

# Diseño e Integración de Máquina Flexible Utilizada para el Control de Calidad de Componentes de un Motor Combustión Interna

Ing. José Luis Moreno Solís<sup>1</sup>, Dra. Ma. Guadalupe Ortiz López<sup>2</sup>,

**Resumen**— Un sistema flexible de manufactura tiene la capacidad de fabricar diversas variedades de productos en tamaños de lote variables. En el presente trabajo dicho concepto se extiende a una máquina que permite realizar pruebas de calibración a diversos modelos de turbocargadores. Partiendo de las características físicas de la familia de modelos a calibrar, así como de los requerimientos en diversos rubros y normativas que rigen a las ramas involucradas en su integración tales como la mecánica, neumática, seguridad industrial, manufactura y ergonomía, se conceptualiza, diseña y realiza la posterior integración de tecnologías que dan por resultado un banco de pruebas de control de calidad altamente flexible. En una primera etapa dicho conjunto operado de manera semiautomática permite la calibración de cuatro diferentes turbocargadores. Finalmente se propone una serie de modificaciones que mediante la automatización total del conjunto que permitirá extender su uso a la calibración de n número de modelos.

**Palabras clave**— Sistema flexible, integración de tecnología, familia de partes, motor diésel, turbocargador

## Introducción

Los sistemas de manufactura flexibles surgen en los años 80's como una respuesta que permitió a las compañías sobrevivir a la situación de la industria manufacturera que se veía azotada por una recesión económica surgida por el incremento de la sobreproducción, cierres de empresas y su consiguiente bancarrota. El término manufactura flexible está relacionado con la rápida adaptación a la fabricación con cambios dinámicos, teniendo en últimas tres décadas precedentes en compañías con la habilidad de adherirse a cambios en procesos de producción para nuevos productos o modificaciones de estos sin aumentar tiempos de procesos (Francas et al., 2011). Los sistemas flexibles tienen la capacidad de aumentar la respuesta a cambios en los mercados al generar una mayor variedad de productos por medio de sistemas automatizados (Querol et al., 2015), extendiéndose dicho concepto no solo a las actividades puramente productivas sino también alcanzando ámbitos tales como el manejo de materiales o el control de calidad.

El objetivo del presente trabajo es describir el proceso seguido para la conceptualización, el diseño e integración de los componentes de una máquina flexible para el control de calidad de turbocargadores, en cuyas etapas se utilizó tecnología que permite satisfacer las necesidades del cliente en diversos rubros y normativas de varias ramas involucradas tales como mecánica, seguridad industrial, manufactura y ergonomía.

## Descripción del Método

Para desarrollo y fabricación de nuevos productos es básico para el fabricante diseñar de un proceso de alta efectividad el cual se refleja en los costos de producción, la calidad y tiempo de producción. En contraparte, el comprador requiere de bajos costos, alta calidad y corto tiempo de producción. Para lograr el equilibrio ante estas dos pautas, es necesario el procesamiento de información que lleve a la planeación y desarrollo adecuados del producto. En el proyecto descrito en este trabajo, dicho desarrollo debe tener como resultado una máquina calibradora de cuatro diferentes modelos de turbocargadores que en la actualidad maneja el cliente, dejando abierto la posibilidad de introducir nuevos modelos a un mediano o largo plazo. Para lograr estos objetivos es necesario que la máquina a diseñar considere las tecnologías, conceptos y métodos que se describen a continuación:

### *Sistema flexible de manufactura*

Se define como un grupo de estaciones de trabajo altamente automatizadas interconectadas con manejo de materiales y sistemas de almacén automáticos; todo esto controlado mediante sistemas computacionales distribuidos. Entre los principales objetivos se encuentran: incrementar la variabilidad en productos, reducción de tiempos de entrega, una producción regulada y automatizada, evitar en lo posible actividades manuales en proceso de producción, procesar diferentes tamaños de lotes así como la reconfiguración rápida tanto del sistema de control como del sistema físico.

