

Aplicación integral de técnicas de excelencia operacional con simulación de eventos discretos para la mejora productiva en una industria cerámica

Heredia, Ignacio

nachoheredia5@gmail.com

Letier, Micaela

micaelaletier@gmail.com

Roark, Geraldina

groark@fio.unicen.edu.ar

Chiodi, Franco

fchiodi@fio.unicen.edu.ar

De Paula, Mariano

mariano.depaula@fio.unicen.edu.ar

Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (Argentina)

Fecha de recepción COINI 2022: 21/09/2022

Fecha de aprobación COINI 2022: 03/10/2022

Fecha de aprobación RIII: 18/01/2024

RESUMEN

Actualmente las organizaciones productivas afrontan una era de constantes desafíos vinculados con la adaptación de sus procesos al nuevo paradigma productivo de industrias inteligentes, mercados globalizados, alta competitividad y personalización de productos. Bajo este escenario, las metodologías de excelencia operacional integradas con tecnologías de gemelos digitales juegan un papel preponderante para mejorar el desempeño empresarial y generar ventajas competitivas.

El presente trabajo propone como eje central de investigación la aplicación conjunta del modelo TLS (TOC, Lean, Six Sigma) con técnicas de simulación de eventos discretos y diseños de experimentos, como base para generar una mejora en la capacidad productiva de una línea de porcelanato en una industria cerámica, ubicada en la provincia de Buenos Aires.

La metodología utilizada para su desarrollo se compone de cuatro (4) fases principales. Una primera fase de caracterización del proceso y cuantificación de recursos para el desarrollo de un modelo conceptual. Una segunda fase de desarrollo y validación del modelo computacional, utilizando FlexSim® como herramienta de simulación. Una tercera fase de diagnóstico, donde a través de la técnica VSM y la teoría de restricciones se identificó a la operación de cocción como cuello de botella del sistema. Y una última fase, de análisis, en la cual mediante un diseño de experimento unifactorial se evaluaron diferentes escenarios para potenciar la capacidad productiva de la línea implementando cambios en la estructura actual del horno.

Palabras Claves: TOC; Lean, Six sigma; Simulación de eventos discretos (DES); FlexSim®

Comprehensive application of operational excellence techniques with discrete event simulation for productive improvement in a ceramic industry

ABSTRACT

Currently, productive organizations face an era of constant challenges related to the adaptation of their processes to the new productive paradigm of intelligent industries, globalized markets, high competitiveness and product customization. Under this scenario, operational excellence methodologies integrated with digital twin technologies play a leading role in improving business performance and generating competitive advantages.

The present work proposes as a central axis of research the joint application of the TLS model (TOC, Lean, Six Sigma) with discrete event simulation techniques and experimental designs, as a basis to generate an improvement in the productive capacity of a porcelain tile line. in a ceramic industry, located in the province of Buenos Aires.

The methodology used for its development consists of four (4) main phases. A first phase of characterization of the process and quantification of resources for the development of a conceptual model. A second phase of development and validation of the computational model, using FlexSim® as a simulation tool. A third phase of diagnosis, where through the VSM technique and the theory of restrictions, the cooking operation was identified as the bottleneck of the system. And a last phase, analysis, in which, through a unifactorial experiment design, different scenarios were evaluated to enhance the productive capacity of the line by implementing changes in the current structure of the furnace.

Keywords: TOC; Lean; Six sigma; Discrete event simulation; FlexSim®.

Aplicação abrangente de técnicas de excelência operacional com simulação de eventos discretos para melhoria produtiva em uma indústria cerâmica

RESUMO

Atualmente, as organizações produtivas enfrentam uma era de desafios constantes relacionados com a adaptação dos seus processos ao novo paradigma produtivo das indústrias inteligentes, mercados globalizados, elevada competitividade e customização de produtos. Neste cenário, as metodologias de excelência operacional integradas com tecnologias de gêmeos digitais desempenham um papel de liderança na melhoria do desempenho dos negócios e na geração de vantagens competitivas.

O presente trabalho propõe como eixo central de pesquisa a aplicação conjunta do modelo TLS (TOC, Lean, Six Sigma) com técnicas de simulação de eventos discretos e projetos experimentais, como base para gerar uma melhoria na capacidade produtiva de uma linha de porcelanato . em uma indústria cerâmica, localizada na província de Buenos Aires.

A metodologia utilizada para o seu desenvolvimento consiste em quatro (4) fases principais. Uma primeira fase de caracterização do processo e quantificação de recursos para o desenvolvimento de um modelo conceptual. Uma segunda fase de desenvolvimento e validação do modelo computacional, utilizando FlexSim® como ferramenta de simulação. Uma terceira fase de diagnóstico, onde através da técnica VSM e da teoria das restrições, a operação de cozimento foi identificada como o gargalo do sistema. E uma última fase, de análise, na qual, através de um desenho experimental unifatorial, foram avaliados diferentes cenários para potencializar a capacidade produtiva da linha através da implementação de mudanças na atual estrutura do forno.

Palavras chave: TOC; Magro; Seis Sigma; Simulação de eventos discretos; FlexSim®.

1. INTRODUCCIÓN

El entorno económico y de fabricación actual se caracteriza por una creciente incertidumbre y complejidad. En este escenario existe una imperiosa necesidad de una industria reformulada, que permita un mayor nivel de digitalización e informatización para elevar su eficiencia y competitividad (Santos et al., 2022). En este sentido, la adopción de metodologías y herramientas de la administración de operaciones, junto a tecnologías vinculadas con la industria 4.0, constituyen una opción promisoriosa y sustentable para mejorar el desempeño empresarial, favoreciendo la gestión estratégica para el logro de objetivos con mayor eficiencia, productividad y competitividad (Ramírez Pérez et al., 2021)(Solís Granda et al., 2017).

Estudios actuales demuestran que los sistemas de mejora continua más efectivos en términos de reducción de costos y de mejora de calidad lo constituyen aquellos modelos que combinan la Teoría de Restricciones (TOC) con conceptos y herramientas de Lean y Six-Sigma.

En la literatura se evidencian múltiples implementaciones exitosas de los enfoques antes mencionados de manera individual, con relevantes aportes en la mejora de procesos, costos productivos, calidad, velocidad de respuesta, plazos de entrega y flexibilidad. (Dogan & Gurcan, 2018).

Por otra parte, numerosos trabajos evidencian la aplicación de técnicas híbridas de mejora de procesos combinando dos de los enfoques citados para potenciar aún más las mejoras alcanzadas de forma individual.

En este sentido, existen varios artículos, que evidencian la fusión de herramientas y principios de Lean y Six Sigma mediante la metodología "LSS", que apunta a maximizar el valor para los accionistas a través de productos y servicios de mejor calidad, costos bajos, procesos estables y predecibles. (Prakash et al., 2022)(Tampubolon & Purba, 2021). Con la metodología LSS se logra un desempeño superior en prioridades competitivas como calidad, confiabilidad y velocidad, generando un mayor rendimiento de los procesos y ventajas competitivas globales (Miluska Aylin, 2016).

Otro enfoque híbrido que se aborda en la literatura consiste en la metodología sistemática Lean – TOC, que combina eficazmente el pensamiento lean con los principios y herramientas de la Teoría de Restricciones como base para la mejora de procesos y operaciones de manufactura, transporte y logística (Garza-Reyes et al., 2019). Esta metodología permite potenciar los resultados alcanzados de forma individual debido a que los principios y técnicas de tales enfoques se complementan entre sí. Cuando esta metodologías se utilizan de manera integrada, las limitaciones de TOC son compensadas por las virtudes de Lean y viceversa (Pacheco et al., 2019).

