

TP Final - Grupo 19

CONSULTORÍA PARA EMPRESA DE SEMILLAS

11.87 - Investigación de operaciones 2 - Comisión A

Instituto Tecnológico de Buenos Aires

Tutor

Matias Tahta Dadourian

Grupo 19

Paula González - 60784 - paulgonzalez@itba.edu.ar

Santiago Trezza - 59260 - strezza@itba.edu.ar

Matias Giaimo - 61460 - mgiaimo@itba.edu.ar

Tomás Vyhňak - 61182 - tvyhñak@itba.edu.ar

Fecha de entrega: 23/07/2024

Resumen

Este trabajo se centra en la optimización de un proceso industrial mediante el uso de modelos de simulación y análisis estadísticos. El objetivo principal es identificar mejoras en el funcionamiento de los clasificadores y otros procesos de la planta para incrementar la productividad.

En la Introducción y Objetivo, se presentan los detalles del flujo de proceso y se establecen los objetivos del estudio. Luego, en el Modelo Conceptual, se definen los supuestos, las variables de decisión, referencia y estado, así como las entidades y recursos involucrados. También se describen las actividades y se incluye un diagrama IDEF0, junto con las lógicas de decisión y el plan de análisis.

El Modelo de Datos y Cuantificación aborda la descripción de las variables, su relación e influencia, y los diagramas correspondientes. Posteriormente, se detalla la implementación de un Simulador en Anylogic, cubriendo los bloques del modelo, la creación de bases de datos, el funcionamiento del modelo y las funcionalidades adicionales.

En la sección de Resultados de la Simulación, se realiza un análisis exhaustivo de los resultados obtenidos, incluyendo pruebas de estrés, gráficos de variables de referencia, y una comparación con análisis previos. La Experimentación describe el procedimiento seguido y los resultados obtenidos de los experimentos realizados.

Finalmente, se discuten las Dificultades, Debugging y Errores en la Experimentación, y se presentan las Conclusiones y Propuestas de Mejora. Tras un análisis inicial, se determinó que incrementar la velocidad de los clasificadores y ajustar el peso mínimo de los pedidos mejora significativamente la productividad de la planta. Sin embargo, se identificaron problemas en la utilización desbalanceada de los procesos de la planta. Se proponen dos alternativas de mejora: aumentar la capacidad de los clasificadores o reducir las capacidades de los procesos subutilizados y reinvertir en los clasificadores. La decisión final dependerá de las prioridades y costos que el cliente esté dispuesto a asumir.

Palabras clave

Producción de semillas, Simulación, AnyLogic, Optimización del proceso, Experimentos.

Abstract

This work focuses on the optimization of an industrial process through the use of simulation models and statistical analysis. The main objective is to identify improvements in the operation of classifiers and other plant processes to increase productivity.

In the Introduction and Objective, the details of the process flow are presented, and the objectives of the study are established. Then, in the Conceptual Model, the assumptions, decision variables, reference and state variables, as well as the entities and resources involved are defined. Activities are also described, and an IDEF0 diagram is included, along with decision logics and the analysis plan.

The Data Model and Quantification addresses the description of variables, their relationship and influence, and the corresponding diagrams. Subsequently, the implementation of a Simulator in Anylogic is detailed, covering the model blocks, the creation of databases, the functioning of the model, and additional functionalities.

In the Simulation Results section, an exhaustive analysis of the obtained results is carried out, including stress tests, reference variable graphs, and a comparison with previous analyses. The Experimentation describes the procedure followed and the results obtained from the experiments conducted.

Finally, the Difficulties, Debugging, and Errors in the Experimentation are discussed, and the Conclusions and Improvement Proposals are presented. After an initial analysis, it was determined that increasing the speed of the classifiers and adjusting the minimum weight of the orders significantly improves the plant's productivity. However, problems were identified in the unbalanced utilization of the plant processes. Two improvement alternatives are proposed: increase the capacity of the classifiers or reduce the capacities of the underutilized processes and reinvest in the classifiers. The final decision will depend on the priorities and costs the client is willing to assume

Key words

Seed production, Simulation, AnyLogic, Process optimization, Experiments.

