

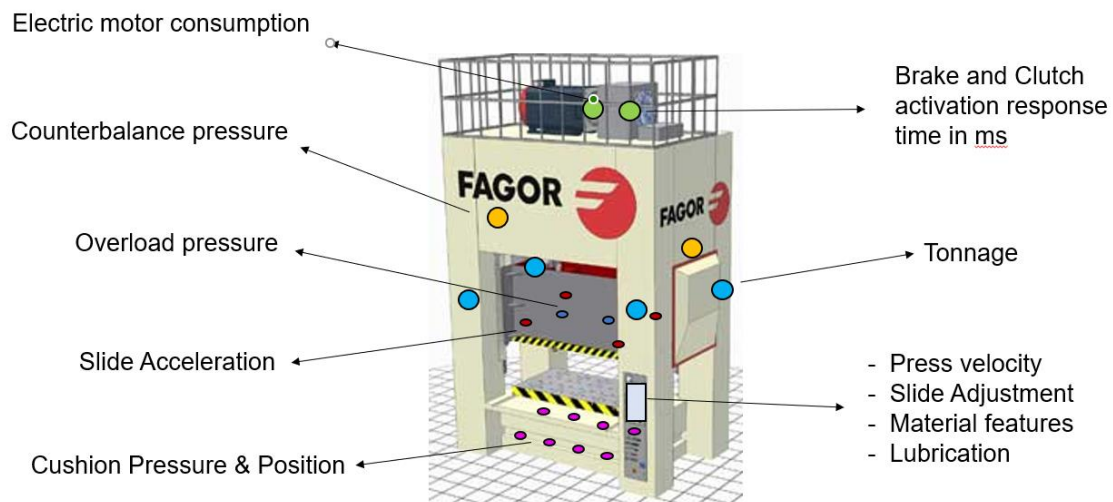
**CONVENIO ENTRE LA FUNDACIÓN PARA EL DESARROLLO Y LA INNOVACIÓN DE LA COMUNITAT VALENCIANA Y LA UNIVERSIDAD CEU CARDENAL HERRERA PARA EL DESARROLLO EN COLABORACIÓN DE ACTIVIDADES**

**PROYECTO: “Análisis de los parámetros críticos de las líneas de estampación para la mejora de su rendimiento”**

**OBJETO: TRABAJO DESEMPEÑADO Y AVANCES LOGRADOS DURANTE LA ANUALIDAD 3**

**Análisis de los parámetros críticos de las líneas de estampación para la mejora de su rendimiento**

Durante el periodo del doctorado la investigación se ha basado en monitorizar las variables de trabajo de la prensa en tiempo real para posteriormente detectar posibles anomalías en el proceso, ya bien sea de calidad de producto como de funcionamiento del equipo. Para ello se ha desarrollado un nuevo estándar de Ford llamado Criterio 360, el cual permite almacenar 360 valores por cada golpe de la prensa. Las variables monitorizadas con este estándar son las siguientes:



El sistema de monitorización 360 y todas las variables que ves en tiempo real es de gran valor ya que abre la puerta a desarrollos de futuros algoritmos mediante el uso de estas variables. Este sistema lleva almacenando información desde mediados de 2021, tanto de variables del proceso como de calidad de pieza, averías detectadas, etc. En la presente tesis se desarrollan unas pocas aplicaciones que este sistema y estándar de monitorización podrán aportar en el futuro.

Durante el desarrollo de la investigación en este último año se han logrado varios hitos. Una vez conseguido el acceso a la gran cantidad de datos de trabajo de la prensa mediante el desarrollo de aplicaciones IIoT, siendo capaces de medir miles de datos en segundos, se ha obtenido un detallado conocimiento de lo que sucede en el proceso de estampación, tanto el comportamiento del equipo, como los elementos auxiliares que participan en el funcionamiento de la prensa (como frenos, embragues, cilindros hidráulicos) y también dando indicios del estado

de una pieza producida. Aprovechando todo el trabajo desarrollado con la medición de los datos, se han obtenido diferentes resultados científicos que explicamos a continuación.

