

“Bottleneck Detection Depending on the Duration of the Active Periods”

ABSTRACT

Bottlenecks are a problem for companies and there are many methods to detect them and make improvements in companies. Companies will always have bottlenecks in their production lines, so it is important to detect and identify them. Therefore, the detection of bottlenecks in a production line was carried out by means of the active period method, seeking to be able to predict the improvement of the global system based on the improvements of the bottleneck.

To achieve the investigation, a process was followed which consists of measuring the inactive times of the machines, graphing the inactive times, observing the displacement of the bottlenecks, analyzing the displacement and finally predicting the improvement of the global system.

A visit was made to the San Lucas Apparel factory in Choloma, Cortés, Honduras, where all the necessary information was obtained to develop the project. With the information, a graph was made where it was possible to define that machine 43418 was the bottleneck at the beginning and then it was moved to machine 40668. Then an analysis was made to improve the system and it was concluded that the process should be improved of machine 43418, having a higher percentage of single bottleneck with 35.29% and changing bottleneck with 41.18%.

Having these data, we went to the prediction phase, where the improvement of the production line was estimated through bottleneck improvements. For this data, the cycle time was taken for each process of the machines. In the case of the machine 43418, having a bottleneck of 76.47%, it has an improvement in time for the entire production line of 0.7647 seconds in the cycle time between parts.

Keywords: bottleneck, production line, improvement prediction, active method.

I. INTRODUCCIÓN

Los cuellos de botellas en las empresas son un problema, porque por medio de ellos se obtienen pérdidas de dinero e insatisfacción del cliente. El cuello de botella es una etapa del proceso la cual no funciona de manera eficiente o trabaja a un bajo nivel de productividad la cual hace que una empresa no complete a tiempo los pedidos, las metas de producción no se cumplan, tiempos muertos, gastos por mano de obra y almacenamiento extra, etc. Esta ineficiencia se puede dar por factores externos o internos, es decir, por acciones que pasan dentro de la empresa o fuera de la empresa.

En la actualidad, existen muchos métodos para detectar donde exactamente se encuentran los cuellos de botella en una

línea de producción. En este proyecto se usará el método de periodo activo. Este se basa en ver cuando las máquinas están activas e inactivas en la misma línea de producción y por medio de este método se puede predecir la mejora del sistema global por medio de las mejoras de los cuellos.

Es importante eliminar los cuellos de botella para tener una mejor productividad y esto ayuda a las empresas a aumentar su economía. El objetivo de esta investigación es detectar los cuellos de botella en la línea de producción haciendo uso del método del periodo activo de las máquinas y predecir la mejora en el sistema.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A. *Precedentes del Problema*

Kwon y Lim [1] comentan que los sistemas de fabricación están limitados por uno o más cuellos de botella que degradan el rendimiento del sistema. Los métodos tradicionales de detección de cuellos de botella incluyen los tiempos de espera o la longitud de las colas en las estaciones de producción y su utilización. Los sistemas pueden cambiar con el tiempo debido a eventos aleatorios, como tiempos de entrega de proyectos, fallas de máquinas y tiempos de reparación, con cuellos de botella que luego se trasladan de un sitio a otro. Un ciclo de actividad en una estación de trabajo hace que otras estaciones de trabajo esperen la producción. La información sobre cuándo y dónde ocurren los períodos activos puede ayudar a identificar cuellos de botella en los sistemas de producción.

B. *Definición del Problema*

De acuerdo con Siregar [2] los problemas de cuello de botella ralentizan de vez en cuando y, en ocasiones, detienen todo el proceso de fabricación, limitando así la capacidad de fabricación. Todos los sistemas de fabricación están limitados por uno o más problemas de cuello de botella, lo que significa que, independientemente de lo bien que esté diseñado un sistema de fabricación, no puede estar libre de cuellos de botella, incluidos el sistema de fabricación digital o la revolución de la industria 4.0. La consecuencia del problema de los cuellos de botella en el sistema de fabricación es la pérdida de valor económico porque define el volumen de los productos de fabricación.

La mejora de los problemas de los cuellos de botella mejorará el sistema global de fabricación, sin embargo, la mejora del proceso sólo puede lograrse mediante la detección e identificación de los cuellos de botella [3].

III. MARCO TEÓRICO

A. Conceptos de Cuellos de Botella

Los cuellos de botella se reconocen habitualmente como los recursos o utilidades que limitan en gran medida el rendimiento de un sistema de producción. Para las diferentes demandas de las aplicaciones y los diferentes modos de funcionamiento, se pueden encontrar en la literatura numerosas definiciones de lo que contribuye a un cuello de botella. Lawrence y Buss [4] resumen varias definiciones básicas: los puntos de congestión se producen en el flujo de productos, el recurso cuya capacidad es inferior a las demandas que se le hacen, un proceso que limita el rendimiento, bloqueos temporales para aumentar la producción, una instalación, un operador, etc., que impide la producción, cualquier operación que limite la producción.

