

## Estudio del sistema de producción de rodillos mecánicos en la empresa AR Los Restrepos S.A.S mediante Simulación de Eventos Discretos

Federico Banoy Restrepo

[fbanoyr@eafit.edu.co](mailto:fbanoyr@eafit.edu.co)

Ingeniería Matemática

Escuela de Ciencias, Universidad EAFIT

Salomón Cardeño Luján

[scardenol@eafit.edu.co](mailto:scardenol@eafit.edu.co)

Ingeniería Matemática

Escuela de Ciencias, Universidad EAFIT

Valentina Movil Sandoval

[vmovils@eafit.edu.co](mailto:vmovils@eafit.edu.co)

Ingeniería Matemática

Escuela de Ciencias, Universidad EAFIT

### Resumen

Este estudio implementa la Simulación de Eventos Discretos (DES) para modelar y simular el proceso de fabricación de rodillos mecánicos en la empresa A.R. Los Restrepos S.A.S con el fin de simular e identificar el proceso con mayor promedio en cola (cuellos de botella) y proponer una alternativa (números de máquinas y/o personal de rotación) para dar una solución a los cuellos de botella encontrados al reducir su tiempo de producción en un mínimo del 10%. Se realizó un muestreo *in-situ* del tiempo de uso de cada máquina y se realizó un test de homogeneidad para determinar si los datos provenían o no de la misma población. Luego, se modeló cada máquina mediante la mejor distribución de probabilidad obtenida por los tests de Chi-cuadrado, Kolmogorov-Smirnov y Anderson-Darling.

La simulación se llevó a cabo en el software Simul8 utilizando las distribuciones de probabilidad obtenidas para cada máquina. El tiempo de simulación fue de 1 semana, con 8 horas de trabajo al día, 2 turnos de trabajo y 1 hora de almuerzo para los trabajadores. Se realizó un experimento  $2^k$  con  $k = 3$  factores o parámetros, donde se midió el efecto de los mismos en el tiempo promedio del sistema de producción y en una etapa específica donde se sospechaba que había un cuello de botella.

Los resultados indicaron evidencia de cuellos de botella en el proceso de fabricación de rodillos mecánicos. La simulación sugiere que añadir una máquina al proceso de Careado de eje mejoró el tiempo promedio de la etapa en un 20,97%.

**Palabras clave:** modelación; simulación de eventos discretos; DES; muestreo in situ; test de homogeneidad; ajuste de distribución; sistema de producción; rodillos.

### 1. Introducción

El sistema de producción de rodillos mecánicos en la empresa A.R. Los Restrepos S.A.S. constituye un ejemplo de Simulación de Eventos Discretos o simplemente DES por sus siglas en inglés. Seguidamente, la DES es un paradigma de modelación que se centra en los conceptos de entidades, recursos y gráficos de bloques para describir el flujo de entidades y el uso compartido de recursos a un nivel bajo y/o medio de abstracción (Ver figura 1).

De acuerdo con Borshchev y Filippov (2004), existen muchas herramientas comerciales que apoyan este estilo de modelado, algunas son de propósito general y otras apuntan a nichos particulares: servicio, fabricación, logística, procesos de negocios, centros de llamadas, etc. En concreto, este estudio utiliza la DES para modelar y simular el proceso de manufactura de rodillos mecánicos según la cantidad rodillos que le sean solicitados a la empresa en mención y, cuya entrega depende estrictamente de la eficacia del proceso de manufactura.

Consecuentemente, la fabricación de los rodillos mecánicos está compuesta por varios subprocesos (Véase figura 2) que se llevan a cabo en una planta industrial operada en gran parte por trabajadores rotatorios. Posteriormente, según Piccinini et al. (2018) y Cunha y Mesquita (1995), es importante determinar entre otras cosas, los requisitos de manejo del equipo o materiales, el rendimiento del sistema, las diferentes estrategias de control y la eficiencia en el despacho de solicitudes. Por lo tanto, el objetivo del modelado por simulación desarrollado en este trabajo es dar cuenta de la existencia de posibles cuellos de botella en uno o más de los subprocesos necesarios para la fabricación de rodillos en la empresa inicialmente citada.

Finalmente, al aplicar los principios de modelación propios de la DES se pretende entender el sistema de manufactura de rodillos mecánicos, con el fin de modelarlo de forma semi-realista en un entorno virtual específico. Como resultado, en este documento se detallan las etapas de modelado básicas (modelado conceptual, recopilación y análisis de datos, codificación, verificación y validación y, experimentación) que favorecen el alcance de los propósitos ya descritos.

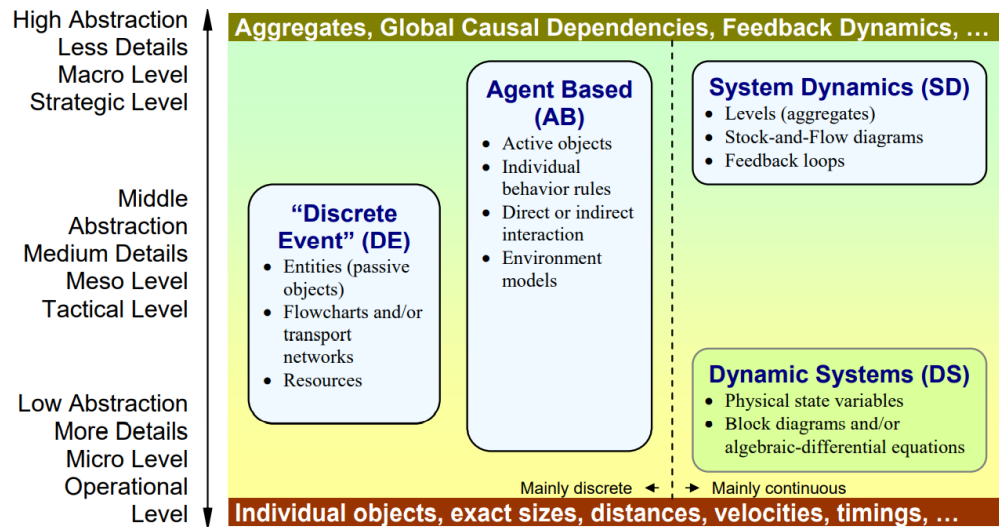


Figura 1: Enfoques (paradigmas) en el modelado de simulación en la escala de nivel de abstracción Borshchev y Filippov (2004).

## 2. Modelamiento conceptual

### 2.1. Definición del problema

La empresa A.R Los Restrepos S.A.S. se dedica desde hace 35 años a la importación, producción y comercialización de líneas de transmisión de potencia mecánica y manejo de materiales en Colombia. Particularmente, en la sede de la empresa ubicada en Medellín se fabrican rodillos mecánicos por pedido, y se entregan como resultado de un proceso de manufactura.

Por otro lado, en una visita reciente a la empresa se observó que el proceso de fabricación de rodi-

llos se lleva a cabo en 7 subprocesos: Corte de tubo, Corte de Eje, Cajear, Careado, Tapado y Ranurado. Posteriormente, conversando con el gerente, este ha manifestado que quiere validar si existe algún cuello de botella en uno o en varios de los subprocesos descritos, tales que puedan surgir retrasos en el proceso general para fabricar un ejemplar de rodillo. Por ejemplo, el gerente sospecha que dicho cuello está en el subproceso de medición ya que en este se llevan a cabo diversas actividades. De ahí que, en la figura 1 se represente el proceso de fabricación con sus respectivas entidades, recursos y flujos, para entender a priori que pasa en el sistema.

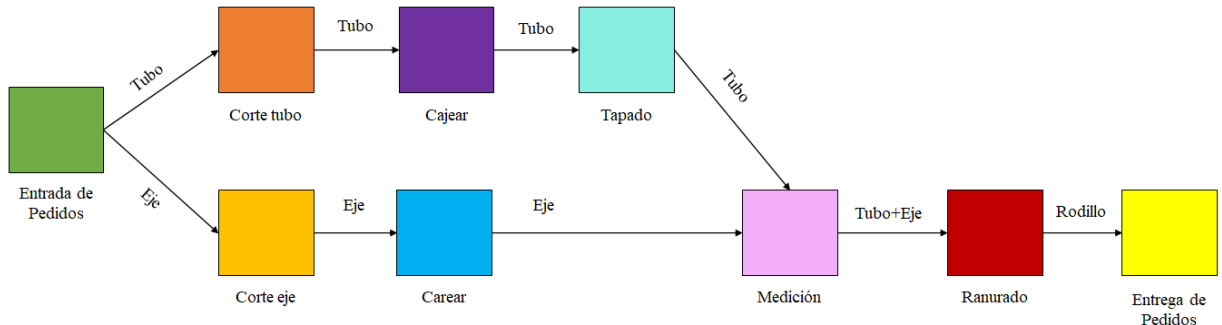


Figura 2: Diagrama del proceso de fabricación de rodillos mecánico

A partir de la figura, se debe considerar que el proceso inicia gracias a un pedido que contiene el número de rodillos a fabricar. De hecho, diariamente este número de rodillos es 45. También, una vez recibido el pedido se procede a transformar la materia prima. Por esta razón, en un primer momento se procede a cortar el tubo y a cortar el eje, después estos transformados se quedan en cola hasta ir respectivamente a los subprocesos de cajear y careado. En lo que se refiere al tubo, este a diferencia del eje, antes de entrar a medición pasa por un subproceso de tapado mientras que el eje espera para ser tratado en conjunto.