Índice

Resumen	2
Palabras clave	2
Abstract	3
Key words	3
1. Introducción y Objetivo	6
1.1. Detalles del Flujo de Proceso	6
2. Modelo Conceptual	8
2.1. Objetivo	8
2.2. Supuestos	9
2.3. Variables de Decisión, Referencia y Estado	9
2.3.1. Variables de decisión	9
2.3.2. Variables de referencia	10
2.3.3. Variables de estado	10
2.4. Entidades y Atributos	11
2.5. Recursos	11
2.6. Actividades y diagrama IDEF0	12
2.7. Lógicas de decisión	12
2.7. Eventos	13
2.8. Plan de análisis	14
2.9. Plan de cuadros	14
3. Modelo de datos y cuantificación	15
3.1. Tabla descriptiva de variables	15
3.2. Variables aleatorias	15
3.3. Diagramas de relación e influencia entre variables	15
4. Simulador	15
4.1. Bloques del modelo	15
4.2. Armado de bases de datos	16
4.3. Funcionamiento del modelo	16
4.4. Aleatoriedad	19
4.5. Cálculo y visualización de las variables de estado	19
4.6. Funcionalidades extras	19
5. Resultados de la simulación	20
5.1. Stress test	20
5.2. Gráficos de variables de referencia	20
5.3. Análisis a priori	20
5.4. Resultados de la simulación y comparación con análisis a priori	21
5.5. Tamaño de muestra	21
5.6. Análisis de resultados	22
6. Experimentación	23
6.1. Procedimiento de la experimentación	23
6.2. Resultados de la experimentación	24
7. Dificultades, debugging y errores en la experimentación	25
8. Conclusiones y Propuesta de mejora	25

9. Bibliografia	27
Anexo	28

1. Introducción y Objetivo

En el contexto de una empresa de fabricación de semillas de maíz, donde se aborda la recolección de una variedad diversa de semillas en el campo, su tratamiento preventivo contra plagas y hongos antes de la germinación, y la posterior entrega mediante camiones desde la planta de fabricación, se presenta un escenario complejo. Cada una de las 100 variedades recolectadas se clasifica en cuatro tamaños diferentes, y la empresa ofrece servicios adicionales de tratamiento y empaquetado en bolsa o caja, lo que añade una capa adicional de complejidad operativa.

Con el propósito de identificar y abordar los cuellos de botella en el sistema de producción, la empresa ha contratado a nuestro equipo de expertos en simulación. Nuestra tarea principal consiste en analizar los pasos del proceso, específicamente desde el almacenamiento a granel hasta las líneas de empaque, con el objetivo de sugerir mejoras operativas que optimicen la eficiencia y la productividad.

En aras de la simplicidad y para garantizar un enfoque claro y efectivo, se centrará exclusivamente en esta etapa del proceso de producción. El objetivo del análisis será el de encontrar la configuración de la planta que aumente la eficiencia de la misma, asegurando la producción de la mayor cantidad de toneladas de semillas posibles disminuyendo los tiempos muertos en cada proceso para, de esta manera, asegurar la entrega del mayor número posible de pedidos a tiempo.

1.1. Detalles del Flujo de Proceso

En esta sección, se presentarán los detalles del flujo del proceso del sitio de fabricación que opera las 24 horas de seis días de la semana, con un día de descanso. Para una mejor comprensión se nos brindó el siguiente diagrama de la *Figura A.1*.

Para comenzar, la empresa puede recibir una cantidad de semillas ilimitadas provenientes de los campos que se almacenan en una cantidad ilimitada de contenedores. Se puede lanzar una sola variedad de semilla de maíz por contenedor. Estas semillas se extraen por lotes y se transportan a las torres de la planta, donde el tiempo de transporte desde el almacenamiento hasta las torres es de diez minutos y una vez que una cantidad es sacada a un contenedor no puede ser devuelta.

La empresa cuenta con dos torres clasificadoras que separan las semillas según el criterio de los tamaños de las mismas. Ambas torres pueden funcionar al mismo tiempo y pueden clasificar el mismo tipo de semillas aunque no suele suceder muy frecuentemente. Las semillas que ingresan por la torre para ser clasificadas deben ser de un sólo tipo. Se clasifican por los cuatro tamaños que hay disponibles y los granos de semillas del almacenamiento a granel tienen la siguiente composición de tamaño: S1 20%, S2 30%, S3, 30%, S4 20%, es decir que de las semillas que metas en la torre, el 20% saldrían del tamaño 1. Las

clasificadores dentro de las torres tienen un peso máximo que pueden soportar que es de 381300 libras, es decir que si un lote de semillas a clasificar supera ese monto entonces se debe dividir el trabajo de clasificar entre ambas torres. El clasificador de ambas torres tiene una restricción máxima de capacidad que puede procesar de cada tamaño de semilla que se puede observar en la siguiente *Tabla A.1*.

Las semillas clasificadas atraviesan las tuberías designadas para cada tamaño y se almacenan en el contenedor de semillas clasificadas, que se encuentran divididos en cuatro sublotes, antes de que pueda ser tratada aguas abajo. Solo se llena un contenedor de un tamaño de semilla a la vez, y los contenedores de las mismas semillas clasificadas siempre se llenan de izquierda a derecha. Cada contenedor tiene una capacidad máxima en libras, cuando se llena un contenedor de un tamaño (empezando primero desde la izquierda), pasa a llenarse el siguiente. Si todos los contenedores de un tamaño se llenan, se procede a llenar el clasificador, si éste se llena se apaga el mismo.