Leporis y Králová [5] indican que el término "cuello de botella" se utiliza para describir un punto de estrangulamiento en cualquier sistema, desde las redes informáticas hasta la cadena de montaje de una fábrica. En un sistema de este tipo, siempre hay algún proceso, tarea, máquina, etc. que es el factor limitante que impide un mayor rendimiento y, por tanto, determina la capacidad de todo el sistema. Conocer el cuello de botella permite aumentar el rendimiento mejorando sólo un proceso del sistema en lugar de todas sus partes restantes. Por el contrario, Goldratt & Cox, [6] afirma que si hay un cuello de botella, nada de lo que se haga en el resto del flujo de valor puede mejorar el rendimiento.

1. Características Fundamentales de los Cuellos de Botella

Muchos factores de un sistema contribuyen a los cuellos de botella, como la capacidad de las máquinas y el número de operarios, según Wang y otros autores [7]. El cuello de botella de un sistema puede ser diferente desde distintas perspectivas y puede ser diferente para distintos tipos de clientes. En el caso de los sistemas de gran tamaño, la situación se vuelve muy compleja. En la última década se han realizado numerosos esfuerzos y se han presentado diversas definiciones, métodos de detección, aproximaciones y resultados asintóticos. Pero todavía no existe una definición o técnica de detección comúnmente aceptada. Esto se debe principalmente a la diversidad de los cuellos de botella en diferentes escenarios de aplicación. Ello conlleva dificultades a la hora de aplicar los resultados teóricos a las aplicaciones reales.

2. Cuellos de Botella de Producción

Una forma de definir el cuello de botella, de acuerdo con Wang y otros autores [7], es encontrar la máquina cuyo rendimiento afecta en mayor medida al rendimiento global del sistema. Se utiliza como medida la sensibilidad del rendimiento del sistema a la perturbación de los parámetros de la máquina.

Kikolski [8] menciona que es la estación de trabajo de la empresa o una célula de producción que se caracteriza por el nivel más bajo de un parámetro de producción específico entre todos los parámetros que participan en el proceso de fabricación. Esto puede dar lugar a una situación en la que una estación de trabajo anterior al cuello de botella termine de

procesar, pero no pueda enviar materiales, ya que la estación de trabajo que le sigue, al ser el cuello de botella del proceso, sigue ocupada en procesar pedidos anteriores.

Se entiende que el cuello de botella es una estación de trabajo que limita la eficiencia de producción de todo el proceso [9]. En la figura 1 se muestra un ejemplo de lo que es un cuello de botella.

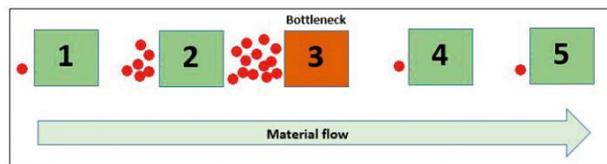


Figura 1 Idea de los cuellos de botella
Fuente: [8]

3. Tipos de Cuellos de Botellas

En función de la duración de las máquinas con cuello de botella, los cuellos de botella se clasifican en dos tipos: cuellos de botella a corto plazo y cuellos de botella de larga duración [10].

Karthikeyan [11] afirma que las máquinas que ralentizan el rendimiento del sistema durante un breve periodo de tiempo se consideran cuellos de botella a corto plazo. Por otro lado, las máquinas que ralentizan el rendimiento del sistema durante un largo periodo de tiempo se denominan máquinas de cuello de botella a largo plazo. Las máquinas de cuello de botella a largo plazo tienen un tiempo de cuello de botella elevado en comparación con otras máquinas del sistema de producción y también tienen un gran impacto en la reducción del rendimiento del sistema. A su vez, se pueden clasificar los cuellos de botella en tres tipos: cuello de botella simple, cuello de botella múltiple y cuello de botella cambiante.

El siguiente diagrama muestra los diferentes tipos de botellas que existen en una línea de producción.



Diagrama 1 Tipos de Cuellos de Botellas
Fuente: Elaboración propia

B. Métodos de Detección de Cuellos de Botella

L. Li y otros [12] establecen que la detección de los cuellos de botella se puede clasificar en dos categorías: analítico y basado en la simulación. En el método analítico el rendimiento del sistema se describe por medio de la distribución estadística. Este modelo no es conveniente para detectar cuellos de botella a corto plazo, al contrario, es bueno para la predicción a largo plazo. Por otra parte, el método

basado en la simulación posee desventajas como ser mucho tiempo de desarrollo y menor flexibilidad para distintos escenarios de producción, lo que provoca no poder aplicarlo. A raíz de este problema surgió un nuevo método útil para la detección de cuellos de botella a largo y corto plazo. El método es la detección de cuellos de botella basado en datos de tiempo real de sistemas de fabricación.