Por consiguiente, al culminar el subproceso de medición, el eje y el tubo pasan a ranurado y, para efectos de brevedad, en este trabajo diremos que aquí salen del proceso de fabricación. Hay que decir que, el gerente de la empresa comenta que para realizar el proceso descrito se requieren 5 trabajadores, de los cuales 3 son no especializados y pueden estar en cualquier subproceso a excepción del cajear y careado, por lo que, los dos restantes son especializados y solo trabajan en cajear y careado.

Finalmente, se puede pensar en que si existiese algún cuello de botella sería preciso determinar el número de recursos para disminuir en un porcentaje específico el tiempo en cola sabiendo con antelación la capacidad máxima del sistema en aras de mitigar y/o prevenir este tipo de problemas.

## 2.2. ¿Por qué DES?

En la Simulación de Eventos Discretos (DES) es común hablar de entidades, recursos, actividad y colas. Concretamente, las entidades describen objetos pasivos que se mueven a través del sistema, los recursos representan los bienes con los que se cuenta para lograr la actividad asociada al sistema, la actividad es el propósito central del sistema y las colas son los tiempos de espera asociados a los subprocesos que ostenta el sistema. De esta manera, la figura 2 constituye un caso específico al que se le puede hacer un enfoque desde la DES ya que, los trabajadores y las máquinas pueden categorizarse como entidades y recursos respectivamente, y porque su actividad central: manufacturar rodillos mecánicos, esta compuesta por 7 subprocesos los cuales presentan colas o tiempos de espera para pasar de uno al otro.

Desde otro punto de vista, la figura 1 hace hincapié en que la DES se realiza a un nivel bajo y/o medio de abstracción. En seguida, dichos niveles hacen referencia a la gama de problemas que se podrían modelar utilizando uno o varios de los paradigmas de modelación asociados (Dinámica de sistemas -DS-, Simulación de Eventos Discretos -DES- y Modelación Basada en Agentes -AB-). Para ilustrar esto, los niveles bajo y medio se centran en el estudio de cadenas de suministro, transporte, departamentos de emergencias, plantas industriales, etc. Además, estos niveles se caracterizan por considerar variables de interés como trayectorias físicas, tiempos promedio, entre otras. De ahí que, el sistema a modelar al adecuarse a las cualidades descritas sea objeto de interés para llevar al mundo virtual mediante el uso de DES.

Finalmente, existen trabajos que han empleado la DES como técnica para el mejoramiento de los procesos de industriales. No obstante, han complementado dicha técnica con otro paradigma de modelación conocido como Modelación Basada en Agentes prestando especial cuidado a la relación existente entre los humanos, su comportamiento y la eficiencia de los procesos. Por consiguiente, cabe aclarar que, abordar el problema desde esa perspectiva no significa que deba ser el uso de la DES como técnica de modelación, si no que, la correspondencia entre las dos se centrará ya no solo en el uso de entidades y recursos, si no también, en procesos de toma de decisiones ligados a el personal humano que interactúa en el sistema.

### **2.3. Objetivos de la modelación**

En esta sección se define el propósito y los objetivos específicos del modelo, y los objetivos del proyecto.

#### **2.3.1. Propósito del modelo**

Dar cuenta de la existencia de posibles cuellos de botella en uno o más subprocessos necesarios para la fabricación de rodillos mecánicos en la empresa AR Restrepo S.A.S.

#### **2.3.2. Objetivos específicos del modelo**

1. Simular e identificar el proceso con mayor promedio en cola.
2. Proponer una alternativa (números de máquinas y/o personal de rotación) para dar una solución a los cuellos de botella encontrados, que mejore el tiempo de estos en un mínimo del 10%.

#### **2.3.3. Objetivos del proyecto**

- **Propósito del proyecto:** Aplicar los principios de modelación propios de la DES como vía para el entendimiento del sistema de manufactura de rodillos.
- **Time-scale:** Realizar un reporte frente a esta modelación en 1 mes.
- **Nature of model display:** Esquema en 2D que muestre el flujo de materiales transformados en el proceso de fabricación de rodillos, gráficas elaboradas en Python y/o R que den cuenta de la verificación, validación y obtención de resultados por modelación y simulación.
- **Naturaleza del uso del modelo:** Por modelista

### **2.4. Definición de entradas y salidas del modelo**

#### **Factores experimentales**

- Numero de máquinas (rango: [1, 2] para la máquina en la que se sospecha el cuello de botella).
- Numero de trabajadores (rango: [2, 3] de personal no especializado en caso; rango: [1, 3] de personal especializado).

**Nota:**

- El torno de tubo y el torno de eje son 2 máquinas que únicamente requieren del uso de personal especializado.

**Respuestas (para determinar el logro de los objetivos)**

- Tiempo promedio de espera en cada una de las filas del sistema.
- Histograma de tiempo de espera total para todos los rodillos terminados, incluyendo máximo, mínimo, promedio y desviación estándar.

**Respuestas (para determinar razones de fallo para cumplir objetivos)**

- Porcentaje de ocupación de las máquinas.
- Porcentaje de ocupación por trabajador.
- Serie de tiempo de promedio de pedidos en fila.

**2.5. Definición del contenido del modelo**

En esta sección se plantea el alcance, nivel de detalle, supuestos y simplificaciones del modelo.

**2.5.1. Alcance**

Componente	Incluye/Excluye	Justificación
Pedidos	Incluye	Se trasladan a través de los procesos de la manufactura.
Trabajadores - Servicio	Incluye	Factor experimental.
- Insumos	Excluye	Se asume que siempre hay materia prima.
- Reparaciones	Excluye	Evento poco común.
- Limpieza	Excluye	No afecta a los tiempos entre servicios.
Máquinas - Cantidad	Incluye	Factor experimental
- Paro por reparación	Excluye	Evento poco común.
- Limpieza	Excluye	No afecta a los tiempos entre servicios.
Fila para cada máquina	Incluye	Necesario para tiempos de espera y tiempos en el sistema

Dentro del alcance del modelo se realizan varias reducciones. Para el caso de la exclusión de los insumos en las máquinas, se asume que siempre hay materia prima pues agregaría un mayor orden de complejidad a los pedidos que no es relevante en este caso, además, se observó que para un día laboral había más inventario del necesario para abastecer las ordenes del día. En cuanto a las reparaciones por parte de los trabajadores y los paros de reparación de las máquinas, se excluyen ambas pues en el horizonte de tiempo considerado no son representativos. Finalmente se excluye la limpieza de trabajadores y máquinas, pues ninguna afecta a los tiempos entre servicios.

### 2.5.2. Nivel de detalle

Componente	Detalle	Incluye/Excluye	Comentario
Pedido	Tiempo entre pedidos	Incluye	Modelado como números aleatorios de una distribución exponencial.
	Tamaño de el pedido	Excluye	Incluido en el tiempo entre pedidos.
	Diferentes pedidos	Excluye	Incluido en el tiempo entre pedidos.
Trabajadores	Numero de trabajadores	Incluye	Factor experimental.
	Horarios de trabajo	Incluye	Se toman tiempo para almorzar por día.
	Ausencias	Excluye	No es muy común en el año laboral.
Filas	Hacer fila	Incluye	Se requiere para ver los tiempos de espera y tiempos en el sistema.
	Capacidad	Excluye	Se asume que no tiene.
	Comportamiento	Excluye	No se entiende por completo el comportamiento de la fila.

### 2.5.3. Supuestos

- Se asume que no hay interrupciones inesperadas en el proceso de producción como: ir al baño, limpiar los equipos etc. Sin embargo, sí se considera el turno de almuerzo (cada día de 12:00 a 13:00).
- Se asume que los daños de máquina ocurren raramente por lo que no se consideran en la modelación.
- Se asume que no hay tablas de prioridad, es decir, que el pedido se entrega cuando se terminan de fabricar los rodillos y no porque desde el pedido se halla previsto una fecha de entrega.
- Se asume que la distribución de tiempo de producción depende de la máquina y no del empleado.

### 2.5.4. Simplificaciones

- Se tomaron datos de un solo día y con ellos se modela una semana de producción.
- Se considera que siempre se cuenta con materia prima, es decir, no se pierde tiempo en el proceso buscando tubos y/o ejes para manufacturar, eso siempre se tiene.
- Se eliminan los subprocesos de medición de eje (no se tenían suficientes datos) y martillado (porque su distribución era poco confiable).
- No se considera en la modelación los subprocesos de soldadura y pintura por recomendación del gerente de la empresa, pues él considera que por ser procesos que se llevan a cabo a través de máquina o con un empleado diferente a los ya descritos, aquí, no se presentan cuellos de botella.

## 3. Antecedentes

En la literatura se ha destacado la Simulación de Eventos Discretos como herramienta para la mejora de la eficiencia de los procesos industriales, especialmente de los procesos de manufactura. Por ejemplo, Piccini et al. (2018) empleó DES para reconfigurar una planta de fabricación, respaldando con este paradigma de modelación los procesos de toma de decisiones. En consecuencia, en este trabajo se ha realizado un caso de estudio complejo en una empresa italiana con el objetivo de evaluar la internalización de una fase de producción y, al mismo tiempo, identificar un algoritmo de programación que minimice el tiempo total del ciclo.

