

Validación de proyecto de transformación digital productiva mediante la simulación por eventos discretos

Guillermo Vega¹, Emanuel Mansilla¹, Daniel Conte², José E. Martínez Ch³, Facundo Cobreros³

¹ Miembro del GIMSE UTN-FRC, Córdoba, Argentina
{ing.guillermovega, emamansilla11}@gmail.com

² Director del GIMSE UTN-FRC, Córdoba, Argentina
dconte@industrial.frc.utn.edu.ar

³ Becario de investigación, GIMSE UTN-FRC, Córdoba, Argentina
{jemartinezch, facundo.cobreros}@gmail.com

Resumen. Existe evidencia de que los líderes de empresas están preocupados por la capacidad de sus organizaciones de adaptarse a la nueva economía digital. Además, se constata que la mayor parte de los proyectos de transformación digital no alcanzan sus objetivos declarados, malgastando así grandes sumas de recursos. Se podría mencionar entonces que entre los principales desafíos para la transformación digital en las empresas se encuentra la incertidumbre respecto a los resultados que se podrían obtener de la asimilación de tecnologías digitales. En este sentido, el presente trabajo describe la experiencia práctica de una empresa metalúrgica que proyecta implementar una serie de sensores en una línea de producción, los cuales se espera generen datos de proceso que en su conjunto brindarán información valiosa que permita a los responsables controlar desvíos de procesos en tiempo real, reportar su performance y encontrar posibilidades de optimización. Con el fin de contar con herramientas que ayuden a reducir la incertidumbre respecto a los resultados esperados y los efectos que puedan generar sobre los procesos productivos la implementación de proyectos de transformación digital, se propone la utilización de la simulación por eventos discretos para validar dicho proyecto antes de su inversión. Los resultados obtenidos fueron satisfactorios.

Palabras claves: Simulación por eventos discretos, automatización, transformación digital, economía digital.

1 Introducción

Actualmente, la economía digital impacta en todos los ámbitos, tanto en el ámbito social, como el económico, como también en la forma de producir y consumir bienes y servicios. En dicho contexto, las empresas se encuentran motivadas a transformar o adaptar sus procesos a las tecnologías digitales con el fin de mantener o acrecentar su productividad y competitividad. La velocidad con que las empresas afronten dicha transformación marcará la evolución de su crecimiento [1].

Por tal motivo, los líderes de empresas están preocupados por la capacidad de sus organizaciones de adaptarse a la economía digital debido a que deben hacer frente a múltiples desafíos, tales como la falta de personal calificado, la incertidumbre en cuanto al impacto en la asimilación de tecnologías digitales, la resistencia al cambio, entre otros [2].

El trabajo que aquí se presenta describe una experiencia práctica de una empresa metalúrgica, ubicada en la ciudad de Córdoba - Argentina, que proyecta implementar una serie de sensores en una línea de fabricación para mejorar la gestión del desempeño de la producción en tiempo real.

Este proyecto de transformación digital productiva (TDP) tiene por objetivo la recopilación de datos de una línea de producción en tiempo real a través de sensores, con el fin de brindar información sobre la performance o desempeño de la línea y con ello, tomar decisiones para la optimización del proceso de producción o la corrección de las posibles desviaciones del mismo.

De esta forma, la empresa puede avanzar hacia un nuevo nivel de capacidades digitales, consolidando el establecimiento de una infraestructura acorde a los tiempos de la Industria 4.0, o denominada también como fase inicial [3].

La empresa en cuestión presenta interrogantes sobre el diseño del proyecto en cuanto a la instalación del sistema de sensores, donde se precisa identificar la ubicación de los mismos como también el tipo de datos a recoger, necesarios para brindar la información relevante para la toma de decisiones. Por tal motivo, el equipo de investigación y desarrollo (I&D) de la empresa solicita un estudio de simulación de procesos por eventos discretos con el fin de contar con los fundamentos suficientes que permita la definición de la instalación del sistema de sensores, reduciendo así la incertidumbre de los resultados esperados del proyecto de digitalización productiva.

Mediante la simulación de procesos, tecnología de la denominada Industria 4.0, se diseñan modelos virtuales que simulan procesos reales de manera simplificada para un mejor entendimiento del sistema que ayude a tomar decisiones adecuadas. En este caso, permite crear un modelo virtual que represente el funcionamiento de la línea de producción afectada al proyecto de TDP.

El análisis de un sistema a través de un modelo de simulación implica que la representación del sistema constituye una abstracción simplificada de la realidad apto para su ejecución en un ordenador y validado para poder tomar decisiones a partir de sus resultados [4]. El estudio del proyecto de transformación digital productiva mediante el uso de la simulación por eventos discretos se realizó gracias al aporte de los datos necesarios por parte del equipo de I&D de la empresa. Los datos fueron organizados y sistematizados mediante el uso de tablas en Excel que luego fueron adaptadas para su adecuada importación al software Simul8. El modelo desarrollado pasó por los procesos de verificación y validación correspondiente contando con la participación de los usuarios intervinientes en el proyecto.