Estos contenedores se pueden ver en la *Figura A.1* con distintos colores. La clasificación de tamaños se puede distinguir en la *Tabla A.2* al ver que los contenedores naranjas oscuros son los de tamaño 1, los de color celeste son los de tamaño 2, los de color crema son tamaño 3 y los de color verde oscuro son los de mayor tamaño. Por otro lado, los contenedores representados en color verde claro son “abiertos”, en donde se almacenan de cualquier tamaño de un tipo de semillas. Los contenedores se limpian una vez que finaliza el pedido de compra y al cambiar de variedad.

La semilla clasificada se pasa por una de las tres tratadoras que recubre las semillas con varios fungicidas y productos biológicos. Cada torre tiene un tratador que le corresponde, exclusivo para cada una y el tercer tratador se comparte entre las dos. Si se abren dos tratadores a una torre, estos deben ejecutar la misma variedad y tamaño de semilla aunque los tratamientos pueden ser diferentes. Solo un contenedor va llenando el tratador a la vez y se cuenta las semillas tardan tres minutos en transportar las semillas de los contenedores hasta los tratadores. Cada máquina tratadora tiene su respectivo tiempo de tratado que se puede visualizar en la siguiente *Tabla A.3*.

Los contenedores se limpian cuando cambia la variedad de semillas y cuando cambia el pedido de compra. Se pierde un pequeño porcentaje de semillas al enviarlas al tratador. Las semillas tratadas se envían a nuevos contenedores, con un máximo de capacidad de 59400 libras, que se separan por variedad, tamaño y tratamiento (no se pueden mezclar entre sí). En la siguiente *Tabla A.4* se muestra a qué contenedor se destinan las semillas según su tratado, lo cual también se puede ver en la *Figura A.1*.

En la *Tabla A.5* se observa el tiempo que se tarda en preparar una máquina tratadora para realizar otro tipo de tratamiento.

Llegando a la última parte del proceso de fabricación, una vez que las semillas fueron tratadas y llegan a los contenedores, es momento de que sean empaquetadas con bolsas o

cajas. Para ambas opciones hay una línea de empaque que pueden funcionar en simultáneo (si es que ambas líneas son llenadas por contenedores diferentes) y donde un contenedor tratado puede llenar una línea de empaque a la vez pero puede cambiar de línea si es necesario. El tiempo entre que las semillas salen de alguno de los ocho contenedores hasta que llegan al comienzo de las líneas de empaquetado es de 7.5 minutos. Es importante mencionar que el empaque es una operación por lotes que requiere configuraciones cuando la variedad, el tamaño de la semilla o el tratamiento cambian entre las ejecuciones. Los tiempos que tardan en empaquetar se distribuyen de manera uniforme y se pueden visualizar en la siguiente *Tabla A.6*.

Además, se proporcionó la información adicional de que el peso de las semillas en una bolsa es de 20 libras, mientras que el peso de las semillas en una caja es de 1000 libras.

Por último, se proporcionó información sobre los pedidos de los clientes que se pasan al planificador de fabricación siguiendo el siguiente formato de la *Tabla A.7*.

Una de las decisiones clave que el planificador necesita tomar es determinar la cantidad de semillas que necesita ser liberada para cumplir con todos los requerimientos de SKU dentro del pedido de compra. Para determinar esto, se debe tener en cuenta los porcentajes de cada tamaño de las semillas al igual que la pérdida de semillas en el transportador entre los contenedores de semillas clasificadas y los tratadores.

Una última aclaración es que si se libera menos de la cantidad que se demanda entonces el pedido no puede ser satisfecho, mientras que si se libera de más entonces el excedente pasa por el tratador sin aplicar tratamiento y se pierde (a menos que pueda aplicarse a otro pedido).

2. Modelo Conceptual

2.1. Objetivo

El objetivo principal será encontrar los principales puntos sobre los cuales se podrá mejorar el proceso de fabricación. Para eso es necesario que el modelo conceptual abarque todos los aspectos importantes para representar correctamente al proceso productivo. Una vez obtenido el mismo, se buscará mejorar el proceso productivo, principalmente aumentando las velocidades de producción de los procesos, para de esta manera aumentar la productividad general de la planta y la utilización de cada proceso.

Ante la falta de datos sobre costos de las máquinas, de mejoras, costos de la materia prima y precios de venta, la búsqueda se basará en encontrar el camino que debe ser seguido para mejorar. Encontrar todos los posibles puntos de mejora para que en un futuro, con los diferentes costes y beneficios de cada mejora, se pueda determinar cuál será el camino a seguir de la empresa.