Seguidamente, se encontró después de aplicar el ciclo de modelación, que la DES puede ayudar a las industrias a:

- Estudiar sus plantas de producción
- Verificar su logística y distribución antes de realizar cambios en la planta
- Evitar detener producción sin la certeza de que la elección mejoraría el proceso.

En lo que refiere a resultados concretos para el caso de estudio desarrollado, Piccinini pudo:

- Determinar las limitaciones de la planta industrial: Esto es tiempo de operación máximo de la planta, número de configuraciones máximas que las máquinas pueden tener.
- Turnos de trabajo
- Planificación de la producción de insumos
- Actualización de las máquinas

Por otro lado, el estudio llevado a cabo por Cunha y Mesquita (1995) para detallar los aportes de la DES a las industrias manufactureras muestran que el uso de esta técnica permite potenciar la competitividad de los procesos de manufactura porque, teniendo en cuenta las diversas funciones que se pueden identificar dentro de un sistema la DES las categoriza permitiendo una mejor discretización de la realidad. De igual forma, como técnica, la simulación de eventos discretos se ha utilizado con más frecuencia para diferentes tipos de sistemas de fabricación. Si se elige adecuadamente, el sistema de simulación puede abordar casi todos los ejercicios en una empresa de fabricación. Sin embargo, su uso requiere una comprensión profunda del sistema de fabricación, junto con las capacidades y el funcionamiento del sistema de simulación.

Finalmente, algunos de los resultados a los que Cunha y Mesquita llegaron fueron:

- Planificación de horarios/cronogramas de producción.
- Minimizar los efectos de las restricciones del sistema.
- Proporcionar conocimiento sobre el rendimiento del sistema de fabricación cuando se requieren planes de proceso alternativos debido al comportamiento de la planta.
- Cuantificar la competitividad de la empresa puede incrementarse a través de las mejoras y flexibilidad obtenidas a partir de la redistribución del sistema.

## **4. Metodología**

### **4.1. Datos del modelo**

#### **4.1.1. Fuente de datos**

La fuente de los datos fue exclusivamente la empresa. Para el caso del tiempo entre pedidos y tiempo en el sistema, los datos caen en la categoría de disponibilidad tipo A, esto es, disponibles. Sin embargo, los datos de tiempo entre pedidos no se encontraban en el formato correcto para el modelo de simulación, por lo que su disponibilidad fue degradada al tipo C: no disponibles, no obtenibles. Lo anterior se debe al tiempo limitado para la recolección de datos y, en particular, el formato adecuado de dicha recolección.

Para el caso de los procesos, los datos caen en la categoría B, esto es, no están disponibles pero se pueden obtener, por lo cual se realizó un proceso de medición que se detalla en la sección 4.1.2 a continuación.

#### **4.1.2. Obtención**

Para la obtención de los datos se realizó una salida de campo a la planta de producción de la empresa AR Los Restrepos S.A.S el día miércoles 22 de septiembre, dicho proceso se detalla a continuación.

Inicialmente se realizó un recorrido guiado de la planta de producción en acompañamiento del jefe de producción, en el cual:

- Se visitaron cada una de las máquinas y puestos de trabajos involucrados en el proceso de producción.
- A lo largo de cada respectiva visita, el jefe de producción fue detallando la lógica general del proceso de producción, así como particularidades de cada máquina, puesto y/o trabajador involucrado en cada proceso.
- Se resolvieron dudas que fueran surgiendo a lo largo del recorrido e incluso fue posible observar resultados de los procesos.
- En particular, el jefe de producción destacó la posibilidad de cuellos de botella en el proceso de producción, así como la hipótesis de cuál proceso estaba bajo sospecha.

Al finalizar el recorrido fue posible tener una idea clara del proceso de producción, así como la lógica subyacente de cada uno de los procesos involucrados con sus respectivas particularidades y requisitos para ser llevados a cabo. Después de esto, el jefe de producción avisó al personal de producción que se llevaría a cabo una recolección de datos *in situ* (por parte de los autores del presente artículo), en la cual cada uno realizaría sus actividades de forma cotidiana pero con la posibilidad de brindar soporte ante dudas o inquietudes por parte de los recolectores de datos.

Posteriormente, al considerar la nueva información obtenida de la dinámica del proceso de producción, las particularidades de los procesos y la hipótesis de la existencia de cuellos de botella, los recolectores de datos determinan definitivamente el propósito del modelo así como la dinámica del proceso de recolección de datos de los procesos relevantes para dicho propósito.

El proceso de recolección de los datos fue realizado manualmente a partir de las 11:00 hasta las 14:28 del mismo día por parte de cada uno de los 3 recolectores de datos. Por criterio estadístico, se determinó tomar muestras grandes (desde el punto de vista estadístico empírico en donde una muestra es grande cuando su tamaño es de 30 o más observaciones) de tamaño mínimo de 35 observaciones. El proceso se detalla a continuación.

- Cada uno de los recolectores de datos utilizaron sus teléfonos celulares para la medición del tiempo de inicio y fin de los procesos en formato HH:MM:SS. Cada medición fue guardada en formato escrito.
- Cada uno, de forma independiente y respetando el orden lógico del proceso de producción, seleccionaron un proceso y realizaron la medición de tiempos de este. Una vez finalizada la medición de dicho proceso se cambió a otro que no estuviera siendo medido.
- considerando el turno del almuerzo del personal de producción a las 13:30, se realizó un paro en el proceso de medición que luego se reanudó a las 14:12.

Después de finalizar el proceso de recolección de datos, los resultados de las muestras se consolidaron en formato digital en un único archivo de *Microsoft Excel v. 2102*.



### 4.1.3. Análisis de independencia y autocorrelación

Para determinar la independencia y autocorrelación de los datos, se procesaron con el plug-in *Stat::Fit* del software *Simul8* (v. 28) con el cual se generaron los diagramas de dispersión y autocorrelación para cada variable. Los resultados se muestran en la tabla 1 a continuación.

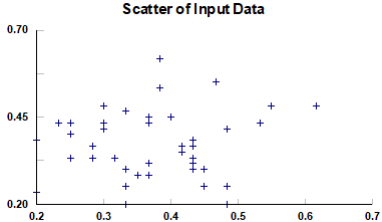
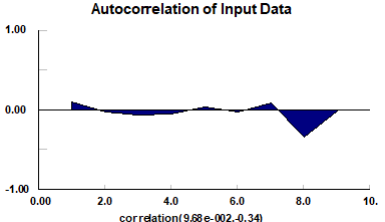
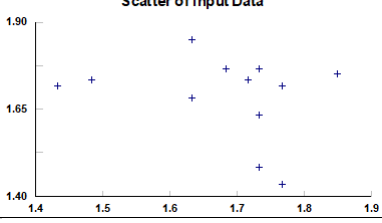
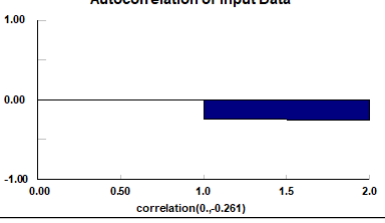
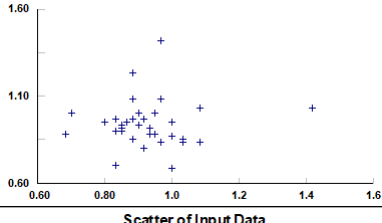
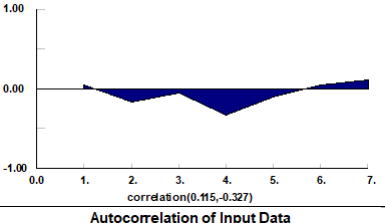
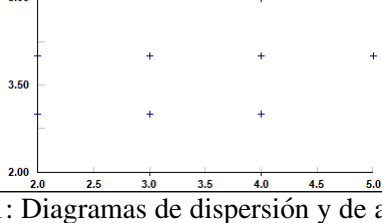
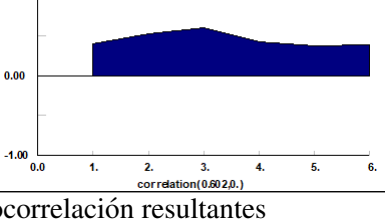
Variable	Dispersión	Autocorrelación
Tiempo entre pedidos	NA	NA
Corte de tubo	 <p>Scatter of Input Data</p>	 <p>Autocorrelation of Input Data</p> <p>correlation(9.68e-002,-0.34)</p>
Corte de eje	 <p>Scatter of Input Data</p>	 <p>Autocorrelation of Input Data</p> <p>correlation(0.,-0.261)</p>
Cajeado de tubo	 <p>Scatter of Input Data</p>	 <p>Autocorrelation of Input Data</p> <p>correlation(0.115,-0.327)</p>
Careado de eje	 <p>Scatter of Input Data</p>	 <p>Autocorrelation of Input Data</p> <p>correlation(0.602,0.)</p>

Tabla 1: Diagramas de dispersión y de autocorrelación resultantes para cada variable de entrada.