Dicho modelo virtual se creó en Simul8, un software especializado en simulación por eventos discretos. Luego de construir el modelo virtual, se lo somete a un proceso de verificación y validación; posteriormente se procede a configurar las posibles

posiciones de los sensores para el recojo de datos del proceso. Además, se diseña un tablero de indicadores cuyos valores se generan a partir de los datos recogidos del proceso mediante diversas configuraciones de los sensores “simulados” en la línea de producción.

De esta forma se logra definir la instalación de los sensores a lo largo de la línea de producción, considerando su ubicación, tipo de sensor, cantidad de sensores, datos a recabar en tiempo real, entre otros aspectos.

El desafío del modelo de simulación consistió en poder representar el funcionamiento de los diversos sensores en el modelo de simulación y definir los datos a recoger que permita obtener información sobre el avance real de la producción en comparación con lo planificado.

Lo importante de esta publicación es demostrar las ventajas y utilidad que ofrece la simulación por eventos discretos como herramienta y tecnología de la Industria 4.0 para el estudio y desarrollo de proyectos de transformación digital productiva. Esto se sostiene por el hecho de prescindir de inversiones en infraestructura física o de equipos para realizar un análisis de los posibles resultados con el proyecto finalizado. Lo que permite reducir costos, tiempo y problemas en la ejecución y finalización del proyecto, además de reducir la incertidumbre respecto a los resultados esperados del mismo.

2 Descripción del Caso de Estudio

Para todo proyecto de simulación de procesos se requiere de la comprensión del comportamiento del sistema real. En esta sección se describe el funcionamiento de la línea de producción en estudio.

En la línea de producción se fabrican dos tipos de productos (A y B) que pasan por diversos procesos de mecanizado y tratamientos para obtener el producto final.

La figura 1 ilustra el proceso de producción de ambas piezas de manera resumida. El proceso inicia con la recepción de materiales prefabricados (p. ej. bulones) y otros materiales en bruto para ser mecanizados y tratados. Aunque existen operaciones de fabricación tercerizadas, el desarrollo del proyecto de TDP se centra en las operaciones dentro de la fábrica. La mayor parte de las operaciones de mecanizado tienen su control respectivo, lo cual establece qué piezas son aprobadas para seguir en el proceso de fabricación o si son extraídas por disconformidades. Además, en la figura 1 se muestran los buffer o stocks intermedios entre procesos.

En el proyecto de simulación se consideran también otros datos, como por ejemplo: los recursos disponibles para la producción (hrs de mano de obra y cantidad de operarios por turno), los planes de producción de la pieza A y B, el layout real de la línea de producción, la distribución y ubicación de las máquinas, la hojas de operaciones (de las cuales se obtienen los tiempos estándar de operación, los tiempos de carga y descarga de piezas, los tiempos por puesta a punto de máquina y/o por cambio de herramienta, entre otros).

Los tiempos indicados en las hojas de operación se ingresan al modelo como variables de tiempo, y se introducen al software Simul8 a través de planillas de Excel debido a la cantidad de tiempos y operaciones que conlleva el proceso de fabricación.