2.2. Supuestos

Definir supuestos previos a la realización del modelo es esencial para establecer una base clara y transparente sobre el sistema de fabricación de semillas para poder construir un modelo, así como para controlar la incertidumbre y facilitar la interpretación de los resultados. A continuación se enlistan los supuestos:

- Debido a la forma en la que están ordenados los pedidos de los clientes, orden el cual agrupa los tipos de semillas, suponemos que es por la época de plantación, y que siempre será así. Consideramos que el orden que están dadas las órdenes es la mejor forma para producir para reducir los desperdicios en el proceso.
- Además se considera que se tienen todas las órdenes de producción antes de que empiece el proceso de fabricación y se ordenan las órdenes por tipo de semilla.
- Los pedidos realizados al silo se hacen una única vez por variedad de semilla pedida por el cliente.
- Los tratadores pueden funcionar en simultáneo.
- Las semillas de un pedido que ingresan por una torre tienen que ser de un solo tipo y pueden ingresar las semillas del siguiente pedido a la torre una vez que se haya desocupado la clasificadora.
- Se procesa una orden de pedido de semillas a la vez.
- Las clasificadoras son 100% idénticas.
- Para asegurar que la cantidad de semillas requeridas sea suficiente con un nivel de seguridad del 95%, se decide ordenar al almacén de granos un 4% adicional de semillas.

2.3. Variables de Decisión, Referencia y Estado

Es importante analizar las variables de decisión, estado y referencia al realizar un modelo conceptual para comprender cómo interactúan y afectan el sistema, identificar relaciones clave y posibles limitaciones, y proporcionar una base sólida para el diseño y la implementación de estrategias efectivas. La totalidad de las variables planteadas se pueden ver en la *Tabla A.8*.

2.3.1. Variables de decisión

Las variables de decisión son aquellas que nosotros podemos controlar o manipular realizando el modelo del proceso de fabricación, buscando optimizar un resultado específico. En este caso, el proceso de producción depende principalmente de las capacidades de sus componentes como las clasificadoras, tratadoras, empaquetadoras y todos los contenedores intermedios, además de la posibilidad de utilizar estos componentes en simultáneo y en qué manera.

Debido a esto, definimos las siguientes variables de decisión, es decir aquellos valores o lógicas a modificar para generar diferentes alternativas a analizar.

- Velocidad del Clasificador
- Peso mínimo de pedido para utilizar dos clasificadores
- Velocidad de Tratadores
- Velocidad de Transportador entre clasificador y tratadores
- Velocidad de Transportador entre tratadores y empaquetadoras
- Velocidad de empaquetadoras
- Peso mínimo de semillas para utilizar el segundo clasificador

A partir de estas variables, buscamos atacar las características que limitan el proceso, y así entender cuáles son las restricciones del sistema global y que mejoras traeran el mayor beneficio con el menor esfuerzo.

2.3.2. Variables de referencia

Las variables de referencia son aquellos valores que obtengo como resultado de la simulación, estos nos permitirán establecer la situación inicial del modelo y obtener datos sobre los cuales trabajar para luego mejorar el modelo. Las variables de referencia elegidas para poder entender mejor la performance de la empresa contratista son las siguientes.

- Nivel de utilización de cada componente de cada proceso [%]
- Productividad pedidos [Pedidos/Horas]
- Productividad cantidad [Toneladas/Horas]

El nivel de utilización de cada componente, consiste en medir el tiempo que verdaderamente estuvo trabajando cada uno, y compararlo al tiempo total de trabajo de la fábrica. Por último, las productividades, calculadas como los pedidos entregados sobre las horas totales trabajadas, o la cantidad total producida sobre las horas trabajadas.

2.3.3. Variables de estado

Estas variables buscan representar la situación del sistema productivo en cualquier momento dado. Sus valores se modifican constantemente, nos permiten monitorear el proceso, así como tomar decisiones sobre cuál es la mejor manera de proseguir durante el mismo. Las variables de estado son las que se ven a continuación.

- Número de órdenes en espera
- Número de órdenes terminadas
- Variedad de semilla siendo clasificado
- Peso en clasificador
- Variedad de semilla en cada contenedor clasificador

- Tamaño de semilla en cada contenedor clasificador
- Número de Contenedores de semillas clasificadas siendo utilizados
- Número de tratadores siendo utilizados
- Variedad de semilla en tratador
- Tamaño de semilla en tratador
- Tratamiento de semilla en tratador
- Tratamiento anterior realizado en tratador
- Contenedores de semillas tratadas siendo utilizados
- Variedad de semillas, tamaño y tratamiento en contenedor de semillas tratadas
- Peso en contenedor de semillas tratadas
- Líneas de empaquetado siendo utilizadas
- Variedad de semillas en cada línea de empaquetado
- Tratamiento de semillas en cada línea de empaquetado
- Tamaño de semillas en cada línea de empaquetado
- Tipo de empaquetado de las semillas en cada línea de empaquetado
- Porcentaje de pedido terminado

2.4. Entidades y Atributos

Sólo se cuenta con una sola entidad que es “Orden de producción”. Por parte de los atributos, se definen nueve que son el ID de la orden de compra, el ID de la orden de producción, el ID de la variedad, el ID del tamaño, el ID del tratamiento, ID del empaquetamiento, el peso de la orden de producción y la fecha y hora de entrada y salida. Éstas especificaciones se pueden observar en la *Tabla A.9*.