IV. METODOLOGÍA

A. Método de Periodo Activo para Detectar Cuellos de Botella

Roser y otros autores [13] establecen que este método se aplica a un sistema de eventos discretos consistiendo en una o más máquinas y al menos una de las máquinas es el cuello de botella en el sistema. Para este método se requiere que todas las máquinas se encuentren en una ocasión dada en una lista de posibles estados discretos.

Leporis y Králová [5] señalan que el método del periodo activo desarrollado por Christopher Roser en los Laboratorios Centrales de Investigación y Desarrollo de Toyota se basa en el análisis de la información del estado de la máquina determinando los periodos durante los cuales una máquina está activa sin interrupción. Para este método, se reconocen cinco estados distintos para cada máquina: trabajando, esperando, bloqueada, cambio de herramienta y en reparación. Para el análisis, los estados de espera y bloqueo se consideran inactivos. Los periodos activos se ven interrumpidos ocasionalmente por periodos inactivos durante los cuales la máquina espera la llegada de piezas (en espera) o su retirada (bloqueada). En este método, el término "máquina" abarca cualquier elemento que realice una actividad, por ejemplo, una máquina, un transportador, un AGV, etc.

El método seleccionado, de acuerdo con Roser [14], se basa en el tiempo que una máquina de procesamiento está activa sin interrupción. Como primer paso, es necesario agrupar todos los posibles estados de la máquina en dos grupos, que son estados activos o estados inactivos. Un estado está activo siempre que la máquina pueda provocar la espera de otras máquinas. Por ejemplo, trabajar en una pieza puede hacer que una máquina posterior inactiva espere a que se complete la pieza, o una máquina en reparación puede bloquear las máquinas anteriores. Un estado es inactivo si la máquina asociada no está activa, sino que espera la finalización de otra tarea, por ejemplo, la llegada de una pieza o servicio, o la retirada de una pieza.

Según Karthikeyan, [11] los dos posibles estados disponibles en el sistema de producción son los estados activos y los estados inactivos. El estado activo incluye el estado de funcionamiento del sistema y el estado inactivo incluye los estados de bloqueo, inactividad y fallo del sistema.

El estado activo de la máquina, de acuerdo con Wang y otros escritores [7] es diferente del concepto tradicional de ocupado. Todas las actividades destinadas a mejorar el rendimiento del sistema, incluidos los estados de reparación y

servicio, son estados activos. Por ejemplo, el trabajo, la reparación, el cambio de herramientas, etc. son estados activos.

Según Roser [15] establece que el método del periodo activo determina el cuello de botella momentáneo a través del proceso que tiene actualmente el mayor periodo sin interrupción por tiempos de espera (el periodo activo) y una variante simplificada del mismo. Este método es muy preciso, pero tiene grandes exigencias en cuanto a la calidad de los datos.

Karthikeyan [11] asegura que este método, es el primero para la detección de cuellos de botella basados en el método de la duración media activa. Este método puede utilizarse tanto para condiciones de estado estacionario como de estado no estacionario en las líneas de producción. Estos periodos activos se representan en la Fig. 2 para un ejemplo sencillo con cuatro procesos en secuencia.

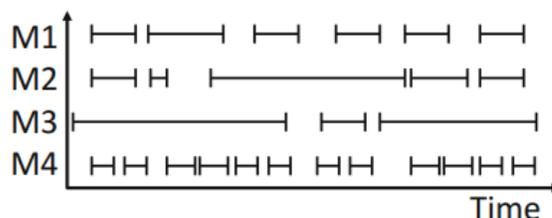


Figura 2 Ejemplo sencillo de los periodos activos para dos procesos Fuente: [15]

Wedel [16] afirma que el cuello de botella en tiempo real es una forma especial de cuello de botella momentáneo. Los cuellos de botella momentáneos son aquellos que pueden producirse en cualquier momento del tiempo. Existen dos métodos principales para detectar los cuellos de botella momentáneos. El primero, analiza el tiempo de espera de las piezas frente a una máquina, lo que es comparable a analizar la longitud de la cola frente a esta máquina. El cuello de botella momentáneo de una línea de producción es la máquina que se encuentra a continuación del buffer con la mayoría de las piezas. El segundo, es el método del periodo activo de Roser. El método de Roser analiza el tiempo que una máquina está en modo activo (produce piezas, se avería, tiene un cambio de herramienta, etc.). Si la máquina pasa a estar inactiva, el modo activo pasa a ser inactivo. El cuello de botella momentáneo en un momento dado es la máquina con el mayor tiempo activo ininterrumpido.

