luchar y poner pasión en el día a día para mejorar.



## Bibliografía.

---

- A. Stenti, D. Moens, P. Sas, W. Desmet, in: International Conference on Noise and Vibration Engineering, Belgium, 2006.
- Ahmad, N., & Qiu, R. (2009). "Integrated model of operations effectiveness of small to medium-sized manufacturing enterprises". *Journal of Intelligent Manufacturing*, 20(1), 79–89.
- Aydin, M. (in press). "Coordinating metaheuristic agents with swarm intelligence". *Journal of Intelligent Manufacturing*. doi:10.1007/s10845-010-0435-y.
- Bishop, R.L. (1975) "There is more than one way to frame a curve", *American Mathematical Monthly*, Vol. 82, pp.246-251.
- Castejón, M., Ordieres, J. B., Martínez de Pisón, F. J., & Vergara González, E. P. (2004). "Outlier detection and data clearing in multivariate non-normal simples. The PAELLA algorithm". *Data Mining and Knowledge Discovery*, 9, 171–187.
- Chagnon, G., Marckmann, G. and Verrón, E. (2005) "A comparison of the Hart-Smith model with Arruda-Boyce and Gent formulations for rubber elasticity", *Rubber Chem. Technol.*, Vol. 77, pp.4724-4735.
- Charbonnier, S., Garcia-Beltan, C., Cadet, C., & Gentil, S. (2005). "Trend extraction and analysis for complex system monitoring and decision support". *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 18, 21–36.
- Charlton, D.J. and Yang, J. (1994) "A review of methods to characterize rubber elastic behavior for use of finite element analysis", *Rubber Chem. Technol.*, Vol. 67, pp.481-507.
- Chokshi, N., & McFarlane, D. (2008). "A distributed architecture for reconfigurable control of continuous process operations". *Journal of Intelligent Manufacturing*, 19(2), 215–232.
- Colombo, A.W., Schoop, R., & Neubert, R. (2006). "An agent-based intelligent control platform for industrial holonic manufacturing systems". *Industrial Electronics, IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53(1), 322–337.
- Do Carmo, M.P. (1976) "Differential Geometry of Curves and Surfaces", Prentice-Hall, New Jersey.
- D.R. Daughton, J. MacDonald, N. Mulders (2003), *J. Non-Cryst. Solids* 319 (3) 297.
- Faugeras, O. (1993) "Cartan's moving frame method and its application to the geometry and evolution of curves in the euclidean affine and projective planes", in Mundy, J.L., Zisserman, A. and Forsyth, D. (Eds.): *Applications of Invariance in Computer Vision*, No. 825, Springer-Verlag, pp. 11-46.



- García Tarrago, M.J., Gil-Negrete, N. and Vínolas, J. (2009) “Viscoelastic models for rubber mounts: influence on the dynamic behaviour of an elastomeric isolated system”, *Int. J. of Vehicle Design*, Vol. 49, No. 4, pp.303-317.
- Giret, A., & Botti, V. (2004). “Holons and agents”. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 15(5), 645–659.
- Gonzalez-Marcos, A., Pernia-Espinoza, A.V., Alba-Elías, F., & García-Forcada, A. (2007). “A neural network-based approach for optimising rubber extrusion lines”. *International Journal of Computer-Integrated Manufacturing*, 20(8), 828–837.
- Ha, S-H., Choi, K.K. and Cho, S. (2010) “Numerical method for shape optimization using T-spline based isogeometric method”, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 42, No. 3, pp.417–428.
- Hall, M., Frank, E., Holmes, G., Pfahringer, B., Reutemann, P., & Witten, I. H. (2009). “The WEKA data mining software: An update”. *SIGKDD Explorations*, 11(1), 10–18.
- J. Bonet, R.D. “*Wood, Nonlinear Continuum Mechanics for Finite Element Analysis*”, 1st Ed., Cambridge University Press, 1997.
- J.-S. Chen, W. Han, C.-T. Wu, W. Duan, *Comput. Meth. Appl. Mech. Eng.* 142 (3–4) (1997) 335.
- J.D. Mackenzie, Y.J. Chung, Y. Hu, *J. Non-Cryst. Solids* (2007) 271.
- Jelali, M. (2006). “An overview of control performance assessment technology and industrial applications”. *Control Engineering Practice*, 14(5), 441–466.
- Jiang, H., Choudhury, M. A. A. S., & Shah, S. L. (2007). “Detection and diagnosis of plant-wide oscillations from industrial data using the spectral envelope method”. *Journal of Process Control*, 17(2), 143–155.
- J.J. del Coz Díaz, P.J. García Nieto, J. Ordieres Meré, A. Bello García, *J. Non-Cryst. Solids* 353 (8–10) (2007) 981.
- K. Miller, “*Testing Elastomers for Hyperelastic Material Models in Finite Element Analysis*”, 2004. Axel Products 2004.  
<http://www.axelproducts.com/downloads/TestingForHyperelastic.pdf>.
- Karen, I., Kaya, N., Ozturk, F. Korkmaz, I. (2010) “Optimisation of vehicle engine mount system using simulation-based design approach”, *Int. J. of Vehicle Design*, Vol. 52, Nos. X-A, pp.38-53.
- Klok, F. (1986) “Two moving coordinate frames for sweeping along a 3D trajectory”, *Computer Aided Geometric Design*, Vol. 3, pp.217-229.
- Kusiak, A. (1990). “*Intelligent manufacturing systems*”. Englewood Cliffs, New York: Prentice-Hall ISBN: 0134683641.
- Lazarus, F. (1995) “A Geometrically Based Approach to 3D Skeleton Curve Blending”, *Rapport de Recherche No. 2458, INRIA*.