Finalmente, se identifican en la literatura aplicaciones combinadas de TOC y Six Sigma con el fin de maximizar la eficiencia en sistemas productivos con recursos limitados o definir, medir y analizar las fallas de los procesos de producción con menos esfuerzo (Jevgeni et al., 2015).

A pesar de las relevantes potencialidades que exponen las metodologías antes citadas, existen escasos estudios que contemplen su implementación conjunta para obtener el máximo rendimiento y fortalecer el posicionamiento de empresas industriales ante los desafíos del entorno actual. (Buer et al., 2018). En este contexto, (Dias et al., 2019) propone un modelo integrado de TOC, Lean y Six-Sigma (TLS), combinando de forma sinérgica y armónica las mejoras prácticas de las tres metodologías para fortalecer sus debilidades individuales y contribuir con mejoras relevantes en el desempeño de sistemas productivos. Dicho modelo utiliza las características de TOC para identificar la restricción del sistema y enfocar allí la mejora en pos de alcanzar la optimización global del desempeño del sistema. Por su parte, las herramientas de Lean y Six-Sigma son clave para maximizar la utilización de las

restricciones y elevar sus capacidades a través de la eliminación de actividades que no agregan valor y la reducción de la variabilidad en los procesos. Investigaciones que aplican esta metodología integral en industrias manufacturadas han evidenciado resultados sumamente satisfactorios. (Sukwadi et al., 2021).

La conjunción del enfoque TLS con las tecnologías de la industria 4.0 puede aportar aún mayores beneficios a las empresas. Este nuevo paradigma productivo, facilita la optimización de los procesos, con mayor eficiencia y flexibilidad, incrementando la propuesta de valor ofrecida a los clientes (Ynzunza et al., 2017). Dentro de tales tecnologías, la Simulación de Eventos Discretos (DES) representa una relevante herramienta para desarrollar un modelo representativo de un sistema de producción, que permita el análisis de su desempeño, la detección de puntos de mejora, la predicción de comportamientos y la evaluación de alternativas de acción, de forma tal de facilitar la toma de decisiones, sin afectar la operación del sistema real. (Furian et al., 2015)

En la actualidad no existen suficientes estudios acerca de la integración de metodologías de excelencia operacional con tecnologías de I4.0, por lo que hay un gran espacio de investigación por explorar en esta temática. (Tortorella et al., 2018).

El presente trabajo pretende generar un aporte a este vacío de conocimiento a través de la aplicación conjunta de metodologías de mejora de procesos con simulación de eventos discretos y diseños de experimentos, para efectuar una mejora en la capacidad productiva de una línea de porcelanato, en una industria cerámica ubicada en la provincia de Buenos Aires.

El documento está estructurado de la siguiente manera: en la siguiente sección se describe un breve marco teórico de los principales conceptos abordados en el estudio. Seguidamente, se presenta la metodología utilizada para el desarrollo de la investigación. En tercer lugar, se detallan las características del caso de estudio. Luego se abordan las diferentes etapas para el desarrollo del modelo de simulación. Y finalmente se exponen los resultados obtenidos y las conclusiones finales del trabajo.

2. REVISION DE LA LITERATURA

En esta sección se abordarán brevemente los principales conceptos utilizados para el desarrollo de una mejora en la capacidad productiva mediante la integración de enfoques de excelencia operacional y tecnologías de la industria 4.0. Para más detalle, el lector podrá referirse a las citas indicadas oportunamente.

2.1 - Teoría de restricciones - TOC

TOC se centra en la identificación y abordaje de las restricciones del sistema, diseñando e implementando formas efectivas para mejorar su desempeño y facilitar el logro de objetivos. Tales limitaciones deberán ser el foco de las mejoras a realizar a través de los enfoques Lean y Six Sigma. La gestión de las restricciones permite reducir notablemente los inventarios y al mismo tiempo generar mejoras sistemáticas en el desempeño organizacional. Los cinco pasos que utiliza este enfoque consisten en: Identificar la restricción del sistema, explotar la restricción, subordinar el proceso a la restricción, elevar la restricción del sistema y evaluar restricción. Este ciclo es iterativo, repitiendo las etapas con la nueva restricción identificada en el sistema. (Goldratt & Cox, 2012).

2.2 - Six Sigma - SS

La metodología Six Sigma, por su parte, se enfoca en reducir la variabilidad de los procesos y sus defectos, contribuyendo a procesos más estables y predecibles a través del uso de herramientas

estadísticas. La misma se basa en el método DMAIC (Define, Measure, Analyze, Improve, Control) para aumentar la capacidad de los procesos, maximizando la calidad de sus productos y servicios, con la consecuente mejora en productividad y competitividad. (Dias et al., 2019).

2.3 - Manufactura esbelta - Lean

Durante la última década, el concepto Lean ha tomado mayor relevancia en empresas de manufactura. Sus técnicas y herramientas fueron desarrolladas para apoyar a las empresas en sus esfuerzos por mejorar los costos productivos, calidad, velocidad de respuesta, plazos de entrega y flexibilidad. Tal filosofía se focaliza en el agregado de valor al cliente y la eliminación de desperdicios mediante la aplicación del mapeo del flujo de valor (VSM) (Chen & Weng, 2009) y la resolución de problemas para alcanzar la mejora continua de los sistemas de producción. (Dogan & Gurcan, 2018).

2.4 - Modelo TLS

El método integrado TOC, Lean y Six Sigma (TLS) implica el uso conjunto de las principales herramientas, principios y conceptos de los tres enfoques, contemplando para su aplicación las 5 fases de la metodología DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar). En la fase Definir el objetivo consiste en identificar un problema o punto de mejora en el caso de estudio seleccionado. En este sentido, los enfoques Lean y TOC se utilizan para identificar desperdicios y restricciones del sistema en estudio como base para definir las áreas sobre las cuales se deben focalizar las mejoras y el objetivo del proyecto de mejora. En la fase Medir, se realiza un diagnóstico del estado actual del proceso respecto a la característica que se pretenden mejorar para identificar la línea base del proyecto. En la fase Analizar se identifica las causas raíz del problema definido mediante un análisis minucioso del sistema en estudio. En la Fase Mejora se desarrollan alternativas de acción para aportar a la problemática definida. Finalmente, en la Fase de Control se verifica si los resultados obtenidos son los esperados en el proyecto de mejora. Este procedimiento es un ciclo iterativo, ya que cada vez que se resuelve un problema se vuelve a aplicar el ciclo con la identificación de un nuevo punto de mejora, aportando a la mejora continua de las operaciones en sistemas productivos. (Sukwadi et al., 2021). Tales etapas serán aplicadas en la presente investigación mediante el uso de copias virtuales para el diagnóstico y la evaluación de alternativas de mejora, en el caso de estudio seleccionado.

2.5 - Simulación de eventos discretos - DES

La simulación de eventos discretos (DES) es una herramienta de análisis indispensable para evaluar el impacto de cambios en un sistema productivo sin que sea necesario modificar el sistema real. Corresponde a una herramienta de análisis ampliamente difundida en el ambiente empresarial, con gran utilidad para dar soporte a la toma de decisiones relacionadas con la planeación de la producción e inventarios, así como con el diseño de los sistemas de producción y sus cadenas de suministro. (Cai & Jia, 2019).