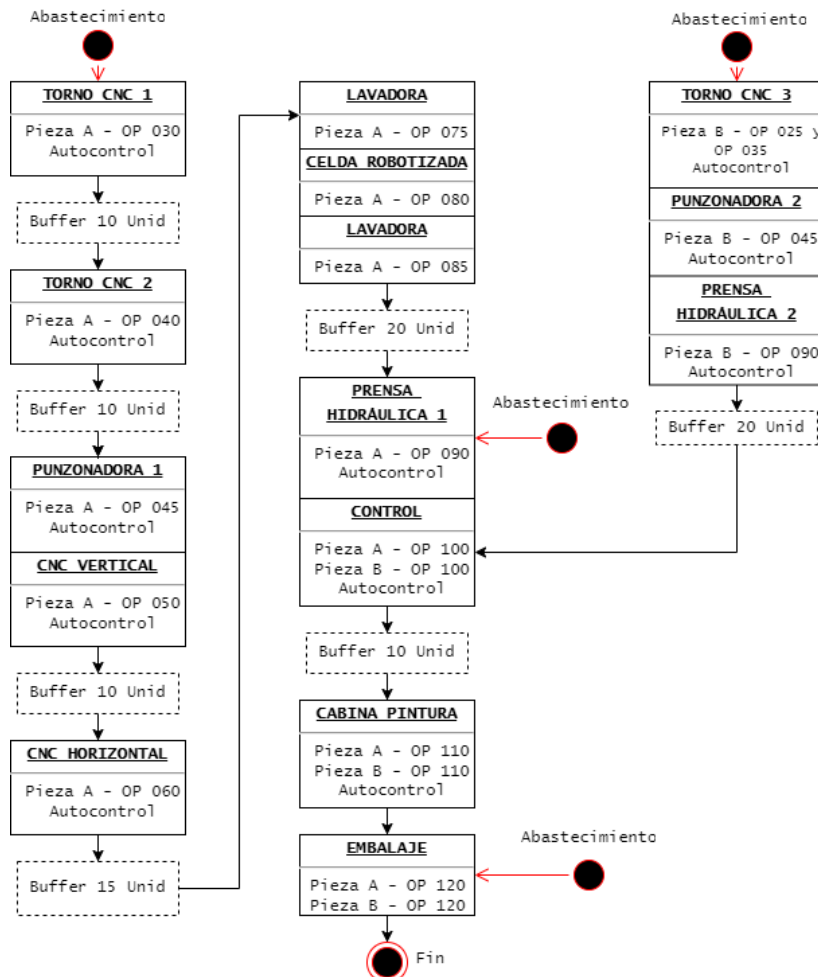


Figura 1: Representación gráfica del proceso de producción de las piezas A y B de la empresa metalúrgica (Fuente: Elaboración propia)

3 Desarrollo del modelo de simulación

Como se menciona en anteriores párrafos, el modelo de simulación busca identificar las posiciones adecuadas de los sensores a lo largo de la línea de producción, y a su vez, establecer los datos que han de recabar dichos sensores a instalar en la línea de producción, esto para proveer la información necesaria para el control del proceso en tiempo real.

La simulación debe ser capaz de ejecutar los planes de producción e informar los resultados esperados de la producción, como ser: el nivel de utilización de cada máquina y el nivel de ocupación de los operarios y cintas transportadoras, los tiempos de elaboración de cada pieza y su permanencia en la línea, entre otros, como se presenta en la sección de resultados.

Los resultados obtenidos del simulador sirven para contrastar con el proceso real, y generar alertas de desvío en tiempo real. Para esto, el simulador brinda información estadística que permite definir cuáles son las variaciones naturales del proceso, es decir, variaciones dentro de las cuales el proceso se encuentra bajo control.

Desarrollar el modelo virtual de la línea precisó de una metodología, que se expone a continuación:

3.1 Entrevista, reuniones y recolección de datos

Las entrevistas y reuniones se realizaron entre el personal de las áreas involucradas en el proyecto: I&D, producción y profesionales especializados en simulación de procesos, quienes ayudaron en el diseño del modelo y la posterior capacitación para el manejo del mismo.

Asimismo, para la construcción del modelo se precisó la información referida a:

- Diagrama de flujo de Proceso
- Estudios de tiempos en planillas Excel
- Recorridos en planta y Layout
- Reuniones con el personal involucrado

3.2 Comprensión de las operaciones a simular

En base al punto anterior, se procedió a realizar un estudio de las secuencias de actividades, analizando los flujogramas de producción de las piezas A y B, así como las respectivas hojas de operaciones en cada máquina, además de reconocer el flujo de materiales en el layout.

También fue necesario interpretar los sistemas de decisiones que deben programarse en el simulador, como es el caso del ruteo de las piezas no conformes que son extraídas de la línea hacia un stock de piezas NOK.

Debido a que no se puede crear un modelo virtual que incorpore todas las variables complejas que influyen en el proceso de manufactura, se decide establecer ciertos supuestos en el modelo virtual para facilitar el diseño del mismo, como también su posterior utilización y mejora. Ejemplo de esto son los supuestos de las disponibilidades técnicas de cada máquina simulada con los parámetros de la Media de Tiempo de Buen Funcionamiento (MTBF) y la Media de Tiempo Técnico de Reparación (MTTR). Para ello, la empresa proporcionó datos históricos, los mismos que se procesaron mediante la herramienta Stat Fit de Simul8 en el cual asocia los datos con una distribución estadística que mejor se ajuste a los mismos. Es así entonces que, para la MTBF se

aplica una distribución de frecuencias exponencial y para la MTTR aplica una distribución Erlang con factor de forma K=2. Los valores para cada elemento/máquina se introdujeron al software Simul8 mediante una tabla de Excel, donde los tiempos a ejecutarse se establecen en segundos, como así también el tiempo de ejecución del modelo.

Luego de definir la MTBF y MTTR, automáticamente se define la disponibilidad de equipo, la cual se calcula como:

$$MTBF / (MTBF+MTTR) = \text{Disponibilidad}$$

De igual forma, para definir la disponibilidad de mano de obra y el modelado de tiempos de actividades manuales se consideran sus respectivas distribuciones de frecuencias.