En un momento dado, de acuerdo con Roser y otros autores [15], el proceso con el período activo más largo es el cuello de botella. El cuello de botella se desplaza cuando un periodo más largo se solapa con el siguiente periodo activo más largo. La figura 3 muestra cómo el cuello de botella cambia de la máquina M3 a la M2 y viceversa para el ejemplo sencillo de la figura 2.

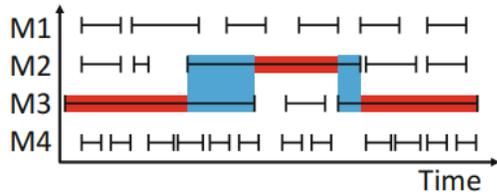


Figura 3 Ejemplo sencillo de los periodos activos de dos procesos que muestra el desplazamiento del cuello de botella
Fuente: [15]

- Adaptación del Método del Periodo Activo para la Predicción

Subramaniyan y otros [17] afirman que este método también ofrece la oportunidad de obtener información de diagnóstico, ya que se basa en la agregación de los diferentes estados de las máquinas para comprender mejor la naturaleza de los cuellos de botella. Además, este método puede utilizarse para detectar cuellos de botella en diferentes tipos de sistemas de producción, desde talleres hasta sistemas de flujo con o sin topes finitos. Además, el periodo activo de una máquina puede convertirse en una serie de datos temporales con una resolución temporal igual a meses, semanas, días, turnos, etc. A partir de estos datos de series temporales, se puede aplicar un método de predicción basado en series temporales establecido para estimar los futuros periodos activos de las máquinas y, por tanto, predecir los cuellos de botella en la línea de producción. La figura 4 muestra los tiempos activos e inactivos de la máquina.

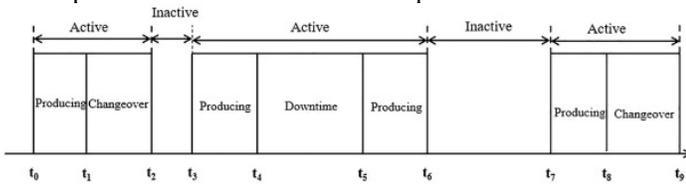


Figura 4 Estados activos e inactivos de la máquina
Fuente: [17]

Una de las diferencias es que, para una predicción de cuello de botella, no conocemos el comportamiento futuro del sistema de producción (si no, no sería necesaria ninguna predicción en primer lugar). La figura 3 muestra el ejemplo de la figura 1, aunque con una evolución futura desconocida. En este caso, el cuello de botella actual es el proceso con el periodo de actividad más largo hasta ahora. Desgraciadamente, no conocemos un cambio hasta que se produce. Sin embargo, sí sabemos qué proceso sería el segundo. La figura 4 muestra el cuello de botella actual M3 en rojo y el posible cuello de botella siguiente M2 en azul. Si el proceso marcado en azul se convertirá en el cuello de botella o no, no es visible a partir de estos datos hasta que ocurra.

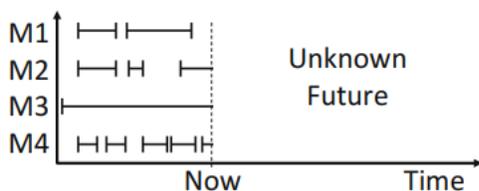


Figura 5 Ejemplo sencillo con periodos activos hasta el momento actual de la observación
Fuente: [15]

B. Variables de Investigación

Para el orden de las variables se consideran dos variables dependientes y una variable independiente. Estas variables se muestran a continuación:

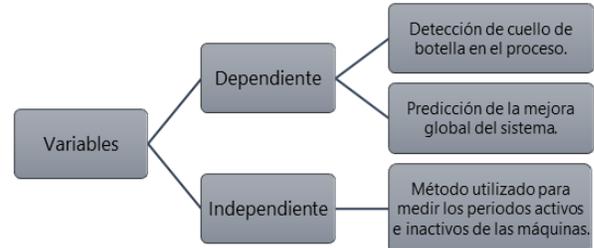


Diagrama 2 Variables de Investigación
Fuente: Elaboración propia

D. Metodología de Estudio

Esta investigación describe una forma precisa de detectar el cuello de botella en un sistema de fabricación, basada en los tiempos precisos en que un proceso está en espera o activo. Con el método se busca obtener las probabilidades de que diferentes procesos sean el cuello de botella (temporal), y estimar la mejora de la capacidad de todo el sistema si se mejora el cuello o los cuellos de botella. También es posible observar el desplazamiento de estos cuellos de botella a lo largo del tiempo. Para ello, se llevarán a cabo los siguientes pasos:

1. Medir Tiempos. Para los procesos existentes en la línea de producción, se medirán los tiempos en los que el proceso está activo (en funcionamiento, en avería, en reparación, en mantenimiento regular, en cambio, etc.), e inactivo (en espera de material, en espera de transporte).
2. Graficar. Trazar estas mediciones a lo largo del tiempo. Obtener una gráfica de columnas apiladas representando los periodos activos y los periodos inactivos.
3. Observar el desplazamiento. Con toda probabilidad, la longitud de las líneas no se distribuye uniformemente por los dos fundamentos básicos del método del periodo activo:
 - En cualquier momento, el proceso con el periodo activo ininterrumpido más largo es el cuello de botella.
 - Durante el solapamiento al final de los periodos activos ininterrumpidos más largos, el cuello de botella pasa de un proceso a otro.

Esto permite observar el desplazamiento de los cuellos de botella a lo largo del tiempo.

4. Analizar el desplazo. A partir de este análisis, es posible ver cómo cambia el cuello de botella a lo

largo del tiempo. Además, es posible calcular la probabilidad de que cada proceso sea el cuello de botella único o cambiante.

5. Predicciones. Conociendo estas probabilidades de cuello de botella, ahora es posible estimar la mejora del sistema en función de las mejoras del cuello de botella.
6. Simular. Teniendo la estimación de las mejoras en todo el sistema, se pueden simular estos cambios.

V. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A. Recolección de Datos

Como caso de estudio, se analizó una línea de producción en San Lucas Apparel, fabricante de ropa y tejidos en Río Nance, Choloma. San Lucas cuenta con diferentes equipos dedicados a la fabricación de diversas prendas, cada uno de esos equipos cuentan con 22 personas a cargo de las operaciones para realizar las piezas de ropa. Cada equipo y/o línea de producción debe realizar 2,200 piezas al día. Cuentan con una jornada laboral de 10 horas, de lunes a jueves, dando un total de 8,800 piezas fabricadas en 4 días.

Para comenzar, se tomaron los datos de cada una de las operaciones realizadas en una línea de producción (en este caso la línea EQ-874-12) para la fabricación de la prenda #10106, durante el mes de octubre.

Cuando se establecieron cuáles serían las operaciones para analizar, se tomaron los datos requeridos, en este caso, el tiempo en el que las máquinas estuvo inactiva por todo el mes de octubre durante los días que laboran, que es de lunes a jueves. Localizando la inactividad de la máquina, se puede concluir cuánto sería el tiempo activo.

Una vez obtenidos estos datos, se hace uso de un diagrama de tiempo para demostrar en qué momentos la máquina se encontraba en estado activo (línea hacia arriba) e inactivo (línea hacia abajo). De esta forma, se puede observar cuántas interrupciones había en la máquina en una jornada de 10 horas, de lunes a jueves por todo el mes.

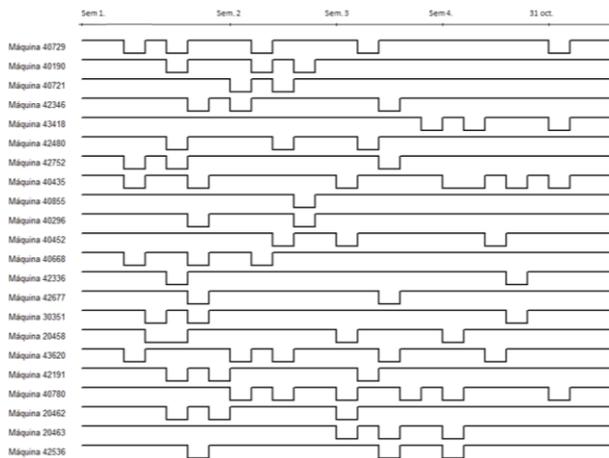


Diagrama 3 Diagrama de Tiempo de Estado Activo e Inactivo
Fuente: Elaboración Propia

B. Sole & Shifting Bottleneck (Cuello de Botella Único y Cambiante)

Recordando los dos principios del método matemático:

- En cualquier momento, el proceso con el periodo activo ininterrumpido más largo es el cuello de botella.
- Durante la superposición al final de los periodos activos ininterrumpidos más largos, el cuello de botella pasa de un proceso a otro.

Aquí, los periodos activos ininterrumpidos más largos están marcados en verde. Durante estos periodos, el proceso correspondiente es el único cuello de botella del sistema. Sin embargo, incluso el único cuello de botella es interrumpido eventualmente por otro proceso, y por lo tanto ya no es el cuello de botella. Otro proceso tendrá entonces el periodo activo más largo y será el cuello de botella. Durante la superposición entre los periodos, el cuello de botella pasará de un proceso a otro. En el gráfico, esto está marcado en azul.