<sup>1</sup> El Ing. José Luis Moreno Solís es estudiante de maestría del Posgrado en Manufactura Avanzada de CIATEQ A.C., San Luis Potosí, México, jose.luis.moreno.solis1991@gmail.com

<sup>2</sup> La Dra. Ma. Guadalupe Ortiz López es profesor-investigador de la Universidad Politécnica de San Luis Potosí de la carrera de Ingeniero en Tecnologías de Manufactura, San Luis Potosí, México, guadalupe.ortiz@upslp.edu.mx

Por otro lado, al desarrollarse una máquina flexible, se reduce sustancialmente el consumo de energía por máquinas inactivas. Varios autores coinciden en que se puede llegar a un ahorro de energía por máquina de 10 – 25% reduciendo tiempos de puesta en marcha e inactividad en las máquinas (Popp et al., 2016), logrando una mayor eficiencia energética.

#### *Volumen de producción*

En un sistema flexible de manufactura es vital evitar la escasez de adaptación dinámica que pueda llegar a dar como resultado una sobrecarga de tiempos y bajo desempeño en cambios de modelo / proceso / producto. Por esta razón se emplean metodologías tales como sistemas reconfigurables de manufactura, los cuales dan lugar a sistemas de programación modular ayudando al cambio y ajuste rápido de las máquinas (Querol et al., 2015), pasando de la producción en masa a una producción personalizada, realizada por lotes de menor tamaño y desarrollando nuevas tecnologías para estos nuevos cambios (Wuthrich & Hof, 2019).

Para que los volúmenes de producción sean homólogos se requiere realizar familias de productos (Querol et al., 2015). Inicialmente se determinen las características de cuales modelos pueden generar familias por sus características similares de forma geométrica, materiales y/o procesos, esto con la finalidad de generar un desarrollo de herramientas comercial benéfico para la producción arbitraria de modelos tratando de llevar el costo de herramientas a un valor cero (Francas et al., 2011).

#### *Metodologías de manufactura esbelta*

Adicional a la capacidad de una máquina flexible de realizar una reconfiguración rápida se requiere una alta fiabilidad y un adecuado costo de fabricación de los productos (Hermann et al., 2020). La manufactura esbelta, es un método de organización del trabajo que se centra en la mejora continua y optimiza el sistema de producción al eliminar tanto desperdicios como actividades que no suman ningún valor al proceso. Basada en el sistema de producción Toyota consta múltiples metodologías para lograr un sistema de producción “Justo a tiempo” (Oliveira et al., 2017) y se enfoca en mejorar la distribución, calidad, variedad de producto, costo, tiempo de elaboración, eliminación de desperdicios y valor no agregado. Para el desarrollo de la máquina flexible se aplicaron la metodología SMED (Cambio de herramienta en un solo dígito de minuto), metodología 5’s y TPM (Mantenimiento productivo total) (Oliveira et al., 2017).

Al combinar los principios de las metodologías SMED y TPM, se puede lograr alta rentabilidad de equipos, incremento en tiempo de vida de maquinaria – equipo, buenas condiciones para el soporte técnico, aumento de eficiencia y beneficios para la organización entre los departamentos de producción – mantenimiento (Oliveira et al., 2017). Con el fin de lograr mantener la maquinaria flexible en óptimas condiciones para el uso continuo del proceso es necesario tener orden y limpieza en la misma, por lo que se implementa conjuntamente con las anteriores la metodología 5’s.

#### *Jerarquías de redes de comunicación entre equipos*

Se denomina estructura jerárquica aquella en la cual se da la categoría más alta a un equipo y a partir de él, se define una pirámide donde se colocan todos los equipos restantes, teniendo entre ellos una relación maestros / esclavos. Un segundo tipo es la estructura heterárquica, donde se toman los equipos por iguales en nivel, teniendo una autonomía y cooperación para el desarrollo de los objetivos.