3.3 Diseño de estrategia de simulación e interfaz de control del simulador

Con respecto a la estrategia de simulación, esta consiste en crear un modelo virtual que se ejecute de manera similar a la línea de producción real. Validando el funcionamiento del modelo a través de la comparación con los resultados históricos de producción de la línea. Luego se establecen los puntos de control, los mismos que conforman las ubicaciones de instalación de los sensores, que en su conjunto proveen de la información requerida para controlar el desempeño de la línea. Esto con la coordinación de las áreas de I&D y de producción.

3.4 Modelado y programación

Consiste en volcar lo planteado en anteriores puntos en el software de simulación, Simul8. Las figuras 3.a, 3.b y 3.c, muestran el lienzo de trabajo del Simul8 con los elementos que representan las máquinas, operarios, buffers o stocks intermedios y finales, las cintas transportadoras, los puntos de control de calidad, entre otros.

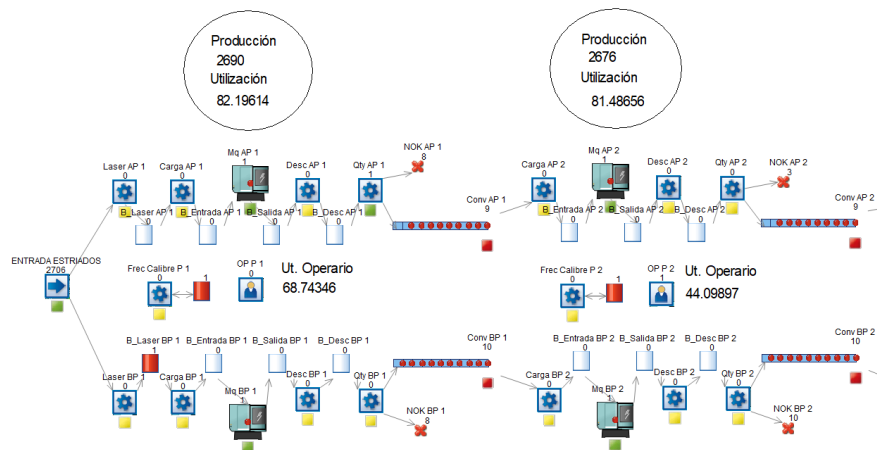


Fig. 3.a

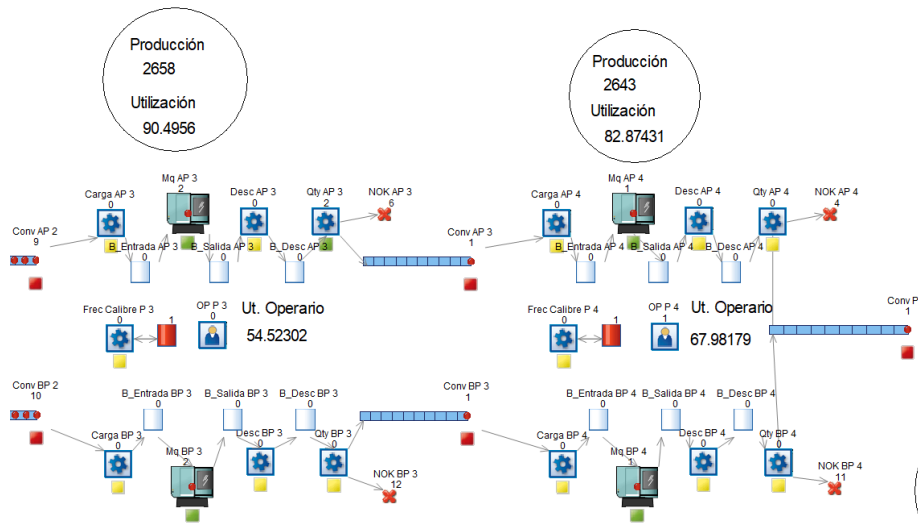


Fig. 3.b

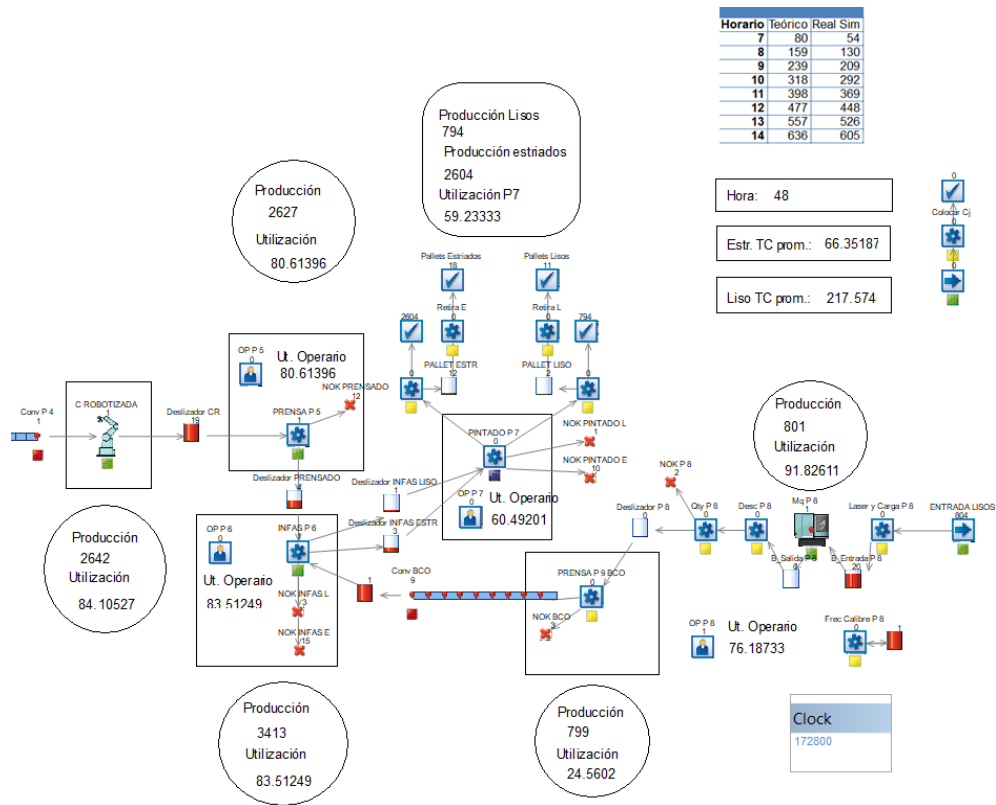


Fig. 3.c

Figura 3: a) Gráfico del puesto 1 y 2 del modelo de simulación b) Gráfico del puesto 3 y 4 del modelo c) Gráfico de la parte final de la línea de producción en el modelo. Gráficos con sus indicadores de control (Fuente: Elaboración propia)

Los distintos elementos que se introducen se programan mediante cuadros de diálogo o a través del lenguaje de programación Visual Logic, propio del Simul8 [5]. Estos se muestran en las figuras 4.a y 4.b.

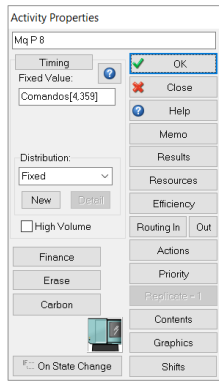


Fig. 4.a

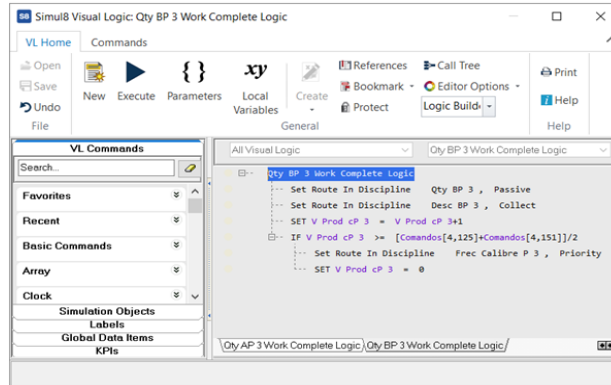