Este tipo de modelado se utiliza para estudiar los sistemas y procesos cuyos estados van cambiando con el tiempo de forma discreta. La aplicación de esta herramienta permite representar situaciones complejas de la realidad bajo análisis, permitiendo extraer información y datos relevantes para facilitar la toma de decisiones.

3. METODOLOGIA

Para el desarrollo de réplicas virtuales mediante modelos de simulación de eventos discretos se utilizará el método propuesto por (Barra Montevechi et al., 2010), el cual consta de tres fases principales: conceptualización, implementación y análisis de resultados, tal como puede observarse en la Figura 1.

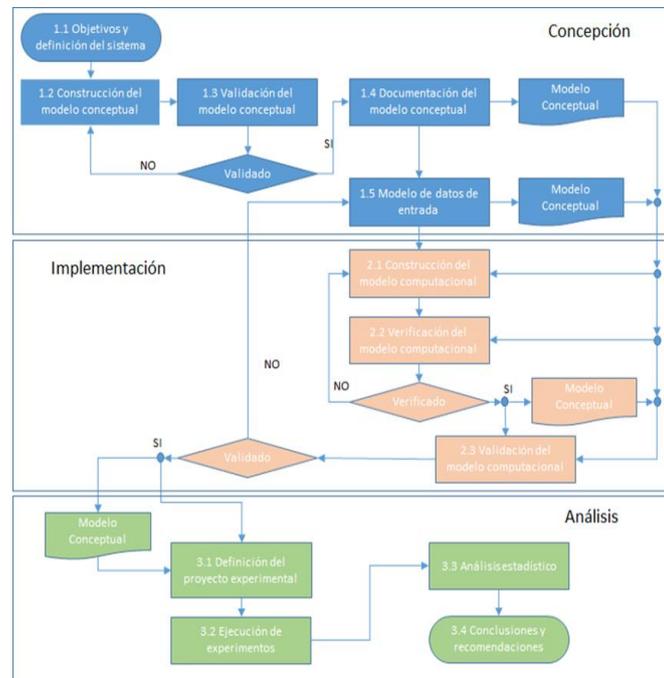


Figura 1. Método de conducción de una investigación de simulación. Fuente: (Barra Montevechi et al., 2010).

Dentro de la fase “Conceptualización” se establece el alcance del problema, el objetivo del modelo y las restricciones del sistema en estudio. Dicha etapa incluye la construcción de 2 modelos principales: el modelo conceptual y el modelo de datos. El primero de ellos requiere del uso de técnicas de mapeo de procesos y el segundo se basa en la aplicación de técnicas estadísticas para su elaboración. Ambos modelos deben ser validados para comprobar que sus premisas sean consistentes con el sistema real, previo a su utilización para el desarrollo del modelo computacional.

En la fase “Implementación” se realiza la construcción del modelo computacional, considerando las variables de decisión, parámetros y restricciones del sistema en estudio. Para su ejecución es necesario la selección de un software de simulación específico. Su validación se efectúa a través de pruebas estadísticas que permitan cotejar su semejanza con la realidad.

Finalmente, la fase denominada “Análisis” consiste en la aplicación de un diseño experimental, donde se implementan un conjunto de alternativas de acción a simular, derivadas de la metodología TLS propuesta, y se analiza el impacto de sus resultados como base para la toma de decisiones.

4. CASO DE ESTUDIO

4.1 – Breve descripción de la organización

El estudio se realizó en una empresa cerámica multinacional ubicada en la Provincia de Buenos Aires, líder en el sector de la construcción dedicada a la extracción, elaboración y comercialización de las riquezas del suelo, principalmente ladrillos y revestimientos porcelánicos y cerámicos. La mayor parte de sus inversiones se focaliza en la línea de producción de porcelanato, la cual fabrica los productos con mayor rentabilidad y mayor posicionamiento en el mercado. Los principales productos de esta línea corresponden a porcelanatos naturales y pulidos de diversos formatos, con una capacidad de

aproximadamente 180.000 m² mensuales. Dentro de tales formatos los porcelanatos naturales de 60 x 120 representan el producto estrella en el volumen total de ventas y en la rentabilidad de la empresa, por lo que el estudio se focaliza en las características técnicas y procedimentales de dicho formato.

En el presente, la empresa en estudio no alcanza a abastecer la demanda del mercado respecto a los productos de esta línea por restricciones de capacidad. Ante este escenario el trabajo de investigación se enfoca en aplicar técnicas de simulación y de mejora de proceso para aportar alternativas de acción que impacten en una mejora de su capacidad para facilitar la captación del mercado no satisfecho.

5. DEFINICIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN

5.1 - Etapa de concepción del modelo

5.1.1 - Objetivos y definición del alcance del modelo

En la Figura 2 se puede observar el diagrama de flujo completo de la línea de porcelanato.

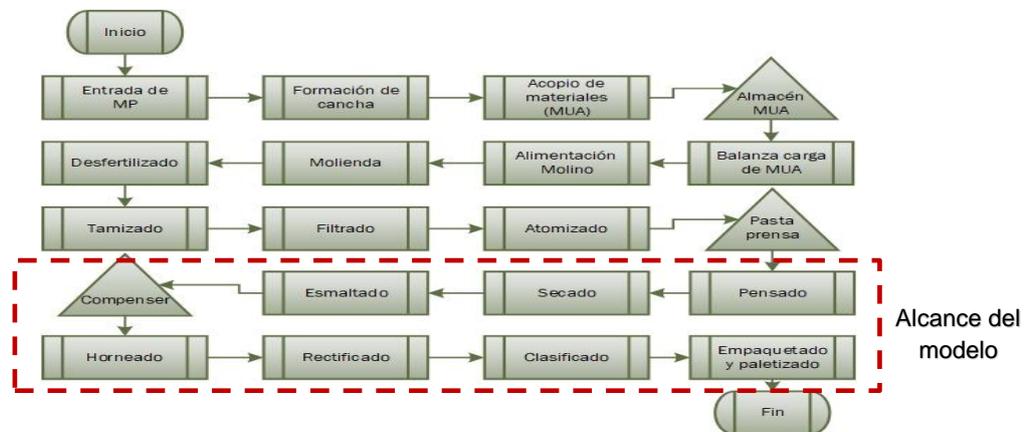


Figura 2. Diagrama de Flujo del proceso abordado e identificación del alcance del modelo.