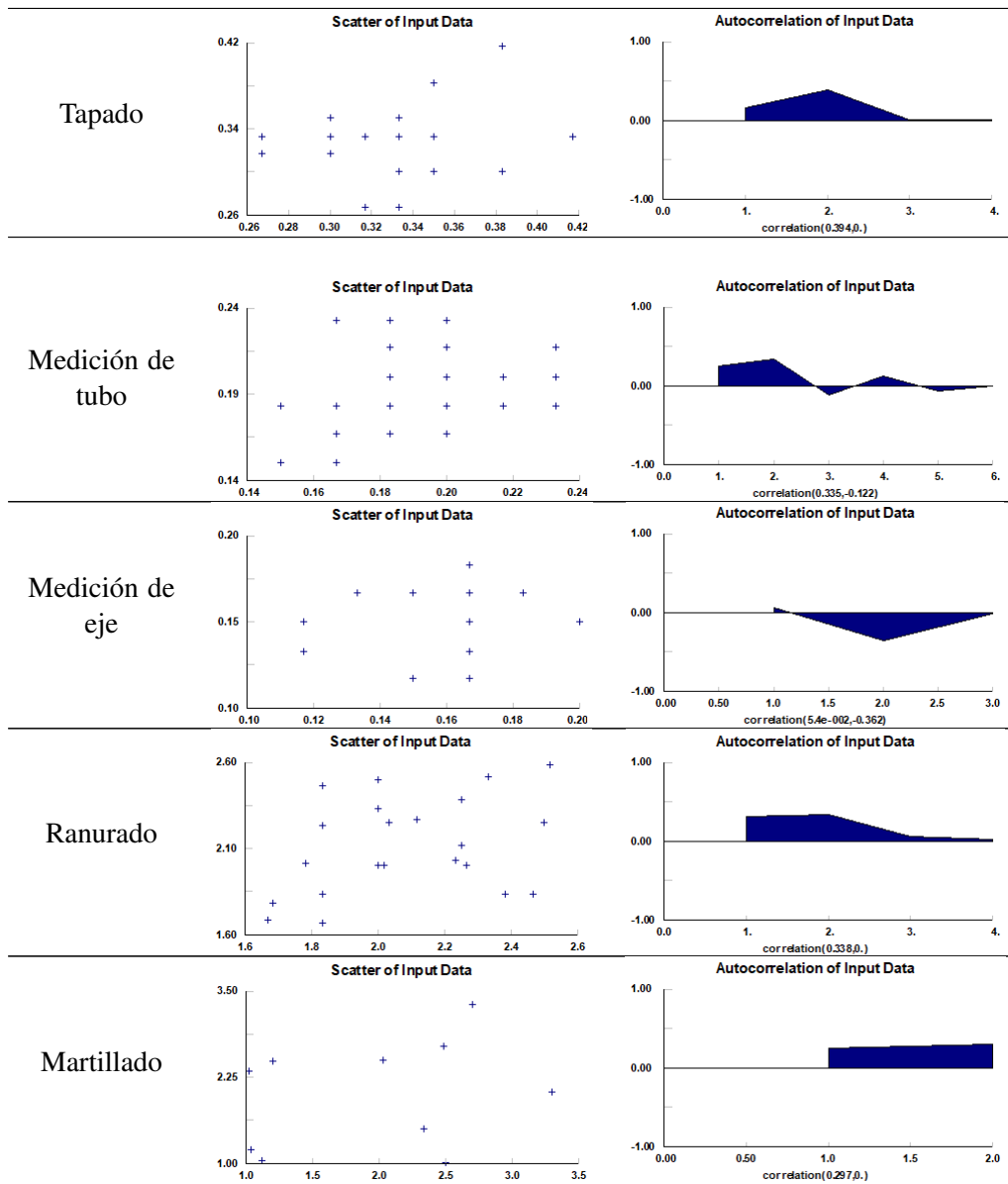


Tabla 1 continuada: Diagramas de dispersión y de autocorrelación resultantes para cada variable de entrada.

En general, al observar los diagramas de dispersión de cada una de las variables se concluye que los datos no muestran indicios de correlación, pues se encuentran dispersos de forma aleatoria y no forman un patrón aparente. Sin embargo, cabe resaltar el caso del Careado de eje en el que se realizó la medición de forma errónea en formato HH:MM y no HH:MM:SS como había sido determinado, lo cual resultó en la superposición de puntos repetidos al transformar el tiempo resultante a minutos. Por otra parte, al observar los diagramas de autocorrelación de cada una de las variables se concluye que los datos no muestran correlación al extender el periodo o número de rezagos, pues en general la correlación encontrada fue despreciable. Sin embargo, cabe resaltar el caso del Careado de eje que mostró mayor autocorrelación que las otras variables lo cual, a manera de hipótesis, se le atribuye al error de medición descrito anteriormente.

#### 4.1.4. Evaluación de homogeneidad

Para evaluar la homogeneidad de los datos se tuvieron en cuenta las siguientes características:

- Únicamente había una máquina para cada proceso.
- La medición de todos los procesos fue realizada durante un único pedido.
- La medición fue realizada durante un único día.
- Todas las mediciones se realizaron de forma continua (sin interrupciones) a excepción de un proceso que fue medido antes y después de un turno (el almuerzo), pero que en particular ese día tuvo un comportamiento lo suficientemente atípico como para que los datos perdieran su relevancia en el modelo.

Esto implica que, la característica resultante para evaluar homogeneidad de los datos es el tiempo de medición. Por esta razón, para cada variable se realizaron muestreos aleatorios de los datos recolectados con el fin de obtener 2 muestras por cada variable y así realizar pruebas de homogeneidad temporal para cada una de ellas. El tamaño de las muestras aleatorias se determinó con  $\lceil n_i \rceil / 2$ , donde  $n_i$  es el tamaño muestral de la variable  $i = 1, \dots, 8$ . La prueba seleccionada fue la de Kruskal-Wallis, que consta de las hipótesis:

$\mathcal{H}_0$  : Las muestras provienen de la misma población (son homogéneas).

$\mathcal{H}_1$  : Al menos una de las muestras presenta observaciones mayores a las demás.

Donde el estadístico de prueba  $T$  está definido como

$$T = \frac{12}{n(n+1)} \sum_{i=1}^k \frac{R_i^2}{n_i} - 3(n+1)$$

$$R_i := \sum_{j=1}^{n_i} R(x_{ij}), \forall i$$

Y se rechaza la hipótesis nula cuando  $T > \chi_{k-1, 1-\alpha}^2$ , donde  $k-1$  son los grados de libertad y  $\alpha$  es el nivel de significancia. La prueba fue realizada con  $R$  (4.0.5) en *Rstudio* (1.4.1103) y los resultados obtenidos se muestran en la tabla 2 a continuación.

<b>i</b>	<b>Variable</b>	<b>Valor p</b>
1	Corte tubo	0.538
2	Corte eje	0.58
3	Cajeado tubo	0.289
4	Careado eje	0.288
5	Tapado	0.669
6	Medición	0.119
7	Ranurado	0.5
8	Martillado	0.416

Tabla 2: Valores  $p$  de la prueba de Kruskal-Wallis.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se concluye que para cada variable no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula con un nivel de significancia del  $\alpha = 5\%$ . Lo que quiere decir que las muestras son homogéneas con respecto al tiempo, i.e., provienen de la misma población.

### 4.2. Ajuste de distribuciones teóricas

Después de evaluar la independencia, autocorrelación y homogeneidad de los datos, nuevamente se utilizó el software *Stat::Fit* para obtener los estadísticos descriptivos, el histograma, determinar la distribución teórica que mejor ajustara los datos, la estimación de sus respectivos parámetros y las pruebas de bondad de ajuste (Chi Cuadrado, Kolmogorov-Smirnov y Anderson-Darling). Este procedimiento fue realizado para cada una de las variables muestreadas. Para la selección de la distribución, se utilizó la opción *autofit* y se eligió la que tuviera mejor ranking (mejor criterio de información y no rechazable) y que fuera de fácil uso e implementación (por ejemplo la familia de distribuciones Pearson tipo I a VII fueron ignoradas).

Los resultados se muestran en la tabla 3 a continuación.