Para una máquina flexible una propuesta bien aceptada es utilizar una estructura holónica la cual hace una combinación de las dos estructuras antes mencionadas, y en donde las tareas de control se distribuyen a “Holons” los que se definen como elementos autónomos – cooperativos / físicos – lógicos, con función de la recolección de información de los equipos y ambiente de trabajo. Uno de sus grandes beneficios es la generación de otros “Holons”, por lo que su organización es dinámica y automática dando lugar a la adaptación del sistema en cambios de modelo (Naber & Johnson, 2014).

#### *Ergonomía*

Al incorporarse mano de obra humana en los sistemas flexibles semiautomáticos, quedará una huella de trabajos repetitivos con alta frecuencia, dejando estragos y residuos de fuerzas aplicadas y estresantes posturas para el cuerpo humano durante la jornada laboral. A largo tiempo estos pequeños residuos pueden llevar a daños musculoesqueléticos en el trabajador. Por lo tanto, el diseño de la máquina flexible se apoyará en normativas de equipos de carácter útil para salvaguardar la integridad física de los trabajadores (Brito et al., 2017), ya que se contempla en algunas etapas la intervención humana, con el objetivo de optimizar la seguridad, salud y productividad correspondiente a los trabajadores usuarios tomando en cuenta factores de posturas del cuerpo al operar la máquina, accesibilidad y alcance (Brito et al., 2017).

Una vez realizada la revisión de las tecnologías y conceptos involucrados en el proyecto que se reseña, se realizará una breve descripción del elemento a calibrar así como del proceso seguido para la implementación física de la máquina flexible implementada para realizar pruebas y calibración con un alto control de calidad.

### *Turbocargador*

Uno de los desarrollos de mayor uso tanto en la industria como en la sociedad son los motores de combustión interna: a gasolina basados en el ciclo Otto, y motores a diésel basados en su ciclo homónimo (Ge et al., 2005). En un motor de combustión interna se tiene una relación entre combustible – emisión de fluido, debido tanto a la presión de fluidos como a la oxigenación en el proceso de combustión, entre otras variables (Naber & Johnson, 2014). Los beneficios al usar sistemas de recuperación o regeneración de energía llevan a presentar mejoras en el consumo del combustible. El desperdicio de energía se puede evitar mediante un componente añadido en dicho sistema de escape, ya que se expulsan gases con alta temperatura y presión que pueden ser reutilizados. En los motores diesel se ha llevado a cabo una carrera tecnológica en el desarrollo de sistemas de recuperación de calor residual o “WHR” por sus siglas en inglés, entre los que destacan el turbocargador, la turbo-composición, el ciclo Rankine y la cabina de enfriamiento, entre otros (Poran & Tartakovsky, 2015).

### *Definición familia de partes a calibrar en la máquina flexible*

La implementación de sistemas flexibles puede darse en todos los rubros y ámbitos de industria de productos y servicios, aunque no en todos es redituable o con retorno de inversión a corto plazo. Por esta razón, en el proyecto descrito la primera inversión a realizar es una máquina flexible en donde se trabajarán modelos que pertenecen a una familia de partes similares de baja producción, los cuales en conjunto llevaran a una mediana producción. Como puede observarse en el Cuadro 1, al realizar una máquina flexible deja a disposición para futuros herramientas ahorros hasta del 80% respecto al costo total de cuatro máquinas individuales. Es importante considerar que el diseño y fabricación de esta máquina son únicos, ya que no está disponible de manera comercial, por lo que el costo estimado en la fabricación de una máquina se toma como un 100%.