Por lo tanto, este enfoque permite observar el desplazamiento de los cuellos de botella a lo largo del tiempo. En el caso estudiado, inicialmente el proceso de la máquina 43418 era el cuello de botella. A continuación, el cuello de botella se desplazó a la máquina 40668.

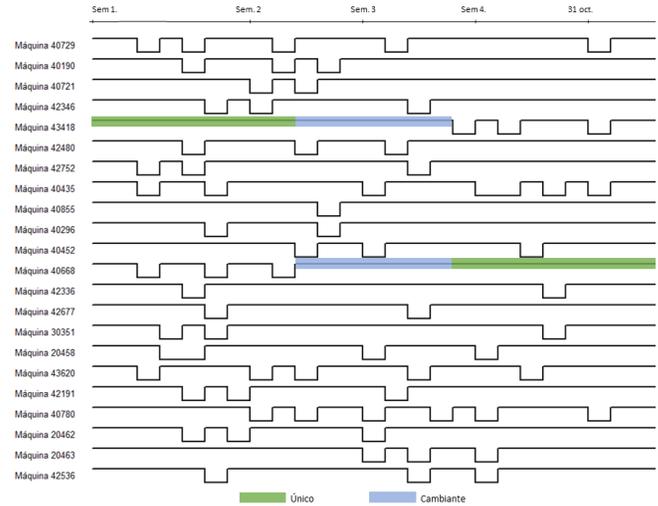


Diagrama 4 Diagrama de Cuello de Botella Único y Cambiante
Fuente: Elaboración Propia

C. Datos Resumidos

A partir de este análisis, es posible ver cómo cambia el cuello de botella a lo largo del tiempo. Además, es posible calcular la probabilidad de que cada proceso sea el cuello de botella único o cambiante.

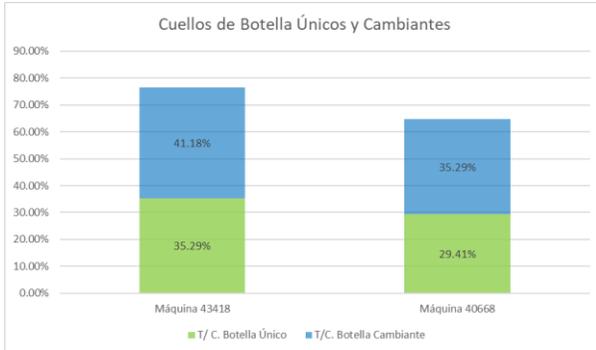
Máquina		Tiempo de Cuello único (min)	Tiempo Cuello Cambiante (min)
43418		3600.0	4200.00
40668		3000.0	3600.00
T/Total (min)		10200	10200

Tabla 1 Tiempo de Cuello de Botella Único y Cambiante
Fuente: Elaboración Propia

	T/ C. Botella Único	T/C. Botella Cambiante
Máquina 43418	35.29%	41.18%
Máquina 40668	29.41%	35.29%

Tabla 2 Porcentaje de Cuello de Botella Único y Cambiante
Fuente: Elaboración Propia

El análisis resumido que se presenta a continuación muestra que el proceso de la máquina 43418 fue el cuello de botella con mayor frecuencia, siendo el cuello de botella único el 35.29% del tiempo y el cuello de botella cambiante otro 41.18% de las veces. Si se desea mejorar el sistema, se debe mejorar el proceso correspondiente a la máquina 43418.



Gráfica 1 Porcentaje de Cuellos de Botellas Únicos y Cambiantes
Fuente: Elaboración Propia

Sin embargo, la máquina 40668 también fue el único cuello de botella el 29.41% del tiempo, con otro 35.29% como cuello de botella cambiante. Aunque es menos que la máquina 43418, no es del todo insignificante. Si hay formas fáciles de mejorar este proceso, también puede ser bueno para el sistema.

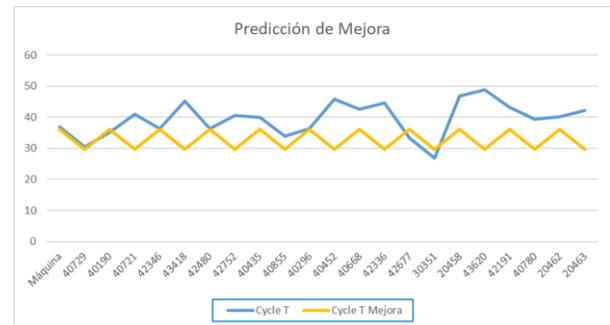
D. Predicciones

Conociendo estas probabilidades de los cuellos de botella, es posible incluso estimar la mejora del sistema global en función de las mejoras del cuello de botella. Por ejemplo, si un proceso es el cuello de botella el 80% del tiempo, una mejora en el tiempo de ciclo del cuello de botella conducirá a una mejora de 0,8 segundos del tiempo de ciclo entre piezas para todo el sistema. En este caso, si la máquina 43418 que fue el cuello de botella el 76.47% del tiempo, tiene una mejora en el tiempo de ciclo del cuello de botella conducirá a una mejora de 0,7647 segundos del tiempo de ciclo entre piezas para todo el sistema.