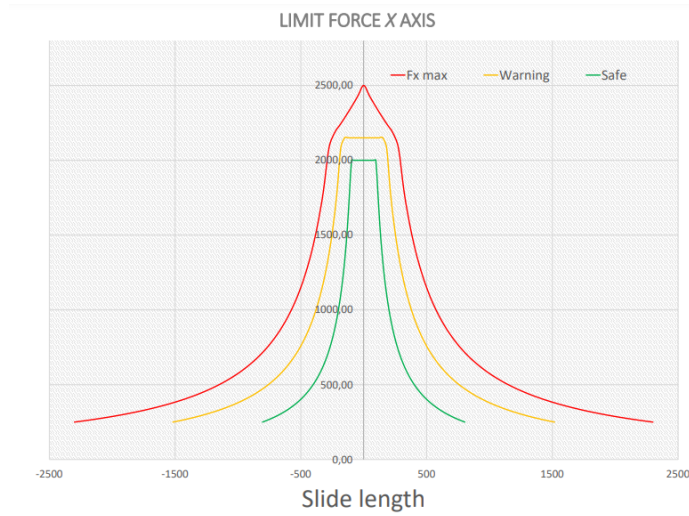
## 1. Predictivo Equipo

Sistema de predictivo que controla el estado de la pisada de la prensa en cada ciclo. Con los datos obtenidos de los sensores del tipo galga extensiométrica, podemos medir el esfuerzo que hace la prensa durante todo el ciclo en las 4 columnas que componen la estructura de esta. Lo ideal es que la pisada se realice lo más centrada posible, con un esfuerzo similar en las 4 columnas durante el proceso, asegurando así que la parte móvil de la prensa (el carro) esté lo más centrada posible. Para conocer el desequilibrio del carro se ha calculado el centro de gravedad con los 4 esfuerzos respecto el centro de este, asegurando que el resultado esté siempre dentro de los límites de trabajo estipulados por el fabricante. Para identificar cuando hay variaciones y el comportamiento se sale de lo esperado, se han definido unos límites de desviación que nos dan información de cuando se ha desviado, en qué momento, cuantas veces y para que piezas. De esto se genera un informe mensual que nos permite analizar de manera clara como está trabajando la prensa.

Con este sistema ha sido posible detectar hasta 3 piezas diferentes que estaban trabajando con un comportamiento anómalo al teórico y al que previamente tenían desde el ajuste inicial en la prensa, esto puede ser debido por diferentes causas que se escapan a nuestro control, como cambio de tipo de material o reajuste del proceso por necesidades de la producción que hacen que el estado de trabajo de la prensa cambie. Una vez detectado las anomalías se han realizado pruebas de try-out para reajustar el proceso y trabajar en condiciones normales sin afectar la calidad del producto final. El siguiente subapartado amplía la información del sistema desarrollado.

### 1.1. Sistema de monitorización del Centro de Gravedad en tiempo real

Esta herramienta se desarrolló durante el primer año de la tesis y la pusimos en producción a monitorizar los datos del tonelaje a mediados del segundo año, una vez realizado todo esto es cuando se empezaron a realizar informes de anomalías que detectábamos dentro de unos márgenes previamente estipulados bajo nuestro criterio, respaldados con la teoría que nos dice que a mejor calidad en la embutición más centrado tiene que ser la señal medida del centro de gravedad y además buscando no superar el 80% del esfuerzo total que puede hacer la prensa para así alargar la vida útil de los componentes mecánicos y asegurando que tenemos menos riesgo de tener un *'major breakdown'*.

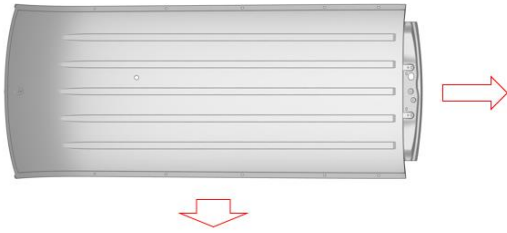


Una vez el sistema de análisis puesto en marcha y verificando que funcionaba como deseado con unas pruebas de try-out realizadas forzando el desequilibrio del carro con pletinas de un milímetro apoyadas en 4 columnas instaladas en la prensa.



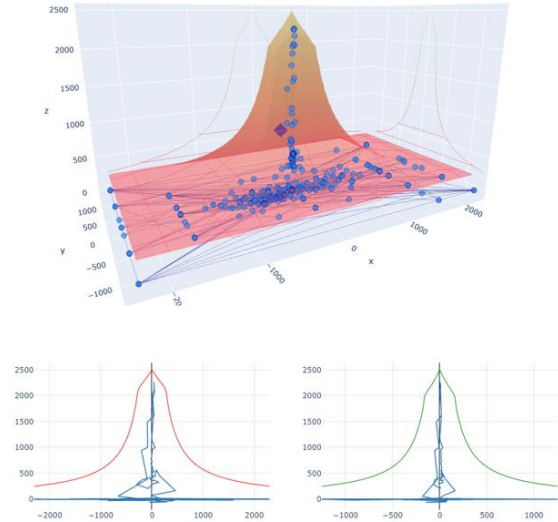
Fuimos capaces de detectar varios casos reales donde en todos ellos la prensa estaba realizando un esfuerzo por encima del teórico además de muy cerca del límite de prensa. Un primer caso fue con el techo de la furgoneta Ford Transit, donde se redujo el tonelaje hasta 700 toneladas ajustando el parámetro de la regulación.