	Maquinas método convencional				Maquina método flexible			
	01	02	03	04	01	02	03	04
Máquina base	97%	97%	97%	97%	97%	0%	0%	0%
Herramental	3%	3%	3%	3%	3%	20%	20%	20%
Total	100%	100%	100%	100%	100%	20%	20%	20%
Inversión total	400%				160%			

Cuadro 1. Comparativo de máquinas

Tomando en cuenta los diversos modelos que pueden encontrarse y construirse dependiendo la demanda de cliente final, se da entrada a la producción por familias de productos, con estas familias se genera una parte compuesta derivada por las operaciones de calibrado y geometría del producto. Como se muestra en la Figura 1 (a) y (b) esta prueba y calibración verifica el ensamble mediante: la instalación de tuercas y atornillado marcada como a), la longitud preestablecida marcada como b), realiza la prueba de funcionamiento marcada como c), se realiza la aplicación de torque y resina en tuerca para la fijación de la longitud preestablecida marcada como d) y por último se instala un seguro truack para fijar el vástago marcada como e).

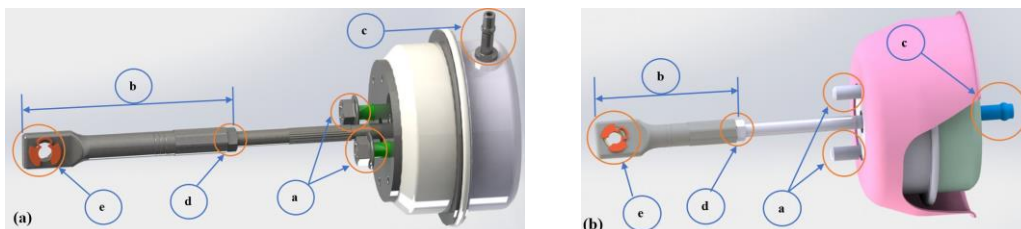


Figura 1. Operaciones de prueba y calibración: (a) modelo A, (b) modelo B

Inicialmente se determinó “la parte compuesta” que permite que todos los componentes pueden introducirse en la máquina flexible. Para ello se tomó como referencia la geometría del componente turbocargador, así como las operaciones en las cuales se tienen herramientas iguales o similares para realizarlas. Partiendo de este principio,

todos los productos deberán estar en la misma posición dentro de la máquina, al trasponer estos productos se tiene como resultado la Figura 2 (a) y (b) en donde se fija como “cero / origen pieza” al punto del producto identificada como a), la cual será el lugar para detectar el ajuste de longitud.

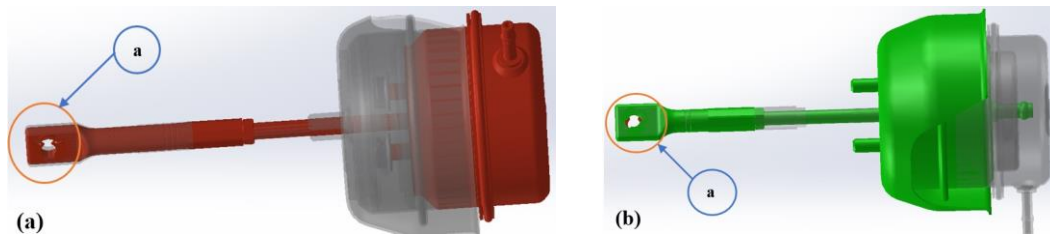


Figura 2. Cero / origen pieza: (a) modelo A, (b) modelo B

En el desarrollo de la máquina flexible deben de tomarse en cuenta todas las normativas y variables que están en su entorno de trabajo, tales como el manejo de materiales, movimientos de operadores, diferentes modos de operación, transporte, entorno, servicios (energías y mantenimiento).

Una vez realizada la recolección de información, se llevó a cabo una segunda etapa en la cual se considera la variedad de productos que se pueden introducir a largo plazo, tomando las dimensiones generales de la forma de todos los componentes de la familia, considerando a cada elemento como un subproducto a ensamblar. Por el alto volumen de variedad de productos que se pueden introducir en el largo plazo se tomaron dimensiones generales de la forma de los subproductos, esto quiere decir que nuestro punto principal es componente de la parte compuesta mostrada en la Figura 3 y todos los subproductos pueden estar instalados en un área definida pero variable entre modelos. Por lo tanto, se genera un “área de trabajo” de todos los subproducto, con una forma cilíndrica de 350 mm de diámetro y una altura de 500 mm. Esta área está en torno al eje de rotación del componente.