2.5. Recursos

Los recursos en un modelo conceptual son los elementos, activos o capacidades disponibles para llevar a cabo un proceso o lograr un objetivo específico. Definirlas permite una representación precisa y completa del sistema en el modelo. Los recursos de este caso son los que se enlistan a continuación.

- Torres de clasificación: En estas ingresan las semillas para ser clasificadas, existen dos torres de clasificación, cada una está compuesta por un clasificador y contenedores clasificados, a continuación se indicará sus características.
- Clasificadoras: Son las encargadas de separar las semillas en sus cuatro tamaños. En la planta existen dos torres. Las especificaciones de las mismas se encuentran en la *Tabla A.1*.
- Contenedores clasificadores: En ellos se almacenan las semillas que ya fueron clasificadas por los distintos tamaños. Como se mencionó previamente, existen cinco tipos de contenedores clasificadores, éstos se pueden visualizar con colores en la *Tabla A.2*.

- Tratadoras: Es la maquinaria que sirve para realizar tratamientos a las semillas. Se cuenta con tres, cuyas especificaciones se encuentran en la *Tabla A.3*.
- Las líneas que conectan los contenedores clasificadores con las tratadoras.
- Las líneas de empaquetado: éstas se dedican a empaquetar las semillas en cajas o bolsas y contienen las características que se ven en la *Tabla A.6*.

2.6. Actividades y diagrama IDEF0

Las actividades que involucran los procesos llevados a cabo en la planta son las que se simplifican a continuación.

1. Transporte de materia prima de silos de almacenamiento
2. Las semillas entran en una de las torres y se clasifican según sus tamaños.
 - a. Torre 1
 - b. Torre 2
3. Almacenamiento en contenedores clasificados por tamaños.
4. Transporte hacia Tratadoras:
 - a. Tratadora 1
 - b. Tratadora 2
 - c. Tratadora 3
5. Almacenamiento en contenedores tratados.
6. Empaquetado:
 - a. Línea de empaquetado 1
 - b. Línea de empaquetado 2

Se realizó un diagrama IDEF0 en distintos niveles para representar de manera estructurada y detallada las funciones de un sistema o proceso, mostrando las relaciones entre sus componentes y las interacciones con el entorno. Esto facilita la comprensión y análisis del proceso para un mejor modelado de simulación en Anylogic. En un nivel 0 del IDEF0 (véase *Figura A.2*) se ve una visión general del proceso de producción de las semillas, representado como una única actividad principal con sus entradas y salidas. En el nivel 1 del IDEF0 (véase *Figura A.3*) se detallan las principales subactividades del proceso que son clasificación, tratamiento y empaquetado de las semillas. En último lugar, en la *Figura A.4* se presenta el nivel 2 del IDEF0, que demuestra cómo se componen las subactividades.

2.7. Lógicas de decisión

Para dar una mejor visión sobre la descripción de la fabricación de las semillas, que fue detallada al comienzo del informe, se decidió explicar el flujo del proceso en la sección 1.1. Es por esto, que a continuación se procederá a explicar las tomas de decisiones que el modelo deberá realizar.

El proceso comienza cuando llega el pedido del cliente, el mismo es procesado y se envía una orden de producción a la fábrica. Aquí el departamento de producción decide la cantidad de semillas a pedir a los silos de almacenamiento. Teniendo en cuenta el 1% de pérdida en el transporte hacia los tratadores, la variabilidad de esta pérdida y los porcentajes de tamaño. Se decidió pedir teniendo en cuenta el tamaño de semilla requerido en mayor cantidad, con un margen del 1%¹. Una vez definido el peso a pedir de semillas, se debe analizar si es necesario usar las dos torres de clasificación, y en el caso de que no, hay que definir cual torre usar teniendo en cuenta la disponibilidad de contenedores clasificados en cada torre (ver lógica en *Figura A.5* del anexo).

Una vez comenzada la clasificación, se comienzan a llenar los contenedores, de a un tamaño por vez, los contenedores ya fueron asignados antes de comenzar el proceso pero cuando uno se llena, se debe cambiar automáticamente (ver lógica en *Figura A.6*). El siguiente paso es decidir que tratador utilizar (ver lógica en *Figura A.7*), teniendo en cuenta la disponibilidad o no del tratador exclusivo de cada torre, qué torre está usando, si es que está en uso la tratadora compartida. Además, una vez seleccionada la torre, antes de comenzar es necesario analizar si se debe hacer el setup del tratador (ver lógica en *Figura A.8*). Una vez depositadas las semillas tratadas, se debe elegir la línea de empaquetamiento que se utiliza (ver lógica en *Figura A.9*).

2.7. Eventos

Los eventos son aquellas ocurrencias que alteran el estado del sistema, entre eventos el sistema permanece inalterado. Para nuestro modelo conceptual definimos los que se encuentran a continuación.