Variable (minutos)	Tamaño muestral	Distribución que mejor ajusta	Estadístico y valor p	Parámetros estimados	Estadísticas Descriptivas	Histograma
Tiempo entre pedidos	NA	Exponencial (teóricamente)	NA	$\lambda = 10.75$	NA	NA
Corte de tubo	45	Weibull	Chi Cuadrado VP = 0.817 Kolmogorov-Smirnov VP = 0.832 Anderson-Darling VP = 0.895	$\alpha = 4.218$ $\beta = 0.405$	descriptive statistics data points 45 minimum 0.2 maximum 0.617 mean 0.368444 median 0.367 mode 0.325 standard deviation 9.54845e-002 variance 9.1173e-003 coefficient of variation 25.9156 skewness 0.305075 kurtosis -0.331304	
Corte de eje	14	Weibull	Chi Cuadrado NA Kolmogorov-Smirnov VP = 0.461 Anderson-Darling VP = 0.597	$\alpha = 8.618$ $\beta = 0.730$	descriptive statistics data points 14 minimum 1.433 maximum 1.85 mean 1.688 median 1.725 mode 1.6415 standard deviation 0.11213 variance 1.25732e-002 coefficient of variation 6.6428 skewness -1.256 kurtosis 0.763728	
Cajeado de tubo	35	Beta	Chi Cuadrado VP = 0.246 Kolmogorov-Smirnov VP = 0.665 Anderson-Darling VP = 0.665	$p = 24.585$ $q = 13.172$	descriptive statistics data points 35 minimum 0.683 maximum 1.417 mean 0.936114 median 0.917 mode 0.925 standard deviation 0.133825 variance 1.79091e-002 coefficient of variation 14.2958 skewness 1.40913 kurtosis 3.9069	
Careado de eje	33	Triangular	Chi Cuadrado VP = 2.29e-2 Kolmogorov-Smirnov VP = 7.58e-2 Anderson-Darling VP = 9.72e-2	mín = 1 máx = 5.428 moda = 4.220	descriptive statistics data points 33 minimum 2. maximum 5. mean 3.63636 median 4. mode 4. standard deviation 0.85944 variance 0.738636 coefficient of variation 23.6346 skewness -0.13772 kurtosis -0.615887	

Tabla 3: Distribuciones teóricas que mejor se ajustan a cada una de las variables, pruebas de bondad de ajuste y parámetros.

Tapado	20	Gamma	<p>Chi Cuadrado VP = 0.112</p> <p>Kolmogorov-Smirnov VP = 0.598</p> <p>Anderson-Darling VP = 0.742</p>	$\alpha = 73.777$ $\beta = 4.450e-3$	<p>descriptive statistics</p> <p>data points 20</p> <p>minimum 0.267</p> <p>maximum 0.3283</p> <p>mean 0.333</p> <p>median 0.333</p> <p>mode 0.333</p> <p>standard deviation 3.92885e-002</p> <p>variance 1.54359e-003</p> <p>coefficient of variation 11.9673</p> <p>skewness 0.284037</p> <p>kurtosis -7.4569e-002</p>	
Medición de tubo	30	Lognormal	<p>Chi Cuadrado VP = 0.881</p> <p>Kolmogorov-Smirnov VP = 0.457</p> <p>Anderson-Darling VP = 0.521</p>	$\mu = -1.653$ $\sigma = 0.116$	<p>descriptive statistics</p> <p>data points 30</p> <p>minimum 0.15</p> <p>maximum 0.233</p> <p>mean 0.192733</p> <p>median 0.1915</p> <p>mode 0.183</p> <p>standard deviation 2.25877e-002</p> <p>variance 5.18202e-004</p> <p>coefficient of variation 11.7196</p> <p>skewness 7.55289e-002</p> <p>kurtosis -0.58924</p>	
Medición de eje	15	Weibull	<p>Chi Cuadrado VP = 7.43e-2</p> <p>Kolmogorov-Smirnov VP = 0.486</p> <p>Anderson-Darling VP = 0.7</p>	$\alpha = 7.778$ $\beta = 0.165$	<p>descriptive statistics</p> <p>data points 15</p> <p>minimum 0.117</p> <p>maximum 0.2</p> <p>mean 0.155667</p> <p>median 0.167</p> <p>mode 0.167</p> <p>standard deviation 2.32952e-002</p> <p>variance 5.42667e-004</p> <p>coefficient of variation 14.9648</p> <p>skewness -0.151053</p> <p>kurtosis -0.53257</p>	
Ranurado	23	Weibull	<p>Chi Cuadrado VP = 0.843</p> <p>Kolmogorov-Smirnov VP = 0.719</p> <p>Anderson-Darling VP = 0.801</p>	$\alpha = 4.548$ $\beta = 1.212$	<p>descriptive statistics</p> <p>data points 23</p> <p>minimum 1.667</p> <p>maximum 2.583</p> <p>mean 2.105</p> <p>median 2.033</p> <p>mode 1.667</p> <p>standard deviation 0.279198</p> <p>variance 7.79517e-002</p> <p>coefficient of variation 13.2636</p> <p>skewness 0.129045</p> <p>kurtosis -1.26255</p>	
Martillado	11	Chi Cuadrado	<p>Chi Cuadrado NA</p> <p>Kolmogorov-Smirnov VP = 0.833</p> <p>Anderson-Darling VP = 0.795</p>	$v = 1.193$	<p>descriptive statistics</p> <p>data points 11</p> <p>minimum 1.017</p> <p>maximum 3.3</p> <p>mean 1.92873</p> <p>median 2.033</p> <p>mode 2.1585</p> <p>standard deviation 0.793124</p> <p>variance 0.629046</p> <p>coefficient of variation 41.1216</p> <p>skewness 0.241078</p> <p>kurtosis -1.49925</p>	

Tabla 3 continuada: Distribuciones teóricas que mejor se ajustan a cada una de las variables, estimación de parámetros y pruebas de bondad de ajuste.

En general, fue posible ajustar distribuciones teóricas para cada una de las variables medidas y concluir que estadísticamente no hubo evidencia suficiente para rechazar la hipótesis de bondad de ajuste con un nivel de significancia de  $\alpha = 5\%$ , pues los valores P dieron mayores y en general de gran magnitud, lo que implica que efectivamente la bondad del ajuste fue buena en todos los casos. En particular, la variable de careado de eje fue problemática por el hecho del error de medición mencionado en la sección 4.1.3 que causó que fuera interpretada como una distribución discreta cuando en realidad su naturaleza es continua, y al ajustar distribuciones continuas la mejor fue una triangular, que si bien no mostró evidencia para rechazar la hipótesis nula de bondad en cada una de las pruebas, sí resultó con valores P muy pequeños en

comparación a lo estadísticamente deseable y al resto de variables. Por otra parte, la variable de martillado resultó en una distribución Chi Cuadrado, para la cual por el tamaño de muestra tan pequeño no fue posible realizar la prueba de bondad de ajuste Chi Cuadrado y, por lo tanto, se decidió omitir este proceso por este hecho y por el hecho de que el comportamiento del proceso fue atípico en la recolección de los datos (esto fue validado con expertos). Similarmente, el comportamiento de la variable medición de eje fue atípico el día de la recolección, por lo cual también fue omitida y se conservó el proceso de medición de tubo como el proceso representativo del proceso general de medición. En cuanto a la variable de tiempo entre pedidos, debido al problema mencionado en la sección 4.1.1, se decidió representarlos por medio de una distribución exponencial con tasa  $\lambda = 10.75$ , pues de acuerdo con Law et al. (2000) es posible aplicarla en tiempos entre llegadas de clientes, que en nuestro caso son pedidos, a un sistema que ocurre a una tasa constante. Adicionalmente, desde un contexto de procesos estocásticos es razonable considerar que el comportamiento a largo plazo no depende de la distribución inicial ajustada sino únicamente de la tasa de llegada. Para estimar la tasa de llegada, se realizó una consulta a un experto de la planta de producción para determinar el promedio de pedidos  $\beta$ , que corresponde al estimador de máxima verosimilitud (MLE), que luego fue escalado a minutos y finalmente se calculó la estimación del parámetro tasa como  $\lambda = 1/\beta$ .

### 4.3. Implementación en plataforma de simulación

#### 4.3.1. Claridad

La implementación del modelo se realizó en el software *Simul8* donde se incorporaron las distribuciones de los procesos obtenidos en la sección 4.1 y, además, se añaden los recursos necesarios para las actividades. Las simulaciones se hacen con una semana de tiempo de simulación, con cada día laboral durando 8 horas, ya que estas son las horas laborales de los empleados en el área de producción, con unidad de tiempo en minutos y un turno de almuerzo cada día de 12:00 a 13:00.

#### 4.3.2. Presentación del modelo

El diagrama resultante de la implementación del modelo en *Simul8* se muestra a continuación.

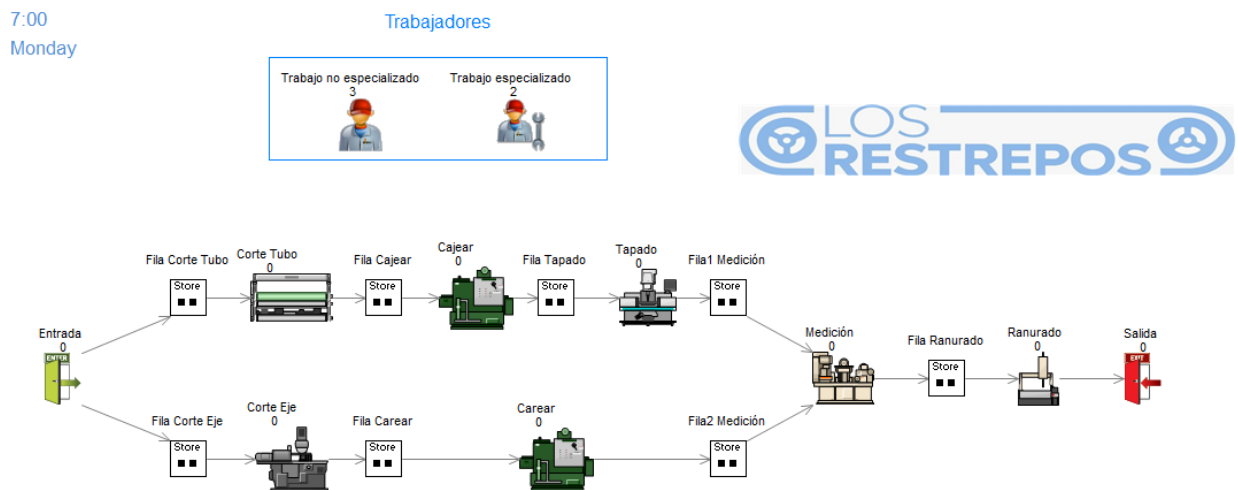


Figura 3: Diagrama del modelo del proceso de fabricación de rodillos mecánico en *Simul8*.