Para esto, necesitamos saber el tiempo de ciclo mostrados en la siguiente tabla:

Máquina	Cycle T (seg)	Cycle T(seg) Mejora
40729	36.95	36.1853
40190	30.41	29.6453
40721	35.21	36.1853
42346	40.95	29.6453
43418	36.31	36.1853
42480	45.28	29.6453
42752	36.3	36.1853
40435	40.54	29.6453
40855	40.04	36.1853
40296	33.97	29.6453
40452	36.4	36.1853
40668	45.82	29.6453
42336	42.67	36.1853
42677	44.55	29.6453
30351	33.33	36.1853
20458	26.87	29.6453
43620	46.87	36.1853
42191	48.93	29.6453
40780	43.23	36.1853
20462	39.45	29.6453
20463	40.12	36.1853
42536	42.17	29.6453

Tabla 3 Tiempo de Ciclo de las Máquinas
Fuente: Elaboración Propia



Gráfica 2 Predicción de Mejora
Fuente: Elaboración Propia

E. Ventajas del Método

El método de periodo activo tiene las siguientes ventajas:

- Permite hacer una evaluación de cuellos de botella simple y confiable.
- Puede identificar de forma fiable todas las máquinas y la posibilidad de que los AGV, los transportadores o los trabajadores se conviertan en cuellos de botella.
- Las métricas se calculan individualmente para cada trabajo, por lo que el método se puede utilizar independientemente de la estructura del sistema de producción (secuencia de trabajos, ramas de proceso, ciclos de retrabajo, etc.).
- El método es aplicable a todo tipo de sistemas, incluidos talleres, sistemas paralelos, etc. Este método funciona siempre que los sistemas estén conectados, es decir, no dos sistemas separados.

La desventaja es que requiere de muchos datos. Es necesario saber exactamente cuándo está activo cada proceso, y a veces es difícil obtener toda esta información.

VI. CONCLUSIONES

Luego de la recolección de datos y el análisis de datos realizado para la presente investigación, se puede concluir lo siguiente:

- La identificación de los cuellos de botella es significativo para toda empresa. Los cuellos de botella tienen el mayor impacto en la eficiencia porque decretan el ritmo de todo el proceso de producción. El método de periodo activo permite identificar los principales cuellos de botellas en una línea de producción. Incluso durante la sobreposición o traslapeo al final de los periodos activos ininterrumpidos más largos, se puede observar cómo el cuello de botella pasa de un proceso a otro.
- Los datos adecuados a recolectar para este método son los momentos exactos en los que la máquina y/o proceso tuvo un periodo de inactividad y actividad. Cuanto más tiempo esté activo un proceso sin interrupción por un tiempo de espera, más probable es que sea el cuello de botella. Un proceso que se interrumpe con frecuencia por la espera de material o por el transporte es poco probable que sea el cuello de botella.
- Al conocer las probabilidades de cuello de botella en la línea de producción, es realizable evaluar la mejora del sistema global de acuerdo con las mejoras del cuello de botella. En el caso de estudio analizado, el principal cuello de botella era la máquina 43418 el 76.47% del tiempo, es decir, que una mejora en este proceso llevará a una mejora de 0,7647 segundos entre piezas del tiempo de ciclo para todo el sistema.

VII. RECOMENDACIONES

Existen numerosos métodos de detección de cuellos de botella tanto en el mundo académico como en la industria. Sin embargo, la mayoría tienen ciertas desventajas como el hecho de que no consideran el desplazamiento de los cuellos de botella. En esta investigación se mencionaron varios métodos, aquellos que se basan en los tiempos de ciclo y las utilidades, los tiempos de espera y las longitudes de las colas, el método de la flecha, el método del punto de inflexión, y el método del periodo activo.

El método de periodo activo utilizado, podría decirse que es uno de los métodos que tiene una gran oportunidad de exploración, hay muchas maneras en las que investigaciones de manera más extensas podrían ayudar a enriquecer la detección de cuellos de botellas en diversos sistemas de producción.

VIII. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos principalmente a Dios por ser nuestro guía en todo momento y por siempre darnos la fortaleza y sabiduría necesaria en esta etapa universitaria.

Deseamos agradecer a nuestras familias quienes siempre estuvieron ahí para guiarnos y aconsejarnos. Nuestros padres que siempre nos brindaron todo lo necesario para culminar nuestros estudios.