- Ingreso de orden de producción
- Comienzo del transporte de silos hacia torres
- Comienzo de clasificación
- Fin clasificación
- Comienzo de transporte hacia tratamiento
- Fin de transporte hacia tratamiento
- Comienzo de tratamiento
- Cambio de contenedor de tratamiento
- Fin de tratamiento
- Comienzo de transporte hacia empaquetado
- Comienzo empaquetado
- Fin de transporte hacia empaquetado
- Cambio de línea de empaquetado
- Fin empaquetado

¹ En la simulación, se evaluará el valor de este margen para encontrar el que produzca el resultado más óptimo.

Los eventos son en su mayoría endógenos, menos el ingreso de orden de producción, a partir del cual comienza el proceso y tiene toda la información necesaria para que el proceso, mediante eventos endógenos a partir de la información ya provista, puede continuar y terminar el pedido

2.8. Plan de análisis

Definimos un plan de análisis, estableciendo un método de trabajo para poder orientar las variables de decisión ya definidas sistemáticamente para obtener la mejor solución al problema propuesto.

Primero analizaremos el plan actual, con las variables de decisión iniciales definidas como están indicadas en el planteo inicial de la empresa. Analizaremos los niveles de ocupación de cada componente.

Luego procederemos a modificar la velocidad de trabajo de los procesos con mayor nivel de ocupación, analizando cual es el cuello de botella actual y cuál será el siguiente al mejorar el primero. Por último evaluaremos todos los modelos para identificar cuál será el mejor.

Ante la falta de datos sobre costos y precios de venta, la búsqueda del mejor modelo se basará en la eficiencia de la planta. Priorizaremos un mayor volumen de ventas antes que una mayor cantidad de pedidos atendidos. Buscando una alta productividad de la cantidad y alto nivel de utilización de cada proceso, especialmente proceso que sea el cuello de botella, teniendo en cuenta un mínimo nivel de desperdicio.

2.9. Plan de cuadros

Definiremos el plan de cuadros, para establecer como analizaremos y compararemos las variables de referencia analíticamente. La simulación será corrida la cantidad de veces necesarias para obtener una muestra representativa de cada modelo. En base a estos resultados se realizarán los siguientes análisis.

- a. Para representar el nivel de servicio (P y Q), se realizará un boxplot doble con ambas variables, comparando los diferentes modelos. Se puede observar un ejemplo de éste en la *Figura A.10*.
- b. Luego se realizarán gráficos de dispersión para visualizar relación entre las siguientes variables: Nivel de servicio Q con el porcentaje de desperdicio (*Figura A.11*) y otro gráfico comparando el Nivel de utilización con la Productividad de la cantidad (*Figura A.12*).
- c. Por último, se hará un gráfico de densidad para representar y comparar ambos tipos de productividad. Se puede observar un ejemplo del mismo en la *Figura A.13*.

- d. Se evalúa el porcentaje del desperdicio de semillas en relación al margen sobre las órdenes de compra a requerir a los silos de semillas. Para eso, se realiza el gráfico de box plots que se vé en la *Figura A.14*.
- e. Se evalúa la productividad de los pedidos en relación al número de tratadores. Para eso, se realiza el gráfico de box plots que se vé en la *Figura A.15*.
- f. Se analiza la productividad en cantidad en relación a la cantidad de líneas de empaquetado para cada contenedor (véase *Figura A.16*).
- g. Se analiza cómo varía el nivel de utilización de cada componente en relación a la cantidad de contenedores de semillas clasificadas (véase *Figura A.17*).

3. Modelo de datos y cuantificación

3.1. Tabla descriptiva de variables

Continuando con el diseño de las simulaciones, se elaboró una tabla en la cual se describen las variables que se listaron en la sección 2.3. En la tabla descriptiva se detallan descripciones, rango de valores, unidades de medición y las correspondientes fórmulas de cálculo. Dicha tabla se encuentra en la *Tabla A.8*.

3.2. Variables aleatorias

Las variables aleatorias son un tipo de variable que le agregan estocacidad al modelo. La inclusión de esta forma de variables en el problema justifica el desarrollo y el uso de un modelo simulado que permita el análisis de una situación más compleja que un mero cálculo directo y certero. En la *Tabla A.10* ubicada en el anexo se muestran las variables aleatorias.

3.3. Diagramas de relación e influencia entre variables

Se define un diagrama de relaciones entre variables que permita comprender interacciones y causas dentro de un sistema. Ayuda a predecir resultados y proporciona una representación clara de cómo ciertos cambios en una variable pueden afectar a otras, lo que permite identificar posibilidades de mejora en el sistema modelado. El cuadro se visualiza en la *Figura A.18*.