El proceso comienza con la entrada de materias primas que se utilizan en la “formación de las canchas” para la obtención de una mezcla homogénea, denominada MUA. La MUA es almacenada a cielo abierto para su carga posterior en la balanza de alimentación de la etapa de molienda. En el proceso de molienda, se le adiciona agua y desfloculante para generar una pasta líquida. Dicha pasta, pasa por un proceso de desfertilización para efectuar la separación del material del hierro de su composición. Las siguientes etapas consisten en el proceso de tamizado, filtrado y atomizado que apuntan a reducir el porcentaje de agua de la pasta procesada hasta llegar al porcentaje deseado para su operabilidad en las siguientes etapas productivas. De esta forma culmina la etapa de molienda para pasar a la etapa de producción de placas de porcelanato. Esta etapa inicia con el proceso de prensado, donde con prensas hidráulicas y moldes, se le da forma al polvo atomizado conformando placas de tamaño estándar. Las piezas obtenidas se someten a una etapa de secado para reducir el contenido de humedad hasta un 0,2 a 0,5 %, de forma tal de permitir un adecuado desarrollo de las fases de esmaltado y cocción. En la etapa de esmaltado se realiza la impresión del patrón de diseño sobre las placas y la colocación de un esmalte para el sellado superficial y acabado final al producto. Partes de las placas resultantes de esta etapa son almacenadas en un compenser que actúa como pulmón para mantener el flujo continuo en las etapas posteriores. En la etapa de cocción, la placa es llevada hasta los 1200 °C provocando cambios en su microestructura que le confieren las propiedades deseadas. Finalizado este proceso se rectifican los bordes de las placas y las unidades se dirigen hacia el proceso de clasificación donde se descartan las placas no conformes y se agrupan las conformes según la calidad designada. El proceso de empaquetado conforma las cajas de productos terminados y agrupa las mismas de a 6 unidades mediante precintos para su posterior paletizado, donde culmina el proceso.

El alcance del modelo contempla todas las operaciones desde prensado a paletizado por ser la parte de la línea más crítica en cuando a capacidad productiva. Por su parte el objetivo del modelo consiste evaluar alternativas de acción que posibiliten el aumento de la capacidad de la línea, incrementando la capacidad de sus restricciones.

5.1.2 Construcción del modelo conceptual

A partir de los datos recopilados en el proceso de porcelanato bajo análisis, se diseña el modelo conceptual siguiendo los lineamientos propuestos por la metodología IDEF-SIM (Leal et al., 2008). Los elementos principales de esta metodología se resumen en la siguiente figura:

Elemento IDEF-SIM	Símbolo	Elemento IDEF-SIM	Símbolo	Elemento IDEF-SIM	Símbolo	
Entidad	○	Reglas	Regla "Y"	⊗	Información explicativa	----->
Función	□		Regla "O"	⊗	Flujo de entrada en el sistema modelado	--->
Flujo de entidad	→		Regla "Y/O"	⊗	Fin del sistema	●
Recursos	↑	Movimiento	⇨	Conexión a otra figura	△	
Controles	↓					

Figura 3. Elementos y símbolos utilizados en la metodología IDEF-SIM. Fuente: (Leal et al., 2008).

El modelo desarrollado se presenta en la Figura 4. Su validación se realizó mediante la modalidad "face-to-face", la cual consiste en una revisión exhaustiva de cada etapa del modelo para corroborar su correspondencia con el sistema real a analizar. En dicha revisión se involucró al gerente de la planta, a los responsables de los sectores de producción y mantenimiento, y al equipo de investigación encargado del desarrollo del modelo.

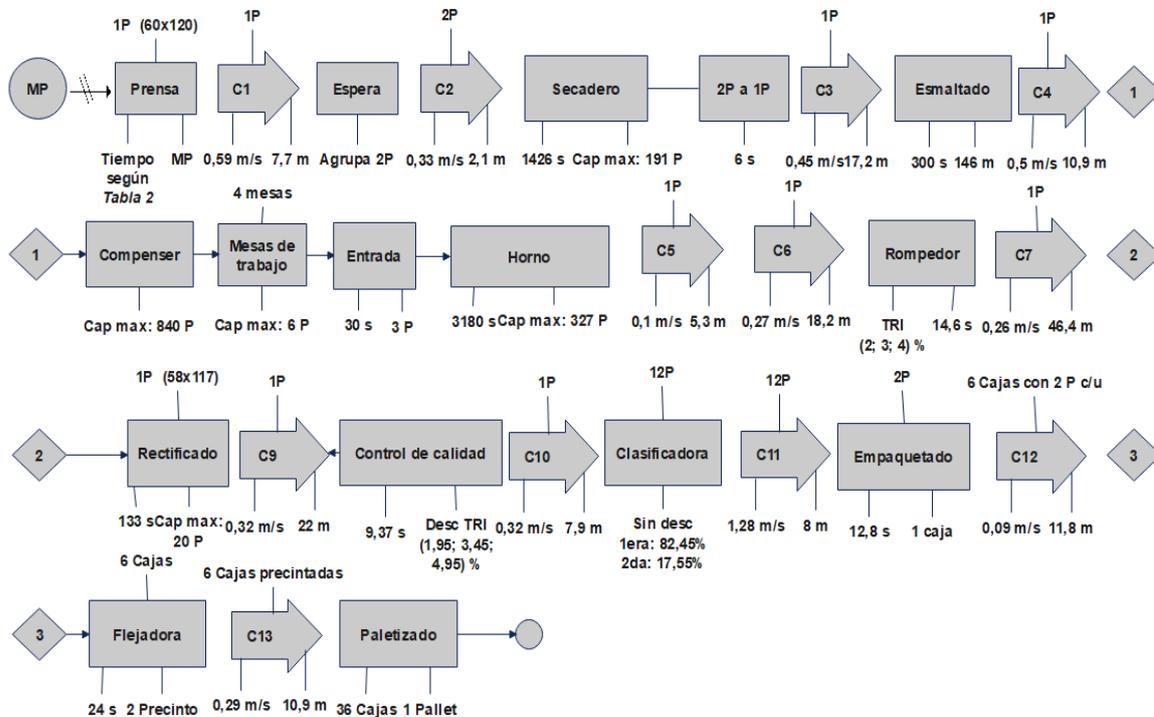


Figura 4. Diagrama IDEF-SIM del proceso abordado.

5.1.3 - Construcción del modelo de datos

A partir de los datos relevados y otorgados por la empresa, se obtuvieron los datos necesarios para llevar a cabo el modelo computacional. En la siguiente tabla se observan los parámetros que se ingresaron al modelo en base a la información obtenida de la línea en análisis.

Tabla 1. Parámetros principales de entrada al software de simulación FlexSim®.

Equipo	Tipo de entidad en FlexSim®	Tiempo de proceso	Unidades	Capacidad máxima [placas]	Combinación	Observación
Prensa	Procesador	Ver Tabla 2	Segundos/placa	1	-	Cambia el tiempo de procesamiento en función del contenido en compenser.
Secadero	Procesador	23,8	Minutos/ciclo	191		Ingreso y salida de a dos placas.
Línea de esmaltado	Procesador	5	Minutos/placa	60		Cinta de transporte con equipos de aplicación superior.
Compenser	Queue	-	-	840		Conformado por 2 box.
Horno	Procesador	53	Minutos/ciclo	327		Ingreso y salida de a tres placas.
Rectificadora	Procesador	133	Segundos/placa	22		-
Clasificadora	Robot	4,41	segundos/ movimiento	1		Agrupar en queue de a 12 placas.
Empaquetadora	Combinador	12,8	segundos/ caja	-	2 placas 1 caja	-
Flejadora	Combinador	24	segundos/6 cajas		6 cajas	-
					2 precintos	
Paletizadora	Grúa	Por defecto		12	-	Deposita 36 cajas en euro-pallets. Velocidades establecidas por defecto en FlexSim®.

Tabla 2. Velocidad de prensado/placa en función del contenido de placas en Compenser.