Fig. 4.b

Figura 4: a) Cuadro de diálogo para la programación del elemento Mq P8 (máquina puesto 8); b) Ventana para la programación mediante Visual Logic, (Fuente: Elaboración propia en Simul8)

De esta forma se programan las 14 operaciones de producción con sus interrelaciones para la elaboración y control de las piezas A y B.

3.5 Simulación del modelo propuesto y elaboración de informe

Finalizado el modelo, se procede a la ejecución y validación del mismo realizando la comparación de los resultados del modelo con los valores históricos de producción de la línea. Posteriormente se elabora un informe que indique los resultados obtenidos, es decir, el nivel del performance de la línea en su conjunto, el nivel de utilización de las máquinas y de la ocupación de los recursos. En base a la planificación y trabajo conjunto con el área de I&D y el área de producción de la empresa, se identificaron las posiciones donde instalar los sensores con sus respectivas características técnicas y cantidades. El informe desarrollado, contiene una serie de indicadores de producción según lo solicitado por la empresa, tales indicadores se calculan en base a los datos que se recogen del modelo. A partir del modelo de simulación, se puede conocer con exactitud donde se encuentran las configuraciones que recogen los datos necesarios para el informe. Esta información fue útil para la empresa de manera de poder determinar el proyecto de sistemas de sensores que se requiere.

3.6 Instructivo de uso del modelo de simulación

Se crea un instructivo de uso del modelo para que el área de I&D de la empresa haga uso del mismo y así se realice un monitoreo en tiempo real de la línea de producción.