4. Simulador

4.1. Bloques del modelo

Se realizó un simulador utilizando Anylogic con el fin de modelar el proceso de producción de las semillas de la empresa. Para simplificar y facilitar el armado del modelo se dividió el proceso en cuatro distintas etapas: la recepción de órdenes, la clasificación de semillas con su almacenamiento de las semillas en los contenedores clasificadores, el tratamiento de las

semillas con su el almacenamiento de las semillas tratadas en nuevos contenedores y el empaquetado de las semillas.

En cuanto a los bloques utilizados para el armado del simulador estos fueron: Source, Service, Queue, Sink, Select Output, Hold, Delay, Enter, Exit, Batch, Unbatch y Conveyor. Además se utilizaron Parámetros, Schedules, Resource Pools, eventos, variables y funciones.

4.2. Armado de bases de datos

Se encontró conveniente construir cuatro tablas de datos en Excel a partir de las órdenes de producción de los pedidos de los clientes (véase *Tabla A.7*) para utilizar en las distintas etapas del simulador.

La primera, llamada *weight* que se ve en la *Tabla A.11*, se creó para utilizar en la primera etapa del proceso para generar todas las órdenes con sus respectivos atributos. En ésta tabla, se agrupan las órdenes que provienen de un mismo cliente por tipo de semilla, con el fin de hacer los pedidos de forma más óptima a los silos al realizar un único pedido de semillas que permita satisfacer la totalidad de las órdenes que pertenecen a un mismo cliente. Al ver la *Tabla A.4*, se registra el número de orden, el tipo de semilla, la cantidad de órdenes agrupadas, el peso de las semillas a pedir a los silos, y la cantidad de tratamientos que van a recibir las semillas.

La segunda tabla llamada *treatment* (véase *Tabla A.12*), contiene los atributos de todas las órdenes de los diferentes clientes y es utilizada para establecer los parámetros de los agentes de las etapas de tratamiento de las semillas y empaquetamiento.

La tercera tabla llamada *codes* (véase *Tabla A.13*), contiene los atributos de las órdenes para poder empaquetarlas de forma adecuada.

Por último, se creó la siguiente *Tabla A.14* para demostrar un diccionario de los códigos que se utilizan en Anylogic para determinar las variedades de las semillas, el tipo de tratamiento y el tipo de packaging.

4.3. Funcionamiento del modelo

En la primera etapa de la recepción de las órdenes, se tienen los datos de todas las órdenes de antemano que entran en una fila de órdenes y una fila en donde entra la siguiente orden en procesarse.

Las órdenes se generan todas a partir de un *source* (de la *Tabla A.11* mencionada anteriormente) y se acumulan todas en un *queue*. Un *hold* permite el paso de una orden para que entre a producción y se cierra para que la próxima orden en la fila espere la finalización de la orden que está siendo procesada mientras que el otro *hold* se mantiene bloqueado hasta que la orden en producción es completada. Una vez finalizada la orden en producción se

produce un desbloqueo permitiendo que la orden en producción llegue a un *sink* representando la finalización de la orden que se encontraba en producción. Se crea una función llamada *OrdenenProd1* que determina que si el peso de las semillas de la orden supera las 381300 libras, que es el máximo de capacidad que puede recibir una torre, se divide el peso entre las dos torres equitativamente. El modelado en Anylogic se puede ver en la *Figura A.19*.

Para la etapa de clasificación y almacenamiento de las semillas (etapa dos del modelo), se genera la estructura visualizada en la *Figura A.20* para ambas torres. Como se puede ver, se comienza con un *source* que inicializa esta etapa de producción utilizando las órdenes como aparecen en la *Tabla A.12*. En este momento, la función *SetearPedido1* asigna los atributos del pedido actual que se está clasificando. Siguiendo un *service* llamado *Clasificador1* simula el tiempo que tarda el proceso, y el *selectOutput5* realiza la clasificación de las semillas siguiendo las siguientes proporciones: 20% del tamaño 1, 30% del tamaño 2, 30% del tamaño 3 y 20% del tamaño 4, y se envían a los contenedores que fueron creados para cada tamaño. En el planteo del problema, se menciona que se tienen varios contenedores para almacenar semillas clasificadas para los distintos tamaños, sin embargo, en nuestra simulación se decide modelar estos en uno solo para cada tamaño de semilla, sumando sus capacidades individuales. Esto se hace ya que se asume que se limpian todos los contenedores de todas formas cuando salen las semillas de ellos, por lo que tenerlos por separado no aporta beneficio alguno a la simulación. Además, se muestra que se agregan los tres contenedores abiertos que utiliza la empresa para almacenar el restante de semillas que no caben en sus respectivos contenedores. Éstos se ven en la *Figura A.20* como *BinOpT1*, *BinOpT2* y *BinOpT3*, y se van llenando en orden ascendente una vez que se completa su capacidad. Para que no se mezclen los distintos tamaños de las semillas clasificadas, se ubica un *hold* para cada contenedor para llevar un solo tipo de semillas a los tratadores.