Compenser > 660 placas	200 placas < Compenser < 660 placas	Compenser < 200 placas
Velocidad prensa baja	Velocidad prensa media	Velocidad prensa alta
10,9091 s	8,8235 s	8,3333 s

Para modelar el comportamiento de las fallas se determinó la distribución del MTTF (tiempo medio hasta el fallo) y del MTBF (tiempo medio entre fallas), mediante el uso de la extensión ExperFit, perteneciente a FlexSim®. Tales tiempos se estimaron para las siguientes etapas de proceso: prensa, esmaltado, horno, rectificado y clasificación. La selección de la distribución de probabilidad para representar el comportamiento estocástico de tales variables se realizó en función de la bondad de ajuste de las mismas a los datos disponibles. Los resultados se resumen en Tabla 3 y Tabla 4.

Tabla 3. Distribuciones correspondidas a MTTF. ExperFit.

MEAN TIME TO FAILURE					
Equipo	Distribución	Location	Scale	Shape #1	Shape #2
Prensa	Lognormal (E)	299,597	456,122	1,257	-
Esmaltado	Log-Logistic	0	574,824	2,933	-
Horno	Log-Logistic	0	1238,890	2,065	-
Rectificadora	Pearson Type VI	0	1942,862	6,741	2,983
Clasificadora	Log-Logistic (E)	261,672	701,961	2,098	-

Tabla 4. Distribuciones correspondidas a MTBF. ExperFit.

MEAN TIME BETWEEN FAILURES							
Equipo	Distribución	Location	Lower endpoint	Upper endpoint	Scale	Shape #1	Shape #2
Prensa	Beta	-	1897,935	84987,349	-	1,490	3,113
Esmaltado	Weibull (E)	849,802	-	-	32294,659	1,533	-
Horno	Beta	-	2546,347	4136100	-	0,664	3,993
Rectificadora	Lognormal	0	-	-	106811,28	1,239	-
Clasificadora	Johnson SB	-	6,903	417428,687	-	2,002	0,889

Las paradas programadas de la línea por mantenimiento se establecieron de forma determinística en 4 horas por semana. Por su parte, la proporción de descartes a la salida de las etapas de esmaltado y cocción, se representaron de forma estocástica mediante las distribuciones presentadas en la Tabla 5. Finalmente, los porcentajes de clasificación de productos en primera y segunda calidad se definieron de forma determinística en función a los datos históricos proporcionados por la empresa, mientras que la clasificación como calidad inapropiada se representó mediante una distribución triangular. Tal clasificación contempla las características de alabeo, defectos superficiales y calibre, los datos considerados para el modelo computacional se exponen en la Tabla 6.

Tabla 5. Parámetros de descartes/scrap.

Descarte	Distribución	Mínimo	Máximo	Media
Salida de esmaltado	Triangular	3%	7%	5%
Salida de horno	Triangular	2%	4%	3%

Tabla 6. Parámetros de clasificación.

Clasificadora	Distribución	Mínimo	Máximo	Media
Calidad inapropiada	Triangular	1,95%	4,95%	3,45%
1 ^{era} Calidad	Determinístico			79,60%
2 ^{da} Calidad	Determinístico			16,95%

5.2 - IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

5.2.1 - Construcción del modelo computacional

El modelo conceptual y el modelo de datos desarrollados en los apartados 5.12 y 5.13 constituyen la base para la construcción del Modelo Computacional, para el cual se utilizó el software FlexSim® versión 22.1.2. En la Figura 5 se observan vistas del modelo desarrollado para obtener un diagnóstico de la capacidad actual de la línea de porcelanato, en m2 mensuales, y determinar el cuello de botella del sistema como paso crucial para establecer las prioridades de mejora. En dicho modelo se contemplaron los recursos pertinentes para representar las actividades que se realizan en cada etapa del proceso, programando cada uno de ellos en función a los tiempos de operación y las cantidades procesadas, según lo establecido en el modelo de datos.



Figura 5. Modelo computacional en FlexSim® versión 22.1.2

5.2.2 - Verificación y validación del modelo computacional

Desarrollado el modelo computacional, se procedió a su verificación examinando de forma minuciosa que el mismo cumpla con los requisitos de diseño para cuales se elaboró y no evidencie errores derivados de la traducción del modelo conceptual y de datos al modelo computacional. Luego de la etapa de verificación se procedió a la validación estadística del modelo para asegurar con un 95 % de confianza su concordancia con el sistema real. Para ello se aplicó una prueba de hipótesis de diferencia de medias respecto a la producción mensual en m2 obtenida con el modelo y la producción real del sistema en estudio, considerando una muestra de 25 observaciones para cada caso. Las hipótesis planteadas y el resultado de la prueba de hipótesis se observan en la Figura 6. El p-valor obtenido de 0,0678, permite afirmar que no existe evidencia significativa para rechazar la hipótesis nula, permitiendo demostrar la validez del modelo en cuestión.

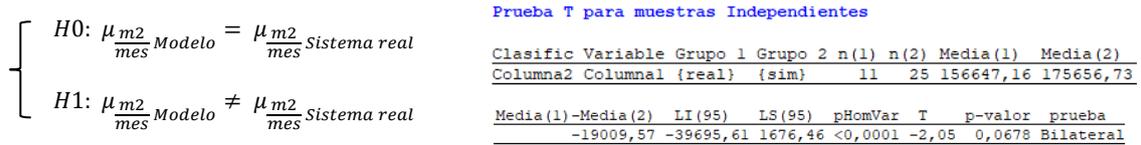
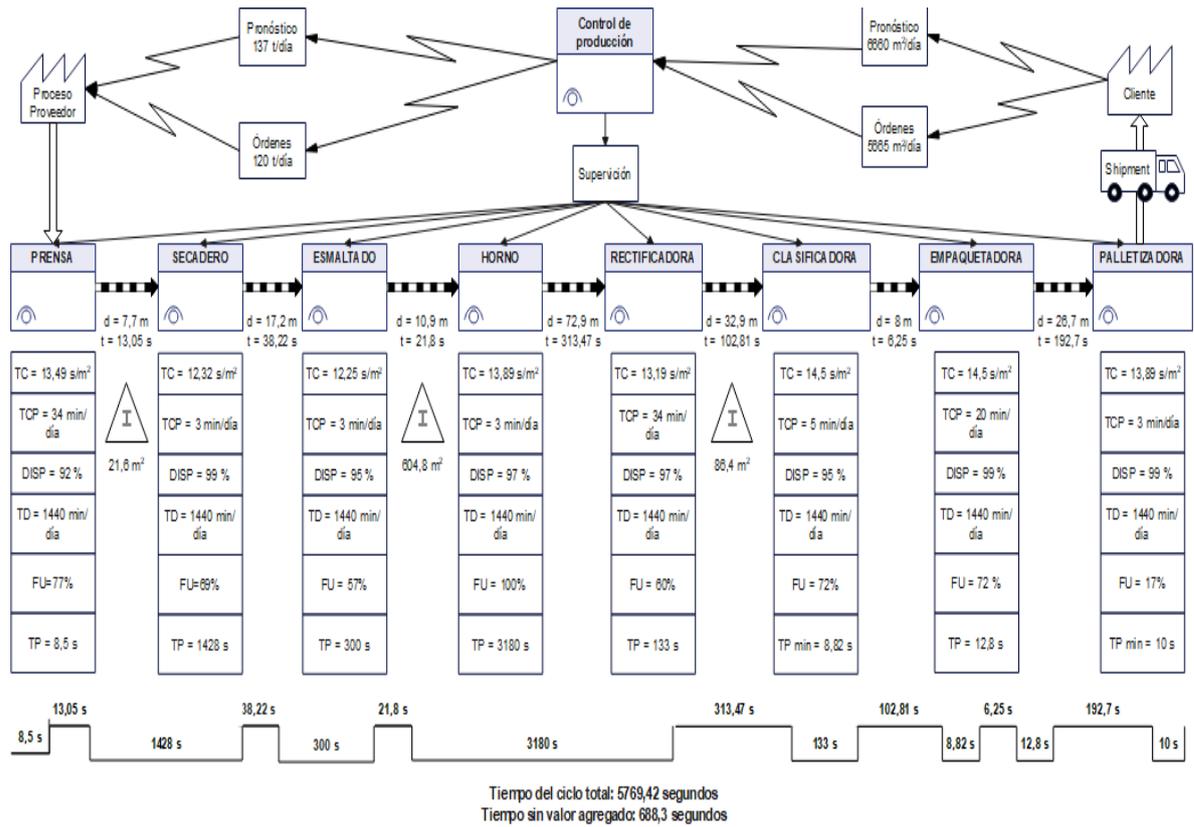