#### 4.3.3. Uso de técnicas avanzadas

Para el modelo se debe incluir los recursos de personal, ya que existen más máquinas que personal y hay unas máquinas las cuales solo pueden ser operadas por un personal especializado. Los procesos de

cajeado y careado usan el personal especializado, mientras que el resto del personal no especializado se requieren para realizar los demás procesos.

Se considera un turno de almuerzo para todo el personal, cada día y de una hora de duración, donde todos salen al mismo tiempo. En este horario las entradas siguen operando, por lo que se acumulan en las filas hasta que este turno termine.

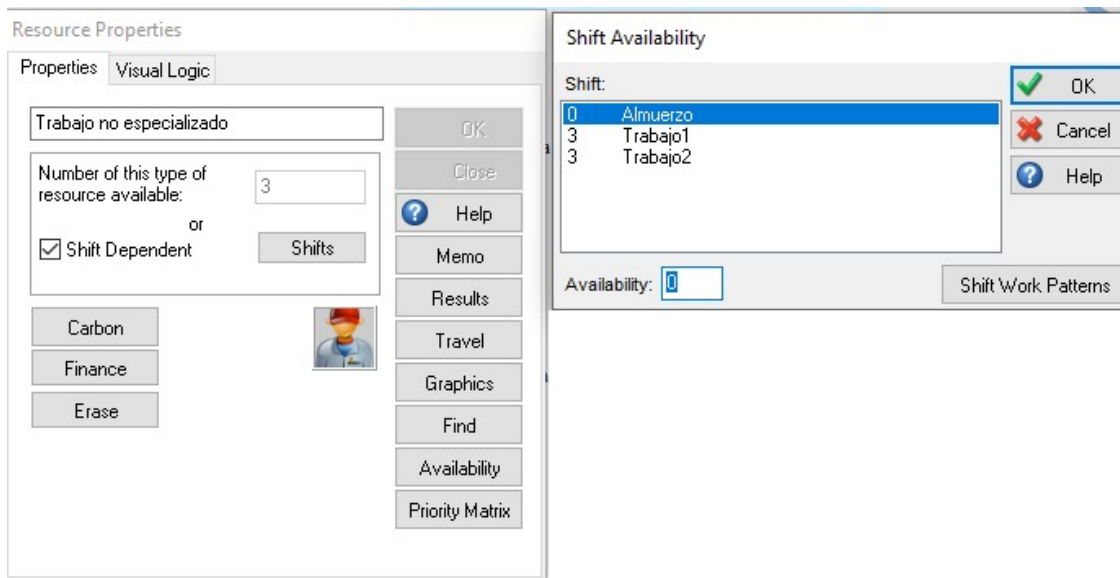


Figura 4: programación de los turnos de trabajo en *Simul8*.

En la figura anterior se puede observar que existen tres turnos, donde *Trabajo1* corresponde al horario de trabajo de 7 de la mañana a las 12 del medio día. *Almuerzo* corresponde al descanso de una hora de las 12 a la 1 de la tarde para todo el personal, y por último *Trabajo2* es desde la 1 de la tarde hasta terminar la jornada laboral.

## 5. Obtención de resultados

### 5.1. Naturaleza del modelo y de las salidas del modelo

De acuerdo con (Robinson 2014) la naturaleza del modelo es no terminante (*non-terminating*) pues no hay forma de que un experimento de simulación termine a excepción de que el usuario la interrumpa y, por otra parte, el tiempo de simulación es definido por el usuario. En cuanto a la naturaleza de las salidas del modelo, las salidas son de estado estable (*steady-state*) pues varían de acuerdo a distribuciones fijas, sin embargo, debido a los sesgos iniciales existe un periodo de comportamiento inicial transitorio (*transient*) previo al periodo restante de comportamiento de estado estable.

### 5.2. Sesgos iniciales

Para manejar los sesgos iniciales del modelo se corre el modelo bajo ciertas condiciones para identificar el periodo de calentamiento. En este caso, se corrió un trial de 5 corridas del modelo de simulación, recolectando cada 10 minutos del tiempo de simulación: el tiempo de simulación y el tiempo en el sistema. Posteriormente se calculó el promedio del tiempo en el sistema de las 5 corridas para cada tiempo de simulación. Finalmente, se calculó una media móvil con una ventana de 5 observaciones. Este método se conoce como el método de Welch, y el resultado se muestra en la figura 5 a continuación.

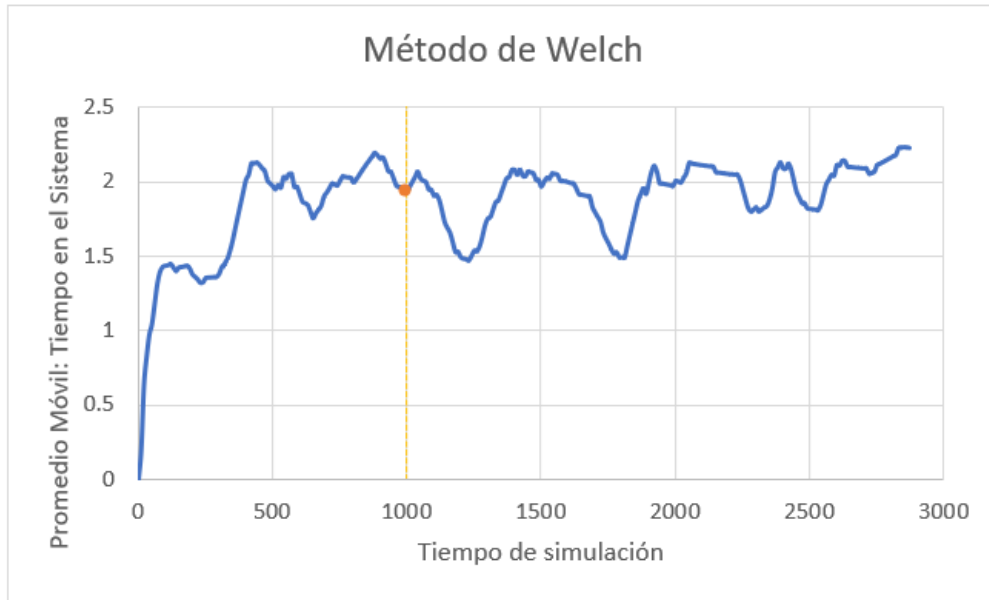


Figura 5: Implementación del método de Welch para determinar el periodo de calentamiento del modelo de simulación.

Gráficamente, se determina que el tiempo de calentamiento ocurre cuando el tiempo de simulación es de 1000. La justificación gráfica de esta elección es más fácil de observar al considerar un tiempo de simulación mayor, tal y como se muestra en la figura 6 a continuación

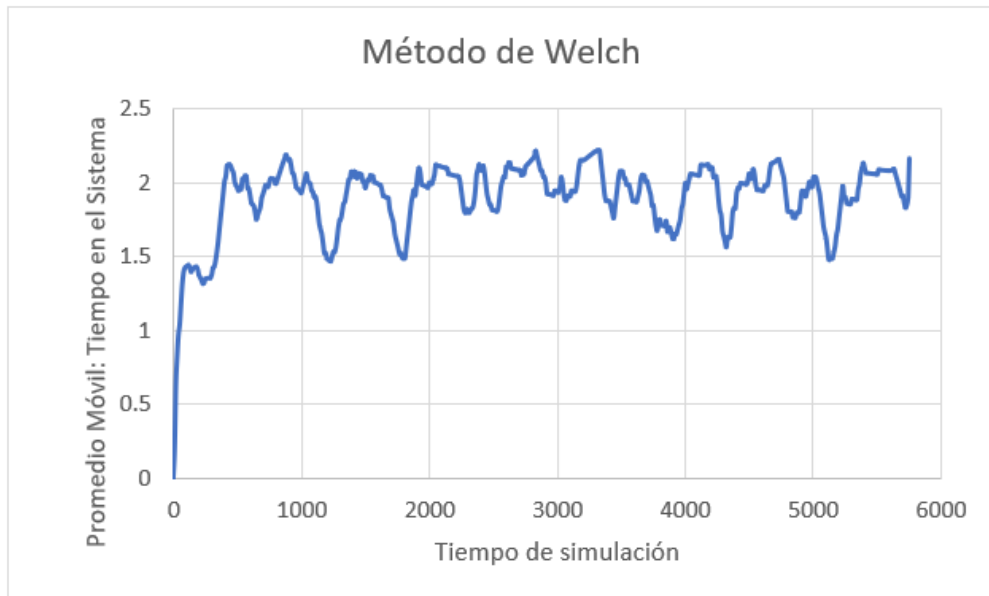


Figura 6: Implementación del método de Welch para determinar el periodo de calentamiento del modelo de simulación. El tiempo de simulación se extiende para que sea más claro el comportamiento.