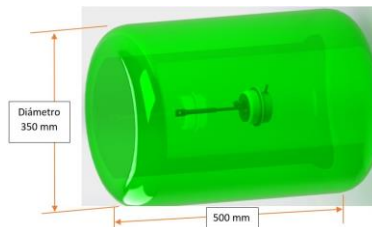


Figura 3- Área de trabajo familia de partes

La máquina flexible tiene la capacidad de realizar dos operaciones diferentes: “atornillado” y “calibración” del producto ya sea de forma separada o en secuencia. Por lo tanto, también implementa la característica de un secuenciador, es decir que se puede condicionar la secuencia de ensamble en un conjunto de “Pasos”. Esta serie de “Pasos” se conforma de una parte informativa con la descripción de la acción ejecutora, una parte con información de sensores o bits de control y una tercera de salidas a controlar. Así mismo puede realizar rutinas separadas para verificar condiciones de los “Patrones Maestros” definidos para realizar las pruebas.

#### *Integración de componentes de la máquina flexible*

A continuación, se describe en general las áreas, procesos y equipos utilizados en la máquina flexible. Para llegar a los requisitos de la Empresa Cliente, se prioriza temas de seguridad, ergonomía, proceso y mantenimiento.

La estructura sobre la que va montada la máquina por requerimiento es conformada de perfil estructural de aluminio, con una placa de acero galvanizado para utilizar como área de operación. Tienen un recubrimiento para evitar oxidación. Por requerimiento del cliente se manejan rangos de peso para actividades de proceso de 3 kg máximos, mientras que para actividades fuera de proceso de 12 kg máximo. Estos requerimientos cumplen las normativas de peso y alturas ergonómicas según las normas EN 547, EN 614, y EN ISO 14738.

La estructura es diseñada no solo en el entorno de ergonomía sino también para proporcionar seguridad tanto al operario como a los equipos utilizados en el proceso. Debido a que la carga de la máquina se hará en una primera etapa de manera manual por la parte frontal, se restringe el acceso de la persona y sus extremidades al momento de realizar dicha operación mediante paneles de policarbonato transparentes en sus laterales y parte posterior mientras que la parte superior se opta por una reja cuadrículada (30 mm de lado cuadrado). Igualmente se opta por el uso de cortinas ópticas de seguridad, en conjunto con un botón táctil que dará la señal para el inicio de

ciclo de operación. La conexión de estos elementos está debidamente instalada bajo las normativas ISO 13851 / ISO 13855. De igual manera cuenta con paro de emergencia en la parte frontal de la máquina en donde el operador tiene interacción con el proceso conforme el estándares la IEC 60204-1 y norma ISO 13850.

El control y manejo de energía eléctrica está situado en un gabinete que cumple con los requerimientos de las normativas y requerimientos específicos de la Empresa Cliente. La máquina cuenta con un controlador lógico programable PLC con sus respectivas expansiones de entradas y salidas digitales además del uso de dispositivos descentralizados para el manejo de electroválvulas. Incluye un relevador encargado de monitorear las funciones de seguridad como lo son el paro de emergencia y cortinas ópticas de seguridad. Los materiales descritos en los diagramas eléctricos poseen un grado de protección de al menos IP2X y aislamiento conforme las normativas IEC 60204-1 / ISO 12100.

También se realizó el etiquetado de todos los elementos dentro del gabinete eléctrico, eliminando el riesgo latente en el desarrollo de actividades de mantenimiento. Aunado a esto se colocó información del proceso de bloqueo de energías y disipación de energía residual. Se cuenta también con un sistema de tierra física.

Las operaciones a llevar a cabo en la rutina de calibración se llevarán a cabo de manera semi-automática. Por tanto deben realizarse dentro de un área en la cual el operador puede tener a su alcance todas las herramientas necesarias, cumpliendo con características de 5's, ergonomía y justo a tiempo que le permitirán evitar movimientos innecesarios, así como tener una mínima recolección de herramientas aunado al orden y limpieza de la máquina.