Figura 6. Prueba de Hipótesis y resultado del test estadístico.

5.3 - DIAGNOSTICO EN BASE A TOC Y VSM

Una vez validado el modelo computacional se ejecutó la simulación para obtener un diagnóstico de la capacidad actual y detectar las restricciones del sistema en estudio. Los resultados arrojaron una capacidad mensual promedio de 175 600 m², identificando a la operación de Cocción como cuello de botella de la línea. Dicho análisis se complementó mediante la herramienta VSM correspondiente al enfoque Lean (Figura 7), a través de la cual se evidenció que las operaciones de clasificación y empaquetado exponen el mayor tiempo de ciclo, con 14.5 s/m², con un factor de utilización del 72%. Asimismo, las siguientes operaciones con mayor tiempo de ciclo, corresponden a las etapas de cocción y paletizado, con un factor de utilización del 100 y 17 por ciento respectivamente. Tal situación permite identificar al horno como principal recurso restrictivo de la capacidad de la línea en análisis. Para comparar la carga de trabajo impuesta por el cliente con la capacidad de la empresa, es relevante evaluar la relación entre el tiempo de ciclo del cuello de botella y el Takt time calculado a través del cociente entre el tiempo disponible de producción (86400 seg/día) y el pronóstico de ventas en el mismo periodo (6660 m²/día). El valor obtenido es de 12,97 s/m², un 6.6% menor respecto al tiempo de ciclo de la etapa cuello de botella, lo que genera como consecuencia la existencia de un mercado insatisfecho.

Mediante el VSM se estimó, además, el lead time correspondiente al conjunto de operaciones desde la etapa de prensado hasta paletizado, dando un total de 96,16 minutos, del cual solo un 88% corresponde a tiempos que agregan valor. Se identificó además como principal desperdicio del sistema en estudio al inventario de producto en proceso ubicado antes de la operación cuello de botella, el cual acumula hasta un máximo de 604,8 m², para asegurar el flujo ante paradas no programadas de operaciones anteriores a la etapa restrictiva. Ante este escenario se aplica la primera etapa de la metodología DMAIC, la Fase “Definir”, donde se establece con precisión el objetivo del proyecto de mejora y su alcance. El mismo consiste en aumentar la capacidad de la etapa de cocción en un 14,8 %, dentro de los próximos 2 años, para cubrir el gap negativo existente entre la demanda actual y los niveles de producción de la empresa, reduciendo al mismo tiempo los desperdicios generados por los altos niveles de inventario de producto en proceso presentes en la etapa previa a su alimentación.



TC: Tiempo de ciclo, TCP: Tiempo de cambio entre productos, D: Disponibilidad, TD: Tiempo disponible, Fu: Factor de utilización, TP: Tiempo de procesamiento.

Figura 7. Value Stream Mapping (VSM).

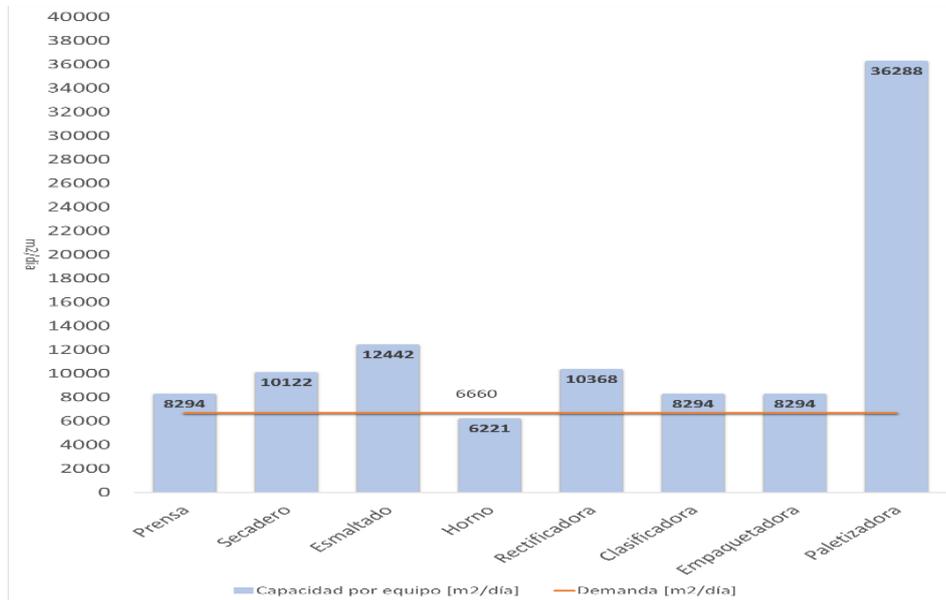


Figura 8. Diagrama de capacidades máximas por equipo versus demanda en m² por día.

En la Fase “Medir”, se comparan las capacidades máximas de las principales operaciones de la línea con la demanda proyectada, lo cual se expone en la figura 8, con el fin alcanzar un mayor entendimiento del estado actual del problema. De dicha gráfica se refuerza la confirmación de que la operación de cocción es la principal limitante de capacidad en la línea porcelanato, impidiendo satisfacer la demanda actual del mercado, seguido por las operaciones de Prensado, empaquetado y clasificado, siendo la más crítica la etapa de prensado por su limitante para operar a la máxima capacidad durante un tiempo prolongado.

Tales operaciones constituyen las siguientes restricciones ante un eventual aumento en el nivel de ventas. El presente proyecto de mejora se enfoca en generar un aporte a esta problemática.

5.4 – DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE MEJORA

A partir de la simulación realizada de la línea se procedió a evaluar escenarios para potenciar el cuello de botella del sistema de forma tal de aumentar la capacidad de producción y el beneficio empresarial. Para tal fin se aplicó la Fase “Análisis” de la metodología DMAIC como base para identificar los factores críticos del problema definido. De dicho análisis se evidenció que la restricción de capacidad del horno se relaciona con las dimensiones de su estructura. Ante este escenario, en la Fase de “Mejora” se estableció como alternativa de solución el aumento de la capacidad del horno a través de la adición de módulos en su estructura.