3.7 Reunión final de entrega

En esta etapa se entrega el informe del modelo indicando el performance de: el conjunto de la línea, el de cada máquina y el de los operarios, como también la entrega del instructivo de uso del modelo, además de recomendaciones de uso y contacto con los profesionales que cooperaron en el desarrollo del modelo.

4 Resultados

Los resultados obtenidos corresponden al modelo virtual terminado con la instalación de los sensores y la recopilación de datos. Esto como producto de correcciones y pruebas con modelos precedentes.

Para obtener resultados representativos de la línea de producción se definieron los siguientes aspectos:

- Se determina un tiempo de calentamiento (warm up) de 4 hrs para que el proceso se estabilice y trabaje a régimen normal.
- El tiempo de simulación es de 48 hrs con la intención de determinar la performance esperada para el mismo período de tiempo

Para alcanzar un resultado de confianza del 95%, es decir, que el 95% de los resultados se encuentren en el rango de resultados arrojado por el modelo de simulación, es necesario simular el sistema 8 veces, es decir TRIAL=8. Para ello, se utilizó la herramienta “Trial Calculator” que proporciona el mismo software. En la figura 5 se puede observar algunas de las variables principales ingresadas al sistema para la evaluación de su rendimiento y el cálculo de corridas respectivo.

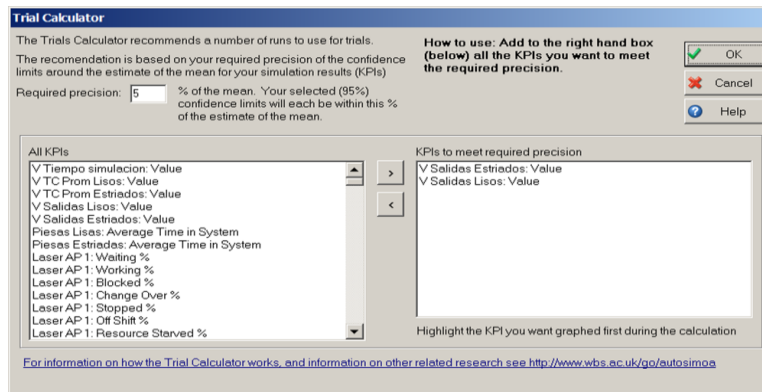


Figura 5: Ventana para el cálculo de corridas (trial) del modelo de simulación donde se enumeran varias de las variables del modelo (Fuente: Elaboración propia en Simul8)

En la tabla 1 se indican los valores de los resultados arrojados por el Simul8. La variable V Tiempo simulación indica el tiempo de simulación del modelo en segundos. Las variables V TC Prom Pieza B y Pieza A significa el tiempo ciclo o de cadencia

promedio para la pieza B y A respectivamente, medida en segundos. La V Salidas Pieza B y Pieza A representan la cantidad de Piezas B y Piezas A que salen terminadas de la línea de producción. Por último, las variables Piezas B y Piezas A indican el tiempo promedio en el sistema o línea de producción de cada pieza B o A desde su ingreso hasta su salida.

Los resultados del modelo se presentan en las siguientes tablas y figuras:

Tabla 1. Límites de variación de producción con fallas - Línea de producción de la empresa. (Fuente: Simul8).

Simulation Object	Performance Measure	-95%	Average	95%
V Tiempo simulación (Segundos)	Value	115,200.0	115,200.0	115,200.0
V TC Prom Pieza B (Segundos)	Value	207.0	218.2	229.4
V TC Prom Pieza A (Segundos)	Value	65.9	66.9	67.9
V Salidas Pieza B (Unidades)	Value	502.8	528.1	553.5
V Salidas Pieza A (Unidades)	Value	1,695.1	1,720.0	1,744.9
Piezas B (Segundos)	Average Time in System	5,483.7	6,335.9	7,188.2
Piezas A (Segundos)	Average Time in System	4,049.8	4,550.0	5,050.2

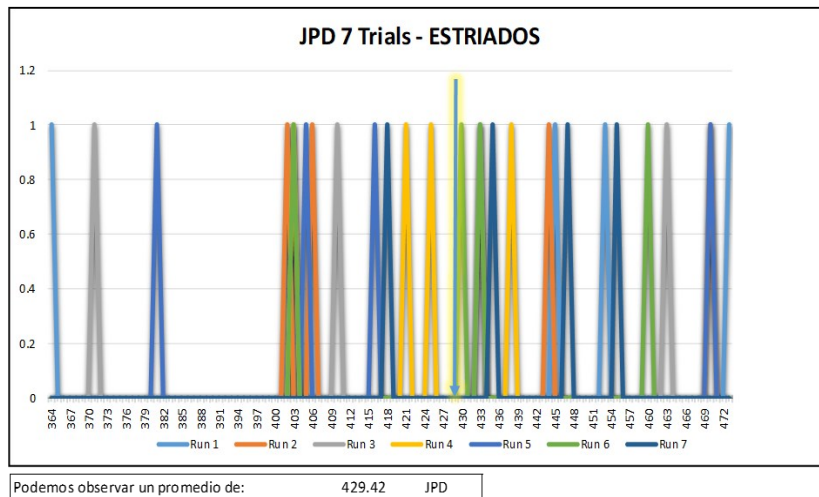


Figura 6: Distribución de frecuencia de producción por día – Pieza A. Promedio de producción: 429,42 (Jobs per day: JPD) Eje vertical: cantidad de días; Eje horizontal: cantidad de piezas A terminadas. (Fuente: Elaboración propia con datos del Simul8)