- Item 1L765 se cambia de la línea L-104 a la L-113



- Modificación de regulación de 1371,5 mm a 1373,5 mm
- El Tonelaje máximo pasa de 2300T a 1600T y el techo se produce con la misma calidad sin cambios
- Después de revisar parámetros de trabajo se comprueba que el item en la línea L-104 se producía a 1700T

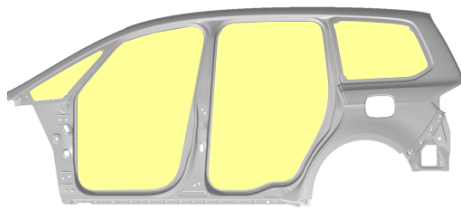
- Con Sistema de medición de centro de gravedad se detecta que está cerca del límite de trabajo de la prensa



Este es el caso que nos llevó a abordar el análisis del consumo energético del motor eléctrico, donde medimos el ahorro de hasta 58 kWh modificando la regulación en 2 mm.

El siguiente caso fue por el mismo motivo, teníamos el lateral de la Galaxy trabajando a 2400 toneladas, siendo el máximo de prensa 2500 que, por un lado, siendo recomendable no superar el 80% de la prensa, no debería pasar de 2000 y además, el tonelaje teórico es 1639 toneladas. En caso de que fuese dado por alguna modificación de procesos o matricería se comprueba la piza gemela, que sería el otro lateral y se verifica que esta trabaja a 1700. En este caso aún no se ha modificado los parámetros ya que son piezas que se producen mínimo cada dos meses y aún están pendiente de realizar las pruebas de try-out.

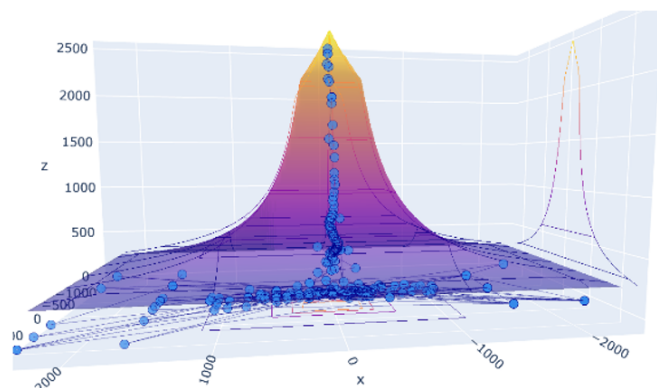
- **MB585**



- Tonelaje teórico de diseño. La pieza 'gemela' trabaja a unos 1700 T

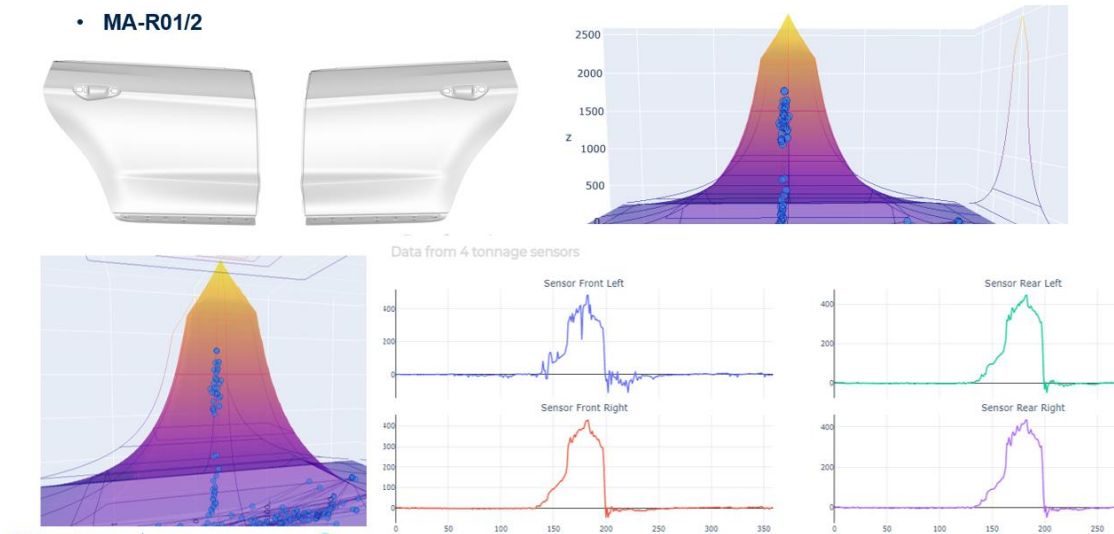
MB584	1639
MB585	1639

- Tonnage cerca de 2400 T
- Tonelaje más alto visto hasta el momento en una pieza de producción en la L-113.1
- La pieza entra aproximadamente cada mes y medio



Un último caso de anomalía encontrada en la prensa no fue por que fuimos informados por la herramienta. En este caso los valores del centro de gravedad estaban dentro de los límites de seguridad, pero en la línea, durante el proceso de fabricación se escuchaba un ruido potente que parecía ser dado por fuertes vibraciones en los componentes mecánicos de la prensa. En este caso la herramienta se utilizó más para analizar los valores y entender que estaba pasando. Finalmente se concluyó que la parte del punzón de la matriz inferior quedaba levemente más

elevada que el pisador y 'hacia hueso' la matriz en PMI como se dice comúnmente en planta. En la imagen se puede ver esa vibración en la señal de la columna delantera derecha de la prensa.