Dentro de las herramientas a utilizar se cuenta con un sensor basado en un transformador diferencial de variación lineal LVDT el cual detecta la posición y cambio de "cero / origen pieza", respecto a la calibración con aire presurizado con presión negativa o positiva. Como se mostró anteriormente la referencia denominada "cero / origen pieza" es la base para adoptar ciertas consideraciones dimensionales. Un primer paso para la calibración será ajustar un recorrido de 5mm en la zona de detección del LVDT. Como resultado se tienen las posiciones de distancia de ubicación LVDT al "cero / origen pieza" y la altura de la "Base Intercambio" a "cero / origen pieza". Al definir estas dimensiones se tiene una base para el diseño de nuevos herramientas.

Para la instalación de las tuercas necesarias para fijar la pieza se utiliza un atornillador eléctrico, con un rango de requerimiento de torque máximo de 47 N-m y mínimo de 34 N-m, con una variación de más/menos 30% para nuevos productos. El atornillador eléctrico también cuenta con extensión para mejorar su manipulación, ya que el diseño de los herramientas es resultado del "cero / origen pieza" lo cual genera diferentes posiciones y orientaciones del producto.

En la Figura 4 se muestra la placa denominada "Base Intercambio", la cual es fundamental para los cambios rápidos de configuración físicos de herramientas utilizando los principios de la metodología SMED. Como puede observarse esta base contiene posicionadores de manera que se pueden realizar los cambios de modelo mediante el movimiento de dos tornillos con solo "aflojar / apretar" para permitir lograr el tiempo requerido del cambio físico. Para generar la presión de aire positiva y negativa se cuenta con un controlador de presión, el cual incluye un conector neumático, según muestra la Figura 5. Se cuenta adicionalmente con retro – alimentación mediante un sensor.

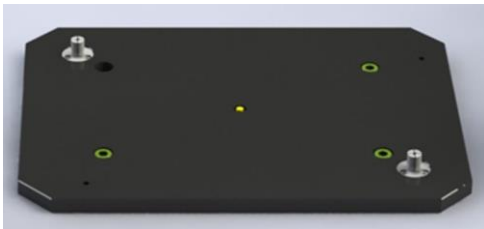


Figura 4. Base intercambio herramientas

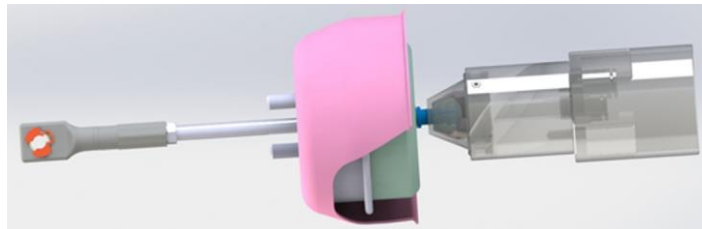


Figura 5. Conector neumático aplicación aire a presión

La sección operativa cuenta con un panel táctil de interacción HMI, mostrado en la Figura 6, en el cual se pueden acceder a la información y configuración del sistema de la máquina flexible y cuenta con código de colores con base a IEC 60204-1. Para su colocación se considera el promedio de alturas para hombres y mujeres determinado por la región en donde se encuentra la Empresa Cliente de 1500 mm del nivel del suelo. Este panel es la interfaz entre la máquina flexible y el operador que permite abordar cada uno de los puntos de prueba y dar el seguimiento correcto a las piezas probadas.