La capacidad del horno expone una relación lineal con la tasa de entrada de placas al mismo, por lo que a medida que se aumenta su capacidad con del agregado de módulos, también de aumenta de forma simultánea la tasa de ingreso de placas al mismo. En este sentido, se efectúa un análisis en base al incremento de 2 a 20 módulos para detectar a partir de que cantidad la adición de estos, ya no genera una diferencia significativa en los niveles de capacidad del sistema en estudio. El efecto de cada alternativa se comprobó mediante la aplicación de un diseño de experimentos de tipo unifactorial, con 25 réplicas para los distintos escenarios, a partir de la simulación de 31 días del proceso productivo. Los resultados obtenidos se exponen en la Figura 9.

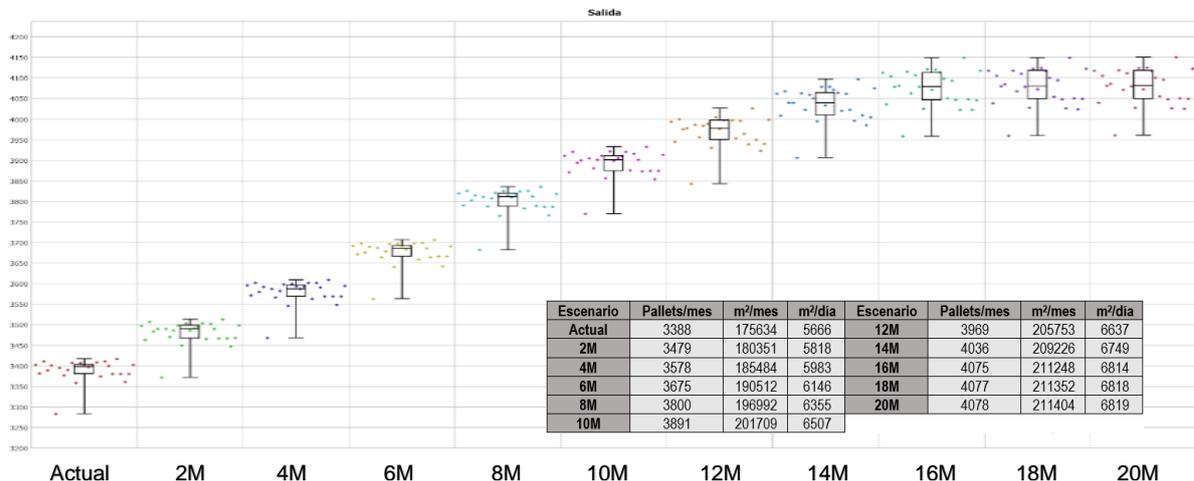


Figura 9. Box Plot de resultados obtenidos respecto a m2 producidos por mes para cada escenario analizado.

Para complementar los resultados de la figura anterior, en la Figura 10 se detallan las diferencias de medias en pallets mensuales para cada escenario respecto de la situación actual, con un nivel de confianza del 99%. De tales resultados se observa que la mayor diferencia significativa, en cuanto a capacidad adicional que genera el agregado de módulos en la etapa de cocción, se da en el escenario de 14 módulos, donde se logra una mejora de hasta aproximadamente 650 pallets mensuales. A partir de allí, la capacidad adicional alcanzada por un mayor número de módulos ya no expone una diferencia tan significativa, por lo que posiblemente no se justifique la inversión en módulos adicionales.

Salida		
i = Actual		
j	$\mu_i - \mu_j$ (99% Confidence Interval)	Statistically Significant
Actual	-	-
2 modulos extras	-91.320 ± 2.339	Yes
4 modulos extras	-190.400 ± 1.107	Yes
6 modulos extras	-287.240 ± 1.633	Yes
8 modulos extras	-412.160 ± 2.582	Yes
10 modulos extras	-502.880 ± 4.591	Yes
12 modulos extras	-581.000 ± 8.076	Yes
14 modulos extras	-647.760 ± 11.298	Yes
16 modulos extras	-686.720 ± 14.165	Yes
18 modulos extras	-689.040 ± 14.345	Yes
20 modulos extras	-689.800 ± 14.427	Yes

Figura 10. Diferencia de medias entre escenarios y situación actual.

Considerando la restricción física de la planta se decidió incorporar solo 10 módulos al horno, con una longitud adicional en su estructura de aproximadamente 20 m. Tal modificación permite adicionar un 14,8 % a la capacidad actual de la línea, lo cual representa una capacidad de 6507 m²/día, reduciendo el mercado insatisfecho de 15% a tan sólo un 2.5%. Mediante el modelo de simulación se pudo corroborar, además, que a partir de la adición de 12 módulos la operación de prensado no logra abastecer la demanda del horno convirtiéndose en el siguiente cuello de botella del sistema, tal como se había identificado en la Figura 8. Asimismo, al aumentar la tasa de entrada de placas en la operación de cocción, se reduce notablemente el inventario previo a esta operación como consecuencia de una diferencia menor con las tasas de producción de las operaciones ubicadas aguas arriba, reduciendo los desperdicios que genera esta situación para la empresa.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente trabajo se llevó a cabo en una planta cerámica, ubicada en la provincia de Buenos Aires, en la cual se implementaron de forma conjunta tres enfoques de mejora de procesos (TOC, Lean y Six Sigma) junto a tecnologías de simulación de eventos discretos para generar una mejora en la capacidad productiva de la línea de porcelanato. Mediante la aplicación de la técnica VSM y los principios de la teoría de restricciones se procedió a identificar la operación cuello de botella del sistema, la cual consistió en la etapa de cocción, evidenciando la combinación más desfavorable de tiempo de ciclo y factor de utilización, con un ritmo de producción inferior al ritmo de la demanda actual de la empresa. Tal situación genera una demanda insatisfecha de aproximadamente un 15%, lo cual conforma la base para desarrollar un proyecto de mejora considerando el método DMAIC, correspondiente al enfoque SS. El objetivo del proyecto consistió en incrementar la capacidad de la etapa de cocción para responder a la demanda actual de la empresa. Para delinear una propuesta de mejora, en la fase Analizar, se identificaron los factores críticos que impactan en la limitación de capacidad del horno. De dicho análisis se determinó que la estructura actual del mismo conforma el factor crítico de su capacidad productiva. Por tal motivo en la Fase de mejora se plantearon diferentes alternativas de adición de módulos a su estructura, las cuales fueron corroboradas a través de experimentos unifactoriales aplicados sobre la copia virtual del sistema en estudio. De dicho análisis se llegó a la conclusión de que la adición de 10 módulos permitiría un incremento en la producción de 500 pallets extras por mes respectivamente, considerando las restricciones del espacio físico disponible y las tasas de producción de las demás operaciones de la línea, reduciendo la actual demanda insatisfecha de un 15% a tan sólo un 2.5%. De esta forma se presenta una aplicación concreta del modelo TLS, integrado con tecnologías de simulación de eventos discretos, donde se evidencia su relevante aporte en la identificación de los puntos de mejora y en el análisis y selección de alternativas de solución, con resultados positivos para la empresa y sin poner en riesgo al sistema real.