## 2. Consumo energético planta

Modificación de parámetros que afectan directamente al movimiento de la prensa para reducir el consumo realizado por el motor eléctrico consiguiendo una configuración lo más óptima posible minimizando el gasto energético. Las tres variables del proceso que más afectan al consumo realizado por el motor eléctrico que acciona el movimiento de la prensa son, el peso de la matriz superior, la regulación del carro y la presión de compensación. Después de realizar varias pruebas de medición de consumos modificando estos parámetros hemos podido comprobar que el consumo puede llegar a variar significativamente. En el siguiente subapartado se explican los experimentos llevados a cabo que nos permiten vislumbrar un gran avance por este camino.

### 2.1. Hacia una herramienta de ajuste del consumo energético óptimo en prensas en tiempo real

Actualmente en planta tenemos 3 tipos de prensas en cuanto al arranque del movimiento dinámico del carro que sujeta la matriz superior. El accionamiento del movimiento se realiza con un motor eléctrico conectado a un volante de inercia mediante una correa y este acciona el movimiento del sistema de excéntricas. Y los tres tipos diferentes depende de la alimentación eléctrica al motor.

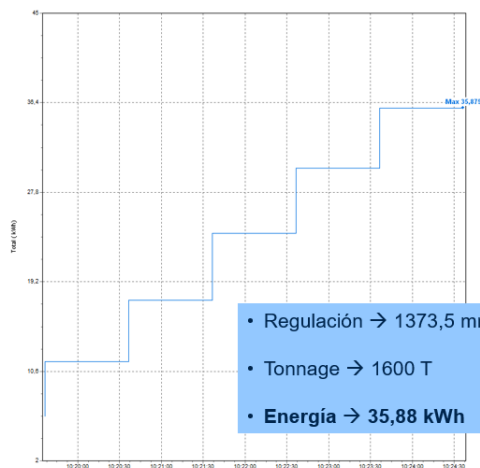
1. Motor con arranque directo (sin variador)
2. Motor con variador no regenerativo
3. Motor con variador regenerativo

Se empezó a abordar este problema después de detectar un comportamiento anómalo de la prensa, la cual estaba trabajando en un esfuerzo mucho superior al requerido, gracias el sistema de monitorización del centro de gravedad, que explicaremos más en detalle los casos reales encontrados en el siguiente apartado. A

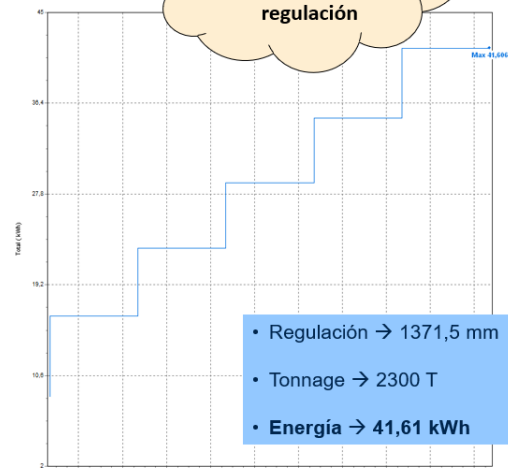
partir de este caso comparamos consumos para un valor del tonelaje elevado, que era causado por tener un parámetro de regulación del carro 2 mm por encima del necesario, y vimos que éramos capaces de ahorrar alrededor de 58 kWh que traducido en horas de trabajo al final de año es un consumo a tener en cuenta debido al coste de precio de la luz que se está pagando de más innecesariamente.