- Liao, W., Pan, E., & Xi, L. (2010). "Preventive maintenance scheduling for repairable system with deterioration". *Journal of Intelligent Manufacturing*, 21(6), 875-884.
- Lin, B. (2009) "A New Model for Hyperelasticity", *Acta Mech* 208, pp.39-53.
- López-Ortega, O., López-Morales, V., & Villar-Medina, I. (2008). "Intelligent and collaborative multi-agent system to generate and schedule production orders". *Journal of Intelligent Manufacturing*, 19(6), 677-687.
- Mackerle, J. (1998) "Rubber and rubber-like materials, finite-element analyses and simulations: a bibliography (1976-1997)", *Model. Simul. Mater. Sci. Eng.*, Vol. 6, pp.171-198.
- Mackerle, J. (2004) "Rubber and rubber-like materials, finite-element analyses and simulation, an addendum: a bibliography (1997-2003)", *Model. Simul. Mater. Sci. Eng.*, Vol. 12, pp.1031-1053.
- Mahdavi, I., Mohebbi, S., Zandakbari, M., Cho, N., & Mahdavi-Amiri, N. (2009). "Agent-based web service for the design of a dynamic coordination mechanism in supply networks". *Journal of Intelligent Manufacturing*, 20(6), 727-749.
- Marik, V., Vyatkin, V., & Colombo, A. W. (Eds.) (2007). "Holonc and multi-agent systems for manufacturing". In *Third international conference on industrial applications of Holonic and multi-agent systems HoloMAS 2007*. Germany: Regensburg, September pp. 3-5.
- Menéndez, C., Ordieres, J. B., & Ortega, F. (1996). "Importance of information pre-processing in the improvement of neural network results". *Expert Systems*, 13(2), 95-103.
- Mijar, A.R. and Arora, J.S. (2004) "An augmented Lagrangian optimization method for contact analysis problems, 1: formulation and algorithm", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 28, Nos. 2-3, pp.99-112.
- Moon, S., Simpson, T., & Kumara, S. (2009). "An agent-based recommender system for developing customized families of products". *Journal of Intelligent Manufacturing*, 20(6), 649-659.
- MSC Software. "Marc Volume A: Theory and User Information".
- Muhr, A.H. (2005) "Modeling the stress-strain behavior of rubber", *Rubber Chem. Technol.*, Vol. 78, pp.391-425.
- Nash, D.A., Lu, Y.C. and Anderson, M.E. (2009) "Finite element modelling of elastomeric sealing components for cylinder-head cover noise and vibration prediction", *Int. J. of Vehicle Design*, Vol. 49, No. 4, pp.287-302.
- Odgaard, P. F., & Wickerhauser, M. V. (2007). "Karhunen-Loeve (PCA) based detection of Multiple Oscillations in multiple measurement signals from large-scale process plants". *American Control Conference*, 1(13), 60-65.
-