Después de haber determinado el periodo de calentamiento, se agrega esta información al modelo implementado en *Simul8*.



### 5.3. Número de corridas

Para calcular el número de corridas necesarias para el modelo de simulación, se utilizó la herramienta que *Simul8* trae por defecto. El nivel de precisión seleccionado fue de 5% de la media. Los resultados se muestran en la tabla 4 a continuación.

Número de corridas	
Tiempo promedio	Corridas
Sistema	12
Fila Corte tubo	57
Fila Corte eje	61
Fila Cajear	294
Fila Carear	119
Fila Tapado	3042
Fila1 Medición	27
Fila2 Medición	1119
Fila Ranurado	969

Tabla 4: Número de corridas necesarias para cada variable del modelo.

La variable de Tiempo Promedio en Fila de Tapado tiene resultó en el mayor número de corridas necesarias con 3042. Esto implica que el número de corridas para cada *trial* es este.

### 5.4. Resultados de la simulación

Para testear la hipótesis del cuello de botella, se tomó el tiempo promedio en cada una de las filas de cada uno de los procesos. Para la recolección de resultados en *Simul8*:

- Se corrió el *trial* con 3042 corridas de acuerdo con los resultados obtenidos anteriormente.
- Se utilizó el administrador de resultados (*Results Manager*) para recolectar los tiempos.

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 5 a continuación.

Variable (minutos)	Lím. inf. 95 %	Promedio	Lím. sup. 95 %	Riesgo
Sistema	22.07	22.12	22.17	
Fila Corte tubo	3.93	3.96	3.98	

Tabla 5: Resultados de la simulación.

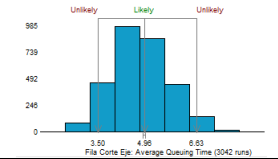
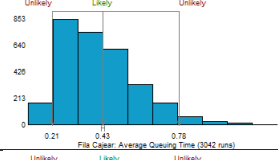
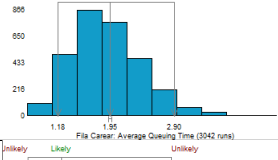
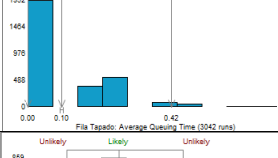
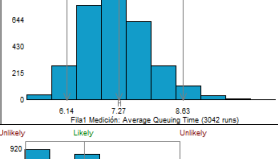
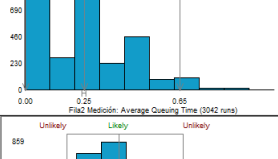
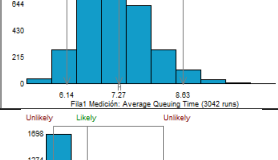
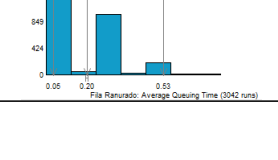
Fila Corte eje	4.93	4.96	5.00	
Fila Cajear	0.43	0.43	0.44	
Fila Carear	1.94	1.95	1.97	
Fila Tapado	0.09	0.10	0.10	
Fila1 Medición	7.24	7.27	7.29	
Fila2 Medición	0.24	0.25	0.26	
Fila Medición*	7.24	7.27	7.29	
Fila Ranurado	0.20	0.20	0.21	

Tabla 5 continuada: Resultados de la simulación.

**Nota:**

El resultado del tiempo promedio en la Fila de Medición\* se obtuvo al seleccionar el mayor tiempo promedio entre la Fila1 de Medición y la Fila2 de Medición, es decir

$$\text{máx}\{\text{Fila1 Medición}, \text{Fila2 Medición}\} = \text{máx}\{7.27, 0.25\} = 7.27$$

Por lo que al seleccionarse el tiempo de la Fila1, se conserva tanto el intervalo del 95 % como el riesgo asociado.

## 6. Verificación y Validación

El sistema y sus procesos se validaron con varios métodos

### 6.1. Validación de el modelo conceptual

Para crear el modelo conceptual se hablo con los jefes de producción de la empresa y se pudo plantear el modelo conceptual acerca de la producción de rodillos. Las simplificaciones de igual manera se plantearon con los jefes de área de producción y se hablo con los empleados que desarrollan las actividades para verificar la simplificación de el sistema.

### 6.2. Validación de datos

Los datos obtenidos fueron en gran parte tomados directamente por nosotros los modeladores, por lo que se pudo verificar la toma de un dato verídico, y discutió con el trabajador si los tiempos de la labor eran los estándar, por esto mismo el proceso de Martillado no se incluyo en la simulación, puesto que se presento un anomalía, la otra parte de los datos, en especifico el tiempo entre llegadas, fue proporcionado por la empresa, y a estos se les hicieron unos ajustes para que fueran congruentes con el modelo y las simulaciones.

### 6.3. Validación caja blanca

Posterior a la toma de datos y obtener sus distribuciones de probabilidad, se verifico con los jefes de área por los tiempos promedio de cada actividad, de los cuales todos pasaron la prueba menos el careado de el eje, ya que según los expertos este proceso es mas veloz en promedio, el error en este proceso puede ser debido a la escala de tiempo con la que se tomaron los datos, ya que no incluía segundos puede tener un error de a lo sumo un minuto.

### 6.4. Validación caja negra

Los datos reales se obtuvieron durante la toma de datos en la empresa, y se tomo que  $\bar{X}_R = 14$  y su desviación estándar  $S_R = 1$

$$\bar{X}_S - \bar{X}_R \pm t_{2n-2, \alpha/2} \sqrt{\frac{S_S^2 + S_R^2}{n}}$$

Mientras que los datos de la simulación son  $\bar{X}_S = 14,32$  y  $S_S = 1,35$ , si sustituimos ambos valores reales y lo de simulación en ecuación anterior obtenemos:

$$14,32 - 14 \pm 2,0017 \sqrt{\frac{1,35^2 + 1^2}{30}}$$

lo que da como resultados para el limite inferior de el intervalo -0.293986936 y para el limite superior 0.933986936, lo que significa que no hay diferencia evidente entre los dos modelos, por lo que el modelo representa el sistema real con suficiente fidelidad.

## 7. Análisis de sensibilidad y experimentación

### 7.1. Análisis de sensibilidad

En la tabla 6 se muestra la sensibilidad de los procesos sobre el tiempo promedio en el sistema y el tiempo promedio en la fila de cada uno de los procesos, esta sensibilidad se crea a partir de cambiar la media de la distribución en un 10%, para ver el impacto en cada una de las variables de el sistema.

Además, se puede observar la gran sensibilidad que tienen los procesos de careado, corte de eje y ranurado sobre el tiempo promedio en el sistema, principalmente la sensibilidad de el proceso de careado

	Sistema	F. Cajear	F. Carear	F. Corte Eje	F. Corte Tubo	F. Ranurado	F. Medición
Normal Trial	22,0703	0,4268	1,9351	4,9308	3,9322	0,1952	7,2380
	22,1215	0,4333	1,9542	4,9648	3,9585	0,2007	7,2650
	22,1726	0,4399	1,9732	4,9987	3,9849	0,2062	7,2920
Corte de tubo: -10%	22,1209	0,4542	1,9543	4,9646	3,9327	0,2010	7,3322
10%	22,1221	0,4110	1,9540	4,9648	3,9848	0,2005	7,1962
Sensitivity	0,0120	3,3141	0,0097	0,0038	0,9890	0,0460	2,5169
Beyond confidence	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000
Cajear: -10%	22,1213	0,3654	1,9530	4,9659	3,9586	0,2007	7,4624
10%	22,1213	0,5055	1,9542	4,9647	3,9584	0,2006	7,0606
Sensitivity	0,0001	10,7537	0,0328	0,0172	0,0052	0,0109	7,4363
Beyond confidence	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000
Tapado: -10%	22,1212	0,4336	1,9545	4,9644	3,9581	0,2007	7,3013
10%	22,1219	0,4330	1,9539	4,9651	3,9589	0,2007	7,2276
Sensitivity	0,0068	0,0440	0,0152	0,0115	0,0151	0,0059	1,3630
Beyond confidence	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000
Corte Eje: -10%	21,8728	0,4335	2,1196	4,7863	3,9583	0,2001	7,0177
10%	22,3743	0,4335	1,7714	5,1596	3,9584	0,1996	7,5185
Sensitivity	49,0237	0,0009	9,1320	5,4994	0,0029	0,0384	9,2703
Beyond confidence	1,0000	0,0000	1,0000	1,0000	0,0000	0,0000	1,0000
Careado: -10%	21,2375	0,4333	1,4199	4,9648	3,9585	0,2527	6,3304
10%	23,1160	0,4334	2,5776	4,9645	3,9584	0,1723	8,2854
Sensitivity	18,3613	0,0043	30,3565	0,0040	0,0031	7,2715	36,1851
Beyond confidence	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000	1,0000	1,0000
Medicion: -10%	22,1215	0,4333	1,9542	4,9648	3,9585	0,2007	7,2650
10%	22,1215	0,4333	1,9542	4,9648	3,9585	0,2007	7,2650
Sensitivity	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Beyond confidence	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Ranurado: -10%	21,7681	0,4338	1,9544	4,9644	3,9580	0,1592	7,2645
10%	22,5086	0,4329	1,9538	4,9651	3,9590	0,2734	7,2656
Sensitivity	7,2374	0,0732	0,0175	0,0095	0,0201	10,3279	0,0197
Beyond confidence	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000	0,0000

Tabla 6: Análisis de sensibilidad sobre los tiempos promedios

afecta en gran medida los procesos posteriores a este, por lo que se este proceso controla en gran medida el funcionamiento de el sistema.