## USE CASE

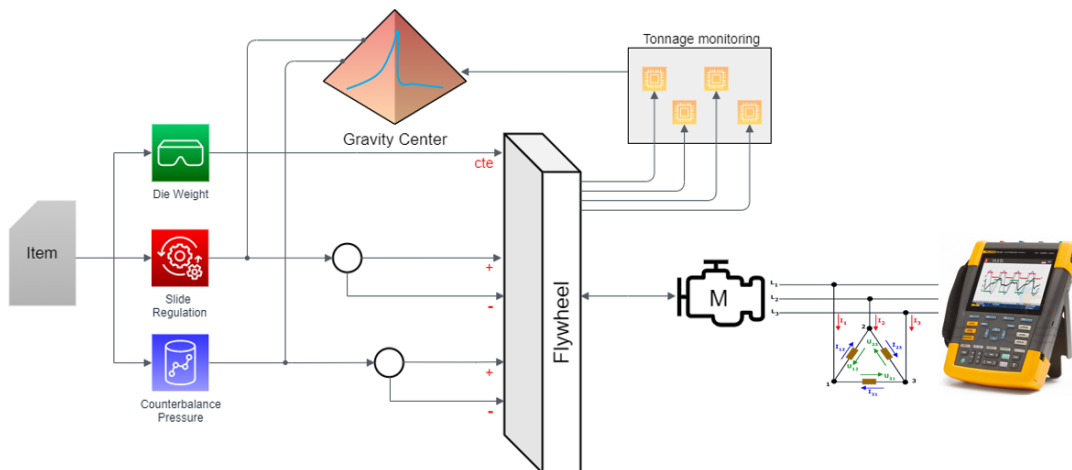
### Medición de consumos con diferente esfuerzo



Ahorro de 5,75 kWh en 6 minutos de medición con el ajuste de la regulación

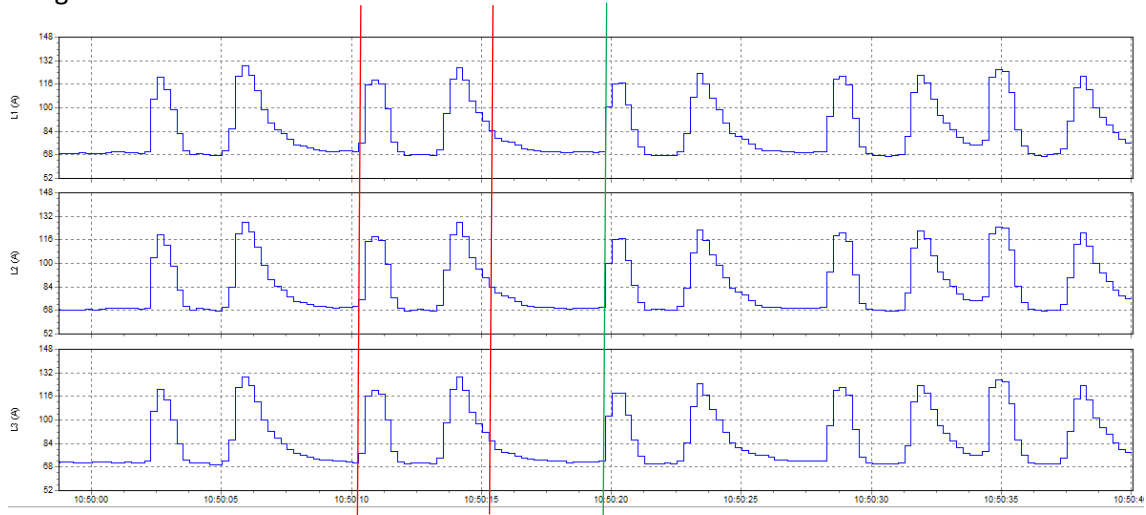


Por lo tanto, se prosiguió a analizar cuáles eran las variables que afectaban directamente al consumo realizado por el motor eléctrico en el proceso de estampación, que son el peso de la matriz, la presión de compensación y la regulación del carro. Siendo compensación un sistema clave en la matriz para ayudar a subir la matriz reduciendo picos de consumo y también sirve para tener una bajada controlada de la matriz reduciendo el esfuerzo de los diferentes elementos mecánicos que intervienen en el movimiento de la matriz como el sistema de excéntricas. Con todo esto se plantea el siguiente algoritmo de ajuste automático a programar en el PLC, donde conociendo los consumos para los diferentes parámetros podemos ser capaces de modificarlos, siempre que no afecte a la calidad del producto final, ahorrando en el consumo energético.