7. REFERENCIAS

- Ahmed, S. (2019). Integrating DMAIC approach of Lean Six Sigma and theory of constraints toward quality improvement in healthcare. *Reviews on Environmental Health*. <https://doi.org/10.1515/reveh-2019-0003>
- Barra Montevechi, J. A., Leal, F., De Pinho, A. F., Da Silva Costa, R. F., Moura De Oliveira, M. L., & Faustino Da Silva, A. L. (2010). Conceptual modeling in simulation projects by mean adapted IDEF: An application in a Brazilian tech company. *Proceedings - Winter Simulation Conference*. <https://doi.org/10.1109/WSC.2010.5678908>
- Buer, S. V., Strandhagen, J. O., & Chan, F. T. S. (2018). The link between industry 4.0 and lean manufacturing: Mapping current research and establishing a research agenda. *International Journal of Production Research*, 56(8). <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1442945>
- Cai, H., & Jia, J. (2019). Using Discrete Event Simulation (DES) To Support Performance-Driven Healthcare Design. *Health Environments Research and Design Journal*, 12(3). <https://doi.org/10.1177/1937586718801910>

- Chauhan, G., & Singh, T. P. (2012). Measuring parameters of lean manufacturing realization. *Measuring Business Excellence*, 16(3). <https://doi.org/10.1108/13683041211257411>
- Chen, Y. L., & Weng, C. H. (2009). Mining fuzzy association rules from questionnaire data. *Knowledge-Based Systems*. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2008.06.003>
- Cortes, H., Daaboul, J., Le Duigou, J., & Eynard, B. (2016). Strategic Lean Management: Integration of operational Performance Indicators for strategic Lean management. *IFAC-PapersOnLine*, 49(12). <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.551>
- Dias, R. M. F., Silva, L. D., & Tenera, A. (2019). Application of a proposed TLS model in a Lean Productive System. *Independent Journal of Management & Production*, 10(1). <https://doi.org/10.14807/ijmp.v10i1.830>
- Dogan, O., & Gurcan, O. F. (2018). Data perspective of lean six sigma in industry 4.0 era: A guide to improve quality. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, 2018(JUL).
- Drohomeretski, E., Gouvea Da Costa, S. E., Pinheiro De Lima, E., & Garbuio, P. A. D. R. (2014). Lean, six sigma and lean six sigma: An analysis based on operations strategy. *International Journal of Production Research*, 52(3). <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.842015>
- Ehie, I., & Sheu, C. (2005). Integrating six sigma and theory of constraints for continuous improvement: A case study. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 16(5). <https://doi.org/10.1108/17410380510600518>
- Furian, N., O'Sullivan, M., Walker, C., Vössner, S., & Neubacher, D. (2015). A conceptual modeling framework for discrete event simulation using hierarchical control structures. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 56. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2015.04.004>
- Garza-Reyes, J. A., Villarreal, B., Kumar, V., & Diaz-Ramirez, J. (2019). A lean-TOC approach for improving Emergency Medical Services (EMS) transport and logistics operations. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 22(3). <https://doi.org/10.1080/13675567.2018.1513997>
- Goldratt, E. M., & Cox, J. (2012). *The Goal: A Process of Ongoing Improvement* (North River PR Inc (ed.); Revised).
- Jevgeni, S., Eduard, S., & Roman, Z. (2015). Framework for continuous improvement of production processes and product throughput. *Procedia Engineering*, 100(January). <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.398>
- Kang, H. S., Lee, J. Y., Choi, S., Kim, H., Park, J. H., Son, J. Y., Kim, B. H., & Noh, S. Do. (2016). Smart manufacturing: Past research, present findings, and future directions. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology*, 3(1). <https://doi.org/10.1007/s40684-016-0015-5>
- Laureani, A., & Antony, J. (2019). Leadership and Lean Six Sigma: a systematic literature review. In *Total Quality Management and Business Excellence* (Vol. 30, Issues 1-2). <https://doi.org/10.1080/14783363.2017.1288565>
- Leal, F., Almeida, D. A. de, & Montevechi, J. A. B. (2008). Uma Proposta de Técnica de Modelagem Conceitual para a Simulação através de Elementos do IDEF. In: *Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO)*, 40, 2008, João Pessoa.

- Miluska Aylin, A. Y. (2016). Integración Lean Manufacturing y Seis Sigma. Aplicación pymes. 86. https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/72921/TFMIntegraciónLeanSeisSigma_MiluskaAñaguari.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Mourtzis, D., Doukas, M., & Bernidaki, D. (2014). Simulation in manufacturing: Review and challenges. *Procedia CIRP*, 25(C). <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.10.032>
- Pacheco, D. A. de J., Pergher, I., Antunes Junior, J. A. V., & Roehe Vaccaro, G. L. (2019). Exploring the integration between Lean and the Theory of Constraints in Operations Management. *International Journal of Lean Six Sigma*, 10(3). <https://doi.org/10.1108/IJLSS-08-2017-0095>
- Prakash, S., Kumar, S., Soni, G., Mahto, R. V., & Pandey, N. (2022). A decade of the international journal of lean six sigma: bibliometric overview. In *International Journal of Lean Six Sigma* (Vol. 13, Issue 2). <https://doi.org/10.1108/IJLSS-12-2020-0219>
- Rajini, J., Nagaraju, D., & Narayanan, S. (2018). Integration of lean, Six Sigma and theory of constraints for productivity improvement of mining industry. *International Journal of Productivity and Quality Management*, 24(3). <https://doi.org/10.1504/IJPQM.2018.092986>
- Ramírez Pérez, J. F., López Torres, V. G., Hernández Castillo, S. A., & Morejón Valdés, M. (2021). LEAN SIX SIGMA E INDUSTRIA 4.0, UNA REVISIÓN DESDE LA ADMINISTRACIÓN DE OPERACIONES PARA LA MEJORA CONTINUA DE LAS ORGANIZACIONES. *UNESUM-Ciencias. Revista Científica Multidisciplinaria*. ISSN 2602-8166, 5(4). <https://doi.org/10.47230/unesciencias.v5.n4.2021.584>
- Santos, C. H. dos, de Queiroz, J. A., Leal, F., & Montevechi, J. A. B. (2022). Use of simulation in the industry 4.0 context: Creation of a Digital Twin to optimise decision making on non-automated process. *Journal of Simulation*, 16(3), 284–297. <https://doi.org/10.1080/17477778.2020.1811172>
- Solís Granda, L., Pérez Manzo, O., Burgos Villamar, I., & Villao Viteri, J. (2017). Uso de la Administración de Operaciones en las Mipymes. *Revista Científica y Tecnológica UPSE*, 4(1). <https://doi.org/10.26423/rctu.v4i1.243>
- Sukwadi, R., Felicia, Y., & Muafi. (2021). TOC, lean, and six sigma: An integrated model to increase the productivity of the textile industry. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 44(1).
- Tampubolon, S., & Purba, H. H. (2021). Lean six sigma implementation, a systematic literature review. In *International Journal of Production Management and Engineering* (Vol. 9, Issue 2). <https://doi.org/10.4995/IJPM.2021.14561>
- Tortorella, G. L., Fetterman, D., Giglio, R., & Borges, G. A. (2018). Implementação Da Produção Enxuta E Indústria 4.0 Em Empresas Brasileiras De Manufatura. *Revista Empreender e Inovar*, 1(1).
- Tyagi, S., Cai, X., Yang, K., & Chambers, T. (2015). Lean tools and methods to support efficient knowledge creation. *International Journal of Information Management*, 35(2). <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2014.12.007>
- Ynzunza, C., Izar, J., Bocarando, J., Aguilar, F., & Larios, M. (2017). El Entorno de la Industria 4.0: Implicaciones y Perspectivas Futuras Implications and Perspectives of Industry 4.0. *Conciencia Tecnológica*, 8.