## 7.2. Diseño de experimentos

### 7.2.1. Diseño experimentos de acuerdo con el objetivo del estudio

En esta sección se abordará un diseño de experimentos del tipo  $2^k$  con  $k = 3$  siendo  $k$  el número de factores o parámetros de experimentación a evaluar mediante simulación, esto es:

- Factor 1: Trabajador especializado (TE).
- Factor 2: Trabajador no especializado (TNE).
- Factor 3: Número de máquinas de careado (MC).

Hay que decir que, dichos factores se eligen ya que se quiere disminuir el tiempo en la fila de medición que es donde se sospecha mayoritariamente la existencia de botella. También, se sabe que, los factores críticos en dicha fila es el número de trabajadores especializados y el número de máquinas de careado. Adicionalmente, considerando que se desea conocer el tiempo total en el sistema para identificar el proceso con mayor promedio en cola y proponer alternativas para dar una solución a los cuyos de botella, se tienen en cuenta igualmente, a los trabajadores no especializados que constituyen la mayoría de empleados que ejecutan acciones en el proceso de fabricación de rodillos mecánicos.

Finalmente, en la tabla 7 se presentan los máximos y los mínimos para cada parámetro:

Parámetros	-	+
TE	1	3
TNE	2	3
MC	1	2

Tabla 7: Parámetros  $2^k$ .

### 7.2.2. Implementación de los experimentos

Considerando lo postulado en el numeral anterior, se procede a realizar las combinaciones derivadas del experimento  $2^k$  con  $k = 3 \rightarrow 8$ . De ahí que, las mismas se presenten en la tabla 7 e indiquen según lo detallado en la tabla 8 la variación de los parámetros propios del experimento.

Casos	TE	TNE	MC
1	-	-	-
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	-
5	-	-	+
6	+	-	+
7	-	+	+
8	+	+	+

Tabla 8: Combinaciones posibles para el experimento  $2^k$ .

Finalmente, implementando la configuración de casos detallada en *Simul8*, se obtiene para las variables de interés (Tiempo de espera en la Fila de Medición 1 y Tiempo promedio en el sistema) lo postulado en la tabla 9:

Casos	TE	TNE	MC	Tiempo en el sistema			Fila1 Medicion		
				Li	Promedio	Ls	Li	Promedio	Ls
1	-	-	-	24,7	24,78	24,9	5,7	5,72	5,8
2	+	-	-	22,3	22,38	22,5	7,2	7,21	7,3
3	-	+	-	24,5	24,58	24,7	5,7	5,75	5,8
4	+	+	-	22	22,11	22,2	7,2	7,26	7,3
5	-	-	+	24,6	24,68	24,8	4,5	4,52	4,6
6	+	-	+	21,4	21,47	21,6	5,5	5,53	5,6
7	-	+	+	24,6	24,66	24,9	4,5	4,54	4,6
8	+	+	+	21	21,03	21,1	5,4	5,43	5,5

Tabla 9: Resultados de implementación.

### 7.2.3. Análisis estadísticos

A continuación, en la tabla 10. se presentan los efectos para cada caso de cada variable. En concreto, la tabla 10. los presenta para la variable: Tiempo promedio del sistema.

Tiempo promedio del sistema			
Efectos	$e_1$	$e_2$	$e_3$
Resultado	-2,9275	-0,2325	-0,5025

Tabla 10: Efectos: Tiempo promedio del sistema.

En último lugar, se observa en la tabla 11 los efectos para la variable: Fila Medición 1.

Fila1 Medicion			
Efectos	$e_1$	$e_2$	$e_3$
Resultado	1,225	0	-1,48

Tabla 11: Efectos: Fila Medición 1.

#### 7.2.4. Alternativas de solución

Considerando los resultados de experimentación y al observar los efectos resultantes que se muestran en la tabla 11, con el objetivo de mejorar los cuellos de botella nos enfocamos únicamente en el tiempo en la fila 1 de medición, que es donde está presente el cuello de botella, y no tiempo en el sistema. Luego, interpretándolo según los efectos, concretamente el  $e_3$ , se tiene un valor negativo que indica la existencia de una relación inversamente proporcional, entre mayor numero de máquinas de careado disminuye el tiempo en fila.

Finalmente, a los factores 1 y 2, se tiene que, la relación de la variable Fila 1 Medición con el número de trabajadores especializados es directamente proporcional, es decir, al aumentar el número de trabajadores especializados aumenta el tiempo en fila y es posible que ello traiga consigo un cuello de botella en subprocesos posteriores. En seguida, para el factor 2 o número de empleados no especializados no existe ningún impacto si se aumenta o se disminuye.

### 8. Conclusiones y recomendaciones

#### 8.1. Principales hallazgos

Uno de los principales hallazgos de la investigación fue comprobar la hipótesis de la existencia de cuellos de botella. Se observa en la sección 5.4 que el tiempo promedio obtenido en la fila 1 de medición fue el mayor, sugiriendo la existencia del cuello de botella en el proceso de Medición, logrando así simular e identificar el proceso con mayor promedio en cola, i.e., el primer objetivo. Posteriormente, en la sección 6 se identificó que el proceso de Careado de eje fue el más sensible, lo cual influyó en la sección 7.2 en el diseño de experimento, pues fue el único factor variable con respecto a las máquinas y/o procesos. De acuerdo con las alternativas de solución descritas en la sección 7.2.4, utilizar 1 máquina adicional en el proceso de Careado de eje, implica solucionar el problema del cuello de botella, pues genera una disminución del 20.97% del tiempo promedio en la fila 1 de medición, logrando así el segundo objetivo.

La importancia de estos hallazgos principalmente se le atribuye a la relevancia para la empresa, pues por una parte comprobar la hipótesis de la presencia de cuellos de botella valida la sospecha del jefe de producción contrarrestar el efecto del cuello de botella identificado, implica como mínimo información para la toma de decisiones en el proceso de producción.

#### 8.2. Implicaciones de implementación y Limitaciones

Si el gerente de la empresa implementa este modelo podría entre otras cosas, validar que el cuello de botella existe en el subproceso de medición, pero que esto se debe al tiempo en la primera fila de dicho subproceso. Igualmente, al implementar este modelo el gerente no lograría visualizar la eficiencia de todo el proceso de fabricación de rodillos mecánicos debido a las simplificaciones realizadas. Hay que decir que, si bien existen supuestos y simplificaciones que discretizan considerablemente la realidad, se piensa que al integrar estas piezas más cercanas a la realidad no debería de alternar mucho el resultado de cuello de botella obtenido. Por último, en un aspecto más amplio se puede decir que este modelo tiene el propósito de entender el sistema de producción y con ello dar cuenta de cuellos de botella de manera cuantificada pero con cierto sesgo debido también a la ventana de tiempo de simulación escogida.

### 8.3. Recomendaciones

Con las limitaciones anteriores, y los experimentos realizados en la sección 7.2, se recomienda aumentar el número de máquinas de careado para así disminuir el tiempo promedio en el sistema al igual que el tiempo promedio en la fila de medición que fue el cuello de botella encontrado. Para continuar con el modelo y aumentar su nivel de confianza, se considera que se deben a volver a tomar los datos para la maquina de careado y aumentar la cantidad de datos para cada uno de los procesos para así poder definir de una manera mas exacta, las distribuciones de la sección 4.1.2.

Se propone también implementar los cambios recomendados y volver a tomar los datos para así obtener las nuevas distribuciones por cada máquina incluyendo la nueva, para ver el impacto que genera el añadir una máquina de careado más.

### Referencias

- Borshchev, A., and A. Filippov. 2004. "From system dynamics and discrete event to practical agent based modeling: reasons, techniques, tools". In *Proceedings of the 22nd international conference of the system dynamics society*, Volume 22, 25–29. Citeseer.
- Cunha, P., and R. Mesquita. 1995. "Using Discrete Event Simulation for the Improvement of a Traditional Mass Production System". In *International Conference on Computer Applications in Production and Engineering*, 469–478. Springer.
- Law, A. M., W. D. Kelton, and W. D. Kelton. 2000. *Simulation modeling and analysis*, Volume 3. McGraw-Hill New York.
- Piccinini, A., F. Previdi, C. Cimini, R. Pinto, and F. Pirola. 2018. "Discrete event simulation for the reconfiguration of a flexible manufacturing plant". *IFAC-PapersOnLine* 51 (11): 465–470.
- Robinson, S. 2014. *Simulation: the practice of model development and use*. Bloomsbury Publishing.