En cuanto a las redes de comunicación computacional se cuenta con diferentes dispositivos que se comunican con el PLC según muestra el diagrama de interconexión de la Figura 7. Los protocolos de comunicación utilizados permiten esta intercomunicación. La interfaz ETHERNET IP permite el intercambio de datos entre el PLC con el panel de control (HMI) y el atornillador HFC 3000 II. Además, brinda la disponibilidad de interconexión a la



red mediante un Ethernet Switch el cual proporciona un puerto dedicado para servicio. También se cuenta con una tarjeta RS232 para establecer comunicación con el generador de presión de aire positiva y negativa denominado PACE 5000. El PLC empleado como controlador posee también un módulo de entradas digitales y un módulo de salidas digitales, así como dos puertos de comunicación Ethernet/IP Ethernet Switch.



Figura 6. Pantalla HMI

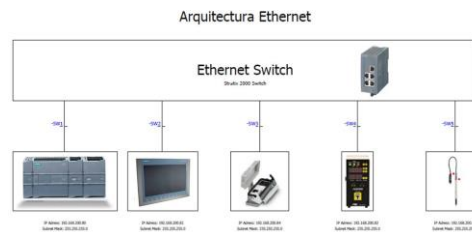


Figura 7. Red interconexión componentes

## Comentarios Finales

### Conclusiones

En el presente trabajo se describe el proceso desarrollado para la implementación de una máquina flexible adecuada a los objetivos de la empresa cliente, que en un corto plazo requiere una maquina con la cual se pueda realizar la calibración del ensamble y pruebas finales de funcionamiento para cuatro modelos de turbocargadores que se producen en una variedad media o baja en este momento.

### Recomendaciones

En la máquina descrita, se garantiza también a un mediano o largo plazo, la posibilidad de incorporar equipos tales como un brazo robótico para la carga y descarga de la pieza en la prueba, así como mayor trazabilidad de productos individualmente (impresión de código QR). Otro objetivo a futuro, es la interconexión de la maquina al sistema computacional instalado en planta, para manejarla en conjunto con los servidores de la misma.

## Referencias

- Brito, M., Ramos, A. L., Carneiro, P., & Gonçalves, M. A. (2017). Combining SMED methodology and ergonomics for reduction of setup in a turning production area. *Procedia Manufacturing*, 13, 1112–1119. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.172>
- Francas, D., Löhdorf, N., & Minner, S. (2011). Machine and labor flexibility in manufacturing networks. *International Journal of Production Economics*, 131(1), 165–174. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.03.014>
- Ge, Y., Chen, L., Sun, F., & Wu, C. (2005). Thermodynamic simulation of performance of an Otto cycle with heat transfer and variable specific heats of working fluid. *International Journal of Thermal Sciences*, 44(5), 506–511. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2004.10.001>
- Hermann, L., Rey, J., Barth, S., & Bergs, T. (2020). Systematic generation of manufacturing changes for safety-critical components. *Journal of Manufacturing Systems*, 56(June), 270–280. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.008>
- Naber, J. D., & Johnson, J. E. (2014). Internal combustion engine cycles and concepts. *Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance: Towards Zero Carbon Transportation*, 197–224. <https://doi.org/10.1533/9780857097422.2.197>
- Oliveira, J., Sá, J. C., & Fernandes, A. (2017). Continuous improvement through “Lean Tools”: An application in a mechanical company. *Procedia Manufacturing*, 13, 1082–1089. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.139>
- Popp, R. S. H., Liebl, C., & Zaeh, M. F. (2016). Energy Flexible Machine tool Components - An Investigation of Capabilities. *Procedia CIRP*, 57, 692–697. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.120>
- Poran, A., & Tartakovsky, L. (2015). Energy efficiency of a direct-injection internal combustion engine with high-pressure methanol steam reforming. *Energy*, 88, 506–514. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.05.073>
- Querol, E., Romero, F., Estruch, A. M., & Serrano, J. (2015). Design of the Architecture of a Flexible Machining System Using IEC61499 Function Blocks. *Procedia Engineering*, 132, 934–941. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.580>
- Wuthrich, R., & Hof, L. A. (2019). Low Batch Size Production of Glass Products requiring Micrometer Precision. *IFAC-PapersOnLine*, 52(10), 319–322. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.10.050>