- 
- Ordieres, J., López, L. M., Bello, A., & Forcada, A. (2003). "Intelligent methods helping the design of a manufacturing system for die extrusion rubbers". *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 16(3), 173-180.
- Ordieres-Meré, J., Martínez-de-Pisón-Ascacibar, F. J., González-Marcos, A., & Ortiz-Marcos, I. (2010). "Comparison of models created for the prediction of the mechanical properties of galvanized steel coils". *Journal of Intelligent Manufacturing*, 21(4), 403-421.
- Ordieres-Meré, J., Lopez, L.M., Bello, A. and Garcia, A. (2003) "Intelligent methods helping the design of a manufacturing system for die extrusion rubbers", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 16, No. 3, pp.173-180.
- Pan, X-Y. and Chai, G-Z. (2009) "Modelling of rubber mounts and applications for time response analysis of dynamic systems including elastomers", *Int. J. of Vehicle Design*, Vol. 49, No. 4, pp.259-274.
- Piateck, R. (1987) "Operation, safety and confort", in Hucho, W-H. (Ed.): *Aerodynamics of Road Vehicles*, Butterworth & Co. Ltd., London, ch. 6, pp.236-259.
- Raddatz, M., Schlüter, M., & Brandt, S. (2006). "Identification and reuse of experience knowledge in continuous production processes". In *Proceedings of the 9th IFAC Symposium on automated systems based on human skill and knowledge*, France: Nancy.
- Romero, I. (2004) "The interpolation of rotations and its application to finite element models of geometrically exact rods", *Comput. Mech.*, Vol. 34, pp.121-133.
- Steblovnik, K., & Zazula, D. (2011). "A novel agent-based concept of household appliances". *Journal of Intelligent Manufacturing*, 22(1), 73-78.
- Stenti, A., Moens, D., Sas, P. and Desmet, W. (2006) "Development of a numerical modelling methodology for the NVH behaviour of elastomeric line connections", *International Conference on Noise and Vibration Engineering*, Belgium.
- Stromberg, W. and Klarbring, A. (2010) "Topology optimization of structures in unilateral contact", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 41, No. 1, pp.57-64.
- Thornhill, N. F. (2005). "Finding the Source of Nonlinearity in a Process with Plant-Wide Oscillation". *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 13(3), 434-443.
- Thornhill, N. F., & Horch, A. (2007). "Advances and new directions in plant-wide disturbance detection and diagnosis". *Control Engineering Practice*, 15(10), 1196-1206.
- R.Y. Tsai, (1986). "An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision". *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Miami Beach, FL, pp. 364-374.
- Vyatkin, V., & Hanisch, H. L. (2003). "Verification of distributed control systems in intelligent manufacturing". *Journal of Intelligent Manufacturing*, 14(1), 123-136.
- W.-K. Liu, J.-S.-J. Ong, R.-A. Uras, *Comput. Meth. Appl. Mech. Eng.* 53 (1985) 13.
-



- W.-K. Liu, T. Belytschko, J.-S. Chen, *Comput. Meth. Appl. Mech. Eng.* 71 (1988)241.
- Wagner, DA., Morman, Jr., K.N., Gur, Y. and Koka, M.R. (1997) "*Nonlinear analysis of automotive door weatherstrip seals*", *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 28, No. 1, 1 December, pp.33-50.
- Ward, I.M. (1983) "*Mechanical Properties of Solid Polymers*", Wiley, New York.
- Weiss, D. (2010) "*Feature-based spline optimization in CAD: a step towards geometrybased structure creation*", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 42, No. 4, pp.619-631.
- Witten, I. H., & Frank, E. (2005). "*Data mining: Practical machine learning tools and techniques (2nd ed.)*". Kaufmann: Morgan.
- Wolpert, D. H., & Macready, W. G. (1997). "*No free lunch theorems for optimization*". *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1, 67-82.
- Zang, X. Y., & Howell, J. (2005). "*Isolating the root cause of propagated oscillations in process plants*". *International Journal of Adaptive Control Signal Process*, 19(4), 247-265.
- Zhang, D. Z., & Anosike, A. I. (in press) "*Modeling and simulation of dynamically integrated manufacturing systems*". *Journal of Intelligent Manufacturing*. doi:10.1007/s10845-010-0494-0.



## Publicaciones.

---