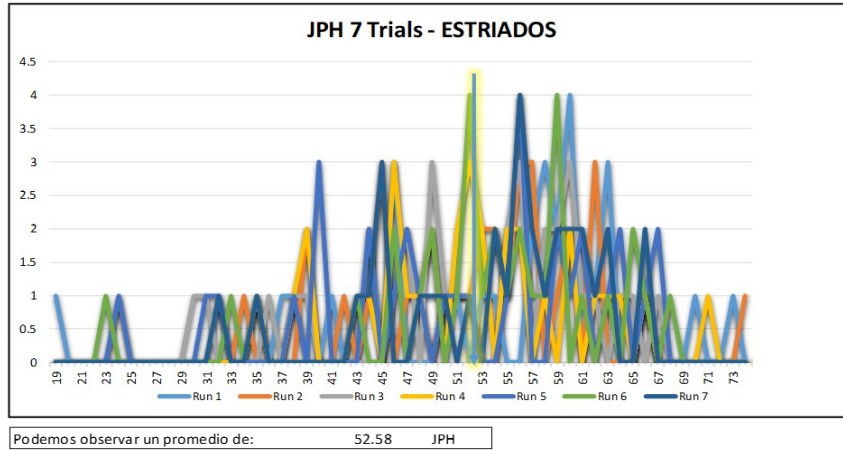


Figura 7: Distribución de frecuencia de producción por hora – Pieza A. Promedio de producción: 52,58 (Jobs per hour: JPH) Eje vertical: cantidad de horas; Eje horizontal: cantidad de piezas A terminadas. (Fuente: Elaboración propia con datos del Simul8)

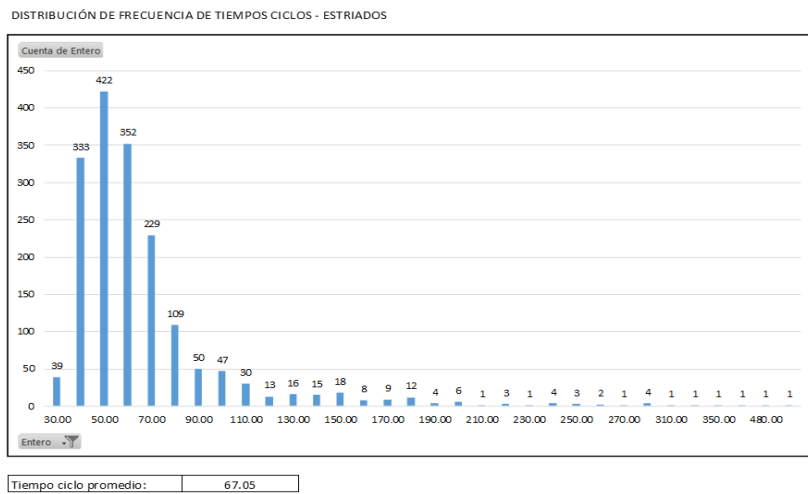


Figura 8: Distribución de frecuencia de tiempo ciclos – Pieza A. Tiempo ciclo promedio: 67,05 segundos. Eje vertical: cantidad de repeticiones; Eje horizontal: tiempo en segundos para cumplir con un tiempo ciclo de la pieza A (Fuente: Elaboración propia con datos del Simul8)

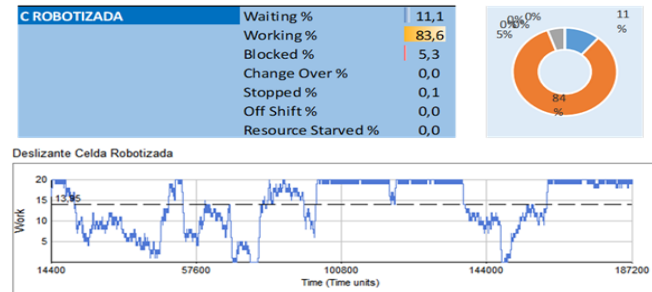


Figura 9: Gráficos del nivel de performance de la celda robotizada (Fuente: Simul8)