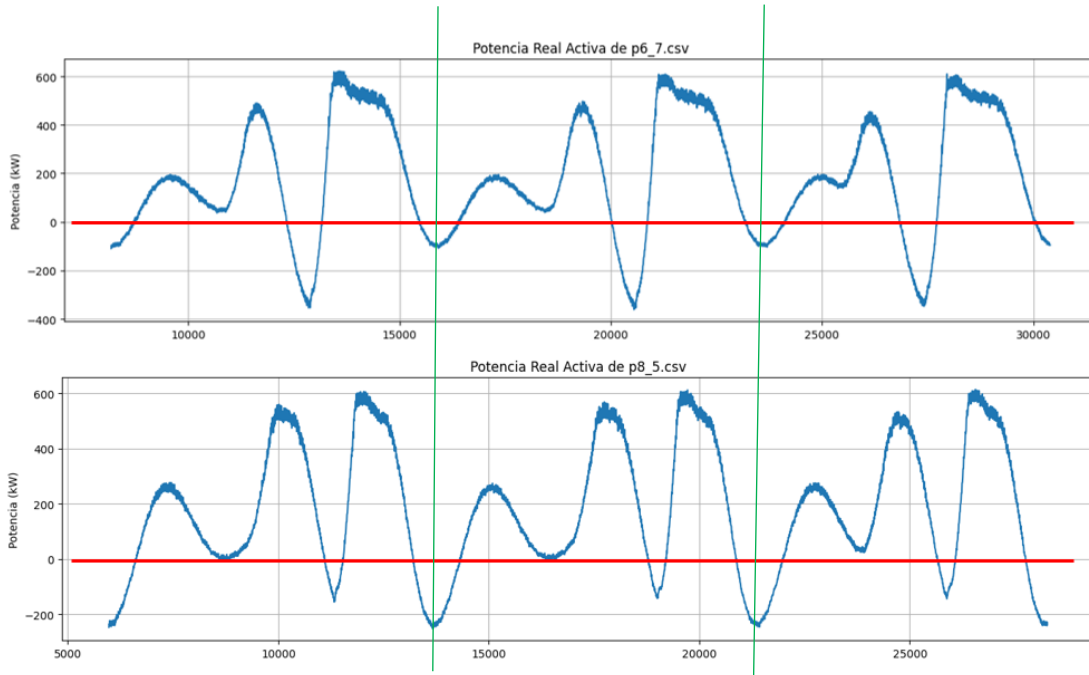
Después de realizar las mediciones de consumos de los diferentes tipos de arranque entendemos mejor cómo se comporta el uso de la energía para cada tipo de prensa. Con esto tenemos una gran ventaja a la hora de proponer el algoritmo de optimización de parámetros de prensa para asegurar el mínimo de energía consumida.

En el caso del arranque directo las señales entre ciclo y ciclo que hemos podido medir tiene la siguiente forma.



Entre las dos líneas rojas tenemos la intensidad medida del motor eléctrico durante el movimiento de la pieza y posteriormente la intensidad hasta que empieza el siguiente ciclo en la línea verde. Se ha visto que el comportamiento del consumo no varía entre ciclo y ciclo cuando la prensa está parada, sea cual sean los parámetros de presión de compensación introducidos en el proceso, el cambio en el comportamiento de la señal medida solo era durante el movimiento de la prensa, por lo tanto, el algoritmo propuesto solo tendrá en cuenta el consumo realizado en esta ventana temporal.

A diferencia de los motores que tiene variador, tanto regenerativo como no regenerativo, ya que, en este caso, dependiendo de la inercia que tengamos en el volante de inercia el comportamiento del consumo no solo variaba durante el movimiento de la prensa para diferentes valores de la presión de compensación, sino que también se vio un cambio en el comportamiento del consumo durante el resto de ciclo, incluso cuando la prensa está parada. Por eso en estos casos el algoritmo medirá el consumo durante todo el ciclo para ajustar parámetros.



En este caso podemos ver como durante todo el ciclo, incluso cuando la prensa está parada, el consumo energético del motor eléctrico también varía. Por lo tanto, aquí se medirá el consumo de todo el consumo para obtener el mínimo.

Los siguientes pasos, una vez se pueda validar y verificar que tenemos un ahorro económico tangible con el algoritmo propuesto sería pasar a realizar el proyecto y probarlo en un caso real para verificar que ajusta los parámetros de manera que minimizamos el consumo energético.

### 3. Digital Twin

Desarrollo del gemelo digital completo del proceso de estampación. La definición comúnmente aceptada por la comunidad científica del Digital Twin dice que es una metodología donde obteniendo parámetros de trabajo directamente del proceso, se embebe en una simulación y dependiendo del resultado de esta se modifican parámetros de trabajo reales para obtener una mejora en el proceso, todo esto de manera automática y en tiempo real. Conforme se ha enfocado el ajuste del consumo energético se podría considerar un primer paso hacia el digital twin en el proceso de estampación. Pero tenemos más necesidades en el proceso y una de ellas es asegurar una correcta calidad del producto final. Para ello el enfoque que proponemos para llevarlo a cabo consiste en obtener un resultado de la simulación lo más ajustado a la realidad introduciendo la máxima cantidad de datos que tenemos del proceso en tiempo real. Y aquí seguimos trabajando en el problema que tenemos que sería poder comparar el resultado de la simulación con el resultado de la pieza fabricada, debido a la complejidad de obtener un output fiable de una cierta cantidad de piezas fabricadas, que será la línea que se va a seguir en el periodo restante del doctorado.