Nuestros catedráticos que compartieron todos sus conocimientos para que nosotras pudiéramos aprender más. En especial a la Ing. María Elena Perdomo quien fue nuestra asesora en este proyecto y ha sido un gran apoyo para nosotras. De la misma manera, al Ing. Roger Pérez por habernos ayudado con el proyecto investigando y despejando nuestras dudas.

REFERENCIAS

- [1] C.-M. Kwon and S. Lim, "Bottleneck Detection Based on Duration of Active Periods," *J. Korea Soc. Simul.*, vol. 22, no. 3, pp. 35–41, Sep. 2013, doi: 10.9709/JKSS.2013.22.3.035.
- [2] I. Siregar, "Application of Theory of Constraints in Bottleneck Work Stations Optimization," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1339, no. 1, p. 012024, Dec. 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1339/1/012024.
- [3] S. Lin, J. Liu, and S. Li, "Production Bottleneck Prediction of Multi-Variety and Small Batch Production Workshop," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2187, no. 1, p. 012057, Feb. 2022, doi: 10.1088/1742-6596/2187/1/012057.
- [4] S. Lawrence and A. Buss, "Economic Analysis of Production Bottlenecks," *Math. Probl. Eng.*, vol. 1, Jan. 1995, doi: 10.1155/S1024123X95000202.
- [5] M. Leporis and Z. Králová, "A SIMULATION APPROACH TO PRODUCTION LINE BOTTLENECK ANALYSIS," 2010, p. 10.
- [6] E. M. Goldratt and J. Cox, *The goal: a process of ongoing improvement*, 3rd rev. ed., 20th anniversary ed. Great Barrington, MA: North River Press, 2004.
- [7] Y. Wang, Q. Zhao, and D. Zheng, "Bottlenecks in production networks: An overview," *J. Syst. Sci. Syst. Eng.*, vol. 14, no. 3, pp. 347–363, Sep. 2005, doi: 10.1007/s11518-006-0198-3.
- [8] M. Kikolski, "Identification of production bottlenecks with the use of Plant Simulation software," *Ekonom. Zarzadzanie*, vol. 8, no. 4, pp. 103–112, Dec. 2016, doi: 10.1515/emj-2016-0038.
- [9] C. E. Betterton and S. J. Silver, "Detecting bottlenecks in serial production lines – a focus on interdeparture time variance," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 50, no. 15, pp. 4158–4174, Aug. 2012, doi: 10.1080/00207543.2011.596847.
- [10] A. Grosfeld-Nir, "Single bottleneck systems with proportional expected yields and rigid demand," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 80, no. 2, pp. 297–307, Jan. 1995, doi: 10.1016/0377-2217(94)00172-9.

- [11] A. P. Karthikeyan, “DETECTION OF BOTTLENECKS FOR MULTIPLE PRODUCTS AND MITIGATION USING ALTERNATIVE PROCESS PLANS,” 2010.
- [12] L. Li, Q. Chang, J. Ni, G. Xiao, and S. Biller, “Bottleneck Detection of Manufacturing Systems Using Data Driven Method,” in *2007 IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing*, Ann Arbor, MI, USA, Jul. 2007, pp. 76–81. doi: 10.1109/ISAM.2007.4288452.
- [13] C. Roser, M. Nakano, and M. Tanaka, “A practical bottleneck detection method,” in *Proceeding of the 2001 Winter Simulation Conference (Cat. No.01CH37304)*, Arlington, VA, USA, 2001, vol. 2, pp. 949–953. doi: 10.1109/WSC.2001.977398.
- [14] C. Roser, M. Nakano, and M. Tanaka, “Shifting bottleneck detection,” in *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, San Diego, CA, USA, 2002, vol. 2, pp. 1079–1086. doi: 10.1109/WSC.2002.1166360.
- [15] C. Roser *et al.*, “Bottleneck Prediction Using the Active Period Method in Combination with Buffer Inventories,” in *Advances in Production Management Systems. The Path to Intelligent, Collaborative and Sustainable Manufacturing*, vol. 514, H. Lödding, R. Riedel, K.-D. Thoben, G. von Cieminski, and D. Kiritsis, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 374–381. doi: 10.1007/978-3-319-66926-7_43.
- [16] M. Wedel, M. von Hacht, R. Hieber, J. Metternich, and E. Abele, “Real-time Bottleneck Detection and Prediction to Prioritize Fault Repair in Interlinked Production Lines,” *Procedia CIRP*, vol. 37, pp. 140–145, 2015, doi: 10.1016/j.procir.2015.08.071.
- [17] M. Subramaniyan, A. Skoogh, H. Salomonsson, P. Bangalore, and J. Bokrantz, “A data-driven algorithm to predict throughput bottlenecks in a production system based on active periods of the machines,” *Comput. Ind. Eng.*, vol. 125, pp. 533–544, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.cie.2018.04.024.