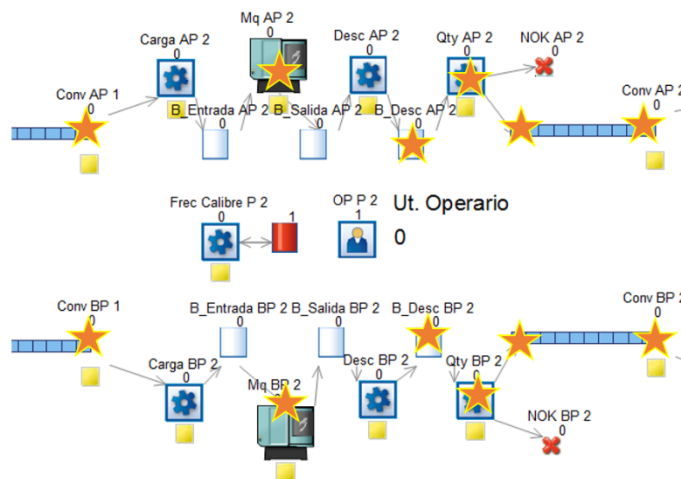


Figura 10: Gráficos de ubicación de sensores (estrellas) – Puesto 2 – Torno CNC x 2 (Fuente: Elaboración propia)

Listado de sensores – Puesto 2 – Torno CNC x 2

1. Sensor de presencia para definir inicio de carga de máquina.
2. Detector de presencia de pieza lista para cargar en CNC y retiro de la misma para iniciar la carga.
3. Registro de tiempo de trabajo de máquina.
4. Sensor de presencia de pieza para detectar inicio de retiro desde máquina.
5. Sensor de presencia de pieza para detectar fin de retiro desde máquina y para determinar inicio de tarea de control de calidad.
6. Sensor de presencia para determinar inicio y fin de control de calidad
7. Sensores para contabilizar cargas, descargas del conveyor de salida

Como se menciona en la sección 3.5, los sensores se ubican en el modelo virtual en base a las sentencias o programación donde se define la recolección de datos, para así extraer la información pertinente que indica el nivel de performance de la línea.

5 Conclusiones

Como se puede observar a lo largo del presente reporte de experiencia, el empleo de la simulación por eventos discretos fue clave para poder determinar el diseño adecuado del sistema de sensores en una línea de producción en el marco de un proyecto de transformación digital productiva. Además, es importante mencionar la capacitación o transferencia de conocimiento a la empresa acerca del uso de esta tecnología, ya que esto le permitirá contar con el conocimiento necesario para abordar futuros proyectos de transformación digital. Brindar dicho conocimiento a las pymes es necesario para reducir la brecha de transformación digital frente las grandes empresas.

Esta experiencia de éxito permite reforzar la idea de que la tecnología de la simulación de procesos por eventos discretos puede ser una importante herramienta de apoyo en el proceso de transformación digital productiva en la industria, ya que permitió diseñar un modelo virtual adecuado a los objetivos de la organización, en el que contribuyó a reducir la incertidumbre del resultado esperado de su proyecto de TDP.

Por otro lado, es notable reconocer la flexibilidad con que se puede emplear la simulación por eventos discretos, para modelar una línea de producción con un gran número de elementos e interrelación entre los mismos, además del cómputo de muchas variables, cuyo proceso arroja resultados que se validan con los resultados reales de una línea de producción.

A la luz de los resultados obtenidos en la simulación, se puede deducir que la implementación del proyecto de TDP descrito permitirá a la empresa lograr una mayor agilidad o capacidad de reacción ante los posibles desvíos de la producción en comparación con sus planes o previsiones, pudiendo impactar en consecuencia en menores costos de coordinación o reorganización al interior de la empresa.

Además, la experiencia descrita en este reporte consolida la idea de la importancia de la participación de expertos o el trabajo en equipo con distintas organizaciones.

Por último, este caso de éxito puede servir de referencia a las industrias de manera de que puedan incorporar buenas prácticas en su proceso de transformación digital.

6 Referencias

- [1] Daniel Pérez González, Pedro Solana González, Sara Trigueros Preciado: Economía del dato y transformación digital en pymes industriales: retos y oportunidades. Universidad de Cantabria (2018)
- [2] Nieponice, G; Rivera, R; Tfeli, A y Drewanz J. Acelerando el Desarrollo de la Industria 4.0 en Argentina. Boston Consulting Group. Ciudad de Buenos Aires (2018)
- [3] F. J. Alfonso Ruiz, E. Martínez Caro y J. G. Cegarra Navarro, «La transformación digital de los sistemas lean a través de la industria 4.0: un caso práctico.» *Economía Industrial N° 409*, pp. 25-35 (2018)
- [4] Shannon Robert E. Simulación de Sistemas. Diseño, desarrollo e implementación. Trillas. México (1988)
- [5] Concannon, Kieran y otros. Simulation Modeling with SIMUL8. Visual Thinking International ISBN 0-9734285-0-3. Canadá (2007)