#### 3.1. Hacia un gemelo digital en tiempo real para determinar la calidad de la pieza producida

Con el nivel de monitorización de datos alcanzado y toda la información del proceso disponible en tiempo real, se nos presentan diversas oportunidades como las que se han presentados en los puntos previos, además de nuevas herramientas a desarrollar en un futuro

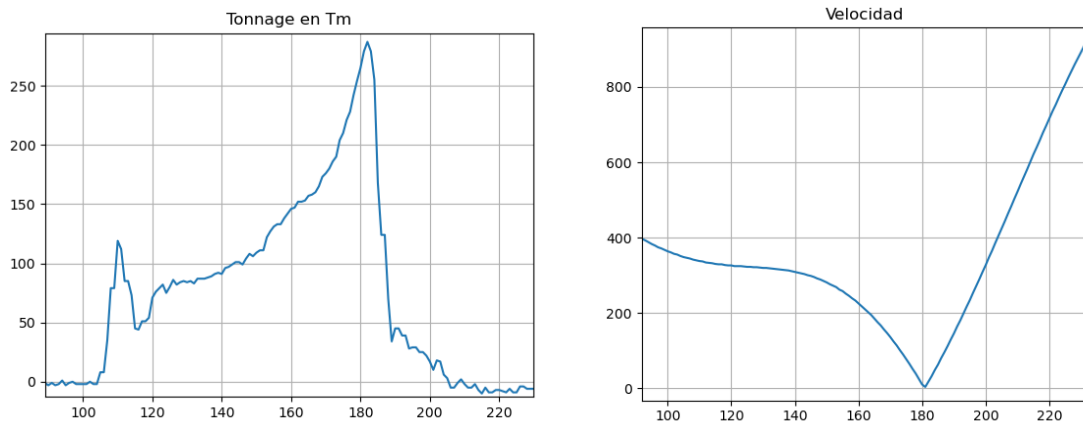


utilizando los recursos disponibles tanto en la literatura como la que se pueda desarrollar a partir de los conocimientos del proceso obtenidos a lo largo de la tesis. Un ejemplo el cual se ha empezado a desarrollar es el que encontramos en el siguiente artículo, S. Dou and J. Xia. *Analysis of sheet metal forming (stamping process): A study of the variable friction coefficient on 5052 aluminum alloy*. *Metals* (2019): 9-8, p. 853, donde obtienen un coeficiente de fricción variable que les permitía estimar con precisión el espesor de la pieza final. Han llegado al tal punto mediante la realización de un test de tribología, el cual les daba el coeficiente de fricción en una superficie de aluminio para posteriormente verificar el valor del test con la estimación mediante la ecuación que proponen los autores en el artículo. Obteniendo el coeficiente de fricción, a partir de la velocidad y la fuerza ejercida durante el proceso, más próximo a la realidad que con las consideraciones habituales que se suelen hacer en estos casos. Para la obtención del coeficiente de fricción proponen la siguiente ecuación,

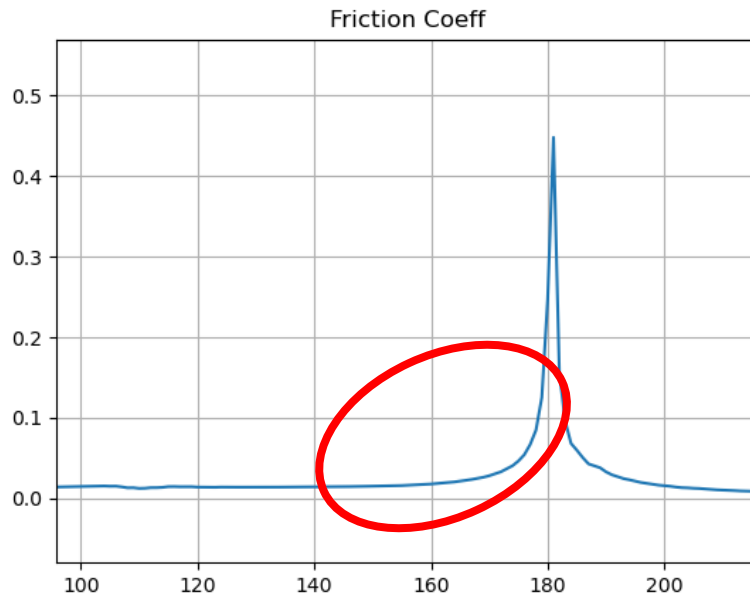
$$\mu = \frac{1.849P + 13.3}{(P + 2.446)(0.9193P + 1.467 + v)}$$

obtenida con la función inversa a partir de los diferentes valores de velocidad y carga realizados en las pruebas de tribología. Donde  $P$  es la fuerza aplicada y  $v$  es la velocidad de deslizamiento de la muestra con el molde.

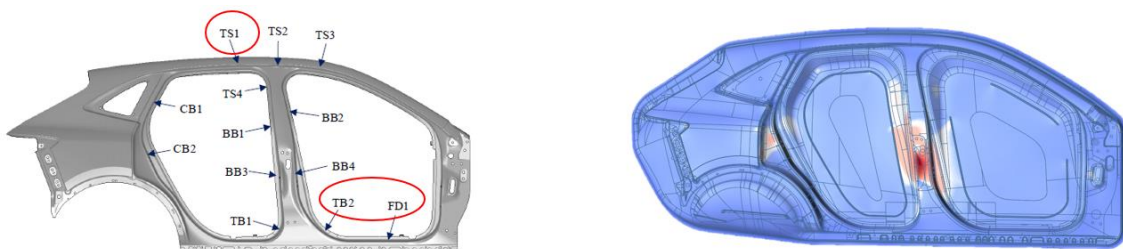
Probamos esa ecuación con nuestros datos buscando lo que decía Einstein: "*Ninguna cantidad de experimentación puede probar definitivamente que tengo razón; pero un solo experimento puede probar que estoy equivocado*", es decir, que el resultado de fricción estuviera fuera de toda lógica. Y como se muestra en las siguientes figuras, a partir de nuestros valores de tonelaje (izquierda) y velocidad (derecha).




Se obtiene como resultado un valor de la fricción dentro del intervalo  $[0, 1]$  demostrando que podemos estar en la línea correcta. Como vemos en la siguiente figura, en el momento que se realiza la embutición (entre la posición de prensa 130-180 aproximadamente) se obtiene un valor muy cercano al utilizado habitualmente en las simulaciones de estampación  $\mu = 0.1$ . Esto nos dio alas para seguir explorando en esta línea.




Teniendo en cuenta que obtener un coeficiente de fricción real en nuestro proceso debido al reducido tiempo de ciclo que disponemos es muy complejo con las tecnologías que tenemos hoy en día a nuestro alcance, ser capaces de obtener un coeficiente de fricción que se ajusta a la realidad a partir de nuestros datos medidos directamente del proceso nos da mucha ventaja hacia la obtención del gemelo digital. El siguiente paso en el desarrollo del DT se ha realizado una simulación para comprobar el valor de los espesores de una pieza real y poder compararlos con los espesores obtenidos mediante simulación utilizando diferentes valores de  $\mu$ . Para así poder verificar que los valores obtenidos de este parámetro crítico mediante la ecuación propuesta concuerdan con los valores reales y ser capaces de predecir el espesor de la pieza.






Point	Thickness (mm)	Thinning (%)		Point	Thickness (mm)	Thinning (%)
TS1	0,597	17,083		TS1	0,68	7,353
TS2	0,67	8,219		TS2	0,66	9,589
TS3	0,66	9,589		TS3	0,68	7,353
TS4	0,67	8,219		TS4	0,67	8,219
BB1	0,68	6,849		BB1	0,67	8,219
BB2	0,62	15,068		BB2	0,65	12,307
BB3	0,63	13,698		BB3	0,62	15,068
BB4	0,64	12,328		BB4	0,63	13,698
CB1	0,69	5,479		CB1	0,68	7,353
CB2	0,67	8,216		CB2	0,65	12,307
TB1	0,68	6,849		TB1	0,67	8,219
TB2	0,62	15,068		TB2	0,65	12,307
FD1	0,64	12,328		FD1	0,69	5,479

## REFERENCIAS

- [1] Peinado-Asensi, I., Montes, N., and García, E. (2022). *In Process Measurement Techniques Based on Available Sensors in the Stamping Machines for the Automotive Industry*. In Key Engineering Materials, vol. 926, Trans Tech Publications, Ltd., pp. 853–861.
- [2] Peinado-Asensi I., Montes N. and García E. (2022). *In Situ Calibration Algorithm to Optimize Energy Consumption in an Automotive Stamping Factory Process*. In Proceedings of the 19th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics - Volume 1: ICINCO, pp. 169–176.
- [3] Peinado-Asensi, I., Montes, N., García, E., and Falcó, A. (2022). *Towards a Hybrid Twin Model to Obtain the Formability of a Car Body Part in Real Time*. In Key Engineering Materials, vol. 926, Trans Tech Publications, Ltd., pp. 2277–2284.

DocuSigned by:  
  
 1C3DB295F629466...  
 oct.-19-2022

**Fdo. D. Iván Peinado Asensi**  
 Doctorando

<p>DocuSigned by:              98EED89F57644D3...            oct.-18-2022</p> <p><b>Vº Bº D. Eduardo García Magraner</b>            Codirector de Tesis            Fundación para el Desarrollo y la Innovación</p>	<p>DocuSigned by:              0282CBB1C2D24F1...            oct.-18-2022</p> <p><b>Vº Bº D. Nicolás Montes Sánchez</b>            Codirector de Tesis y Encargado del Seguimiento            Universidad UCH CEU</p>
<p>DocuSigned by:              7843E5773FBB4D1...            oct.-19-2022</p> <p><b>Vº Bº D. Enrique Roig Pérez</b>            Encargado del Seguimiento            Fundación para el Desarrollo y la Innovación</p>	