En esta etapa de la simulación se decidió simular las dos torres de clasificación como una sola, esto se debe primero al hecho de que consideramos que las clasificadoras son idénticas. Y además que al tratar un solo pedido por vez, la segunda torre solo será utilizada en el caso que el pedido supere las 381300 libras. En este caso a la clasificadora ingresará la mitad de semillas para simular que se están utilizando dos clasificadoras a la vez. Este punto también incide en la utilización del Tratador 2, el mismo será siempre utilizado por el Clasificador 1.

Luego para comenzar la etapa de tratamiento, el evento *EnviaraTratamiento* verifica si alguno de los tratadores está disponible, y si el mismo tiene tachos de almacenamiento disponibles, es decir 100% vacíos. Si este es el caso, el evento activa la función *Setearpedido1*, la cual busca las variables del pedido respectivo en los collectors denominados *Collectors tratamiento*, en la *Figura A.23*, asigna estas variables al agente que sale del Bin del tamaño respectivo.

Luego, mediante un *conveyor* se identifica el transporte de las semillas desde las torres a los tratadores. En un principio, las semillas que provienen de la primera torre van directamente al Tratador 1 y 2, y en el caso que se estén utilizando las dos torres clasificadoras, será utilizado el split para enviar las semillas del clasificador 2 al Tratador 3.

La tercera etapa, la del tratamiento de las semillas, se puede visualizar en la *Figura A.21* donde por medio de un bloque *batch* se generan lotes que se adapten a las capacidades y al modo de funcionamiento de los tratadores. Cuando el lote sale mediante el *batch*, se vuelven a definir los atributos de una nueva orden utilizando *SetearPedido1*. El *selectOutput11* identifica si el Tratador 1 está siendo utilizado para desviar el resto de las semillas al Tratador 2. También, se establece que si no salen todos los *batch* de las semillas que ingresaron a las torres, no pueden volver a ingresar semillas nuevas a tratamiento, para simular que el transporte no ha finalizado. Es importante mencionar que cuando el tratamiento requerido es distinto al tratamiento realizado anteriormente en ese mismo tratador entonces se realiza un setup de la máquina. Para verificar esto, se utiliza una función *Set_Up_Tratador*.

Para almacenar las semillas tratadas en nuevos contenedores, que seguiría siendo parte de la tercera etapa del proceso, éstas se dirigen al primer contenedor que esté disponible. Luego, se utiliza un *unbatch* para desarmar los lotes en unidades de semillas nuevamente para ser ingresados a los nuevos contenedores.

Al ingresar un agente a un Bin de Tratamiento, se asignan las propiedades del agente a las variables de estado del Bin respectivo, estas variables se pueden observar en la *Figura A.29*

En este momento se utiliza la función *SetearPackaging* que, parecido a como lo hacía *SetearPedido*, establece los atributos del pedido actual, utilizando los datos de la *Tabla A.13*, para que se almacenen los requerimientos de packaging de cada orden.

En cuanto a la limpieza de los tratadores que ocurre en esta tercera etapa, se agrega el tiempo de limpieza de los tratadores, que se sabe que ocurre cada determinada cantidad de tiempo aleatorio que cuenta con una distribución triangular, y dura una cantidad de tiempo aleatorio que tiene distribución uniforme. Para realizar esto se creó el evento de *Evento_Limpieza_Trat*, el cual se activa periódicamente siguiendo una función *triangular (15,20,25)* [Horas] para indicar que es necesario hacer una limpieza de todos los tratadores. Este evento actualiza el tiempo de los delay *LimpiezaTX* de 0 al tiempo respectivo, que al terminarse vuelve a ser 0. Luego, el tiempo de set up de un tratador, depende de si se cambia de tratamiento dentro de un tratador (siguiendo los datos de la *Tabla A.5*), y el tiempo que dura un set up depende de qué tratamiento se va a hacer, independientemente del tratamiento que se haya hecho antes.

La modelización de la cuarta y última etapa del proceso de producción de las semillas se puede observar en la *Figura A.22*, que muestra el empaquetado de semillas. Esta etapa comienza con el evento *Enviarapack* que cuando ambas líneas de empaquetado estén disponibles, busca que tachó de semillas tratadas tiene la variedad, tamaño y tratamiento de semillas requeridas. Estas variables se definen mediante la función *SetearPackaging*, la cual busca en los *Collectors Empaquetados* las propiedades del siguiente pedido.

En el *selectOutput10* se decide a cuál línea de empaquetado se envían las semillas dependiendo del requerimiento del pedido actual. Una vez que sale un pedido empaquetado, sale con un *batch*, se utiliza un *delay* para representar el tiempo de set up de las líneas de empaquetado que cuentan con un tiempo aleatorio que se distribuye de manera uniforme y

depende del tipo de empaque. Por último, el *sink1* se fija que estén todos los pedidos armados y termina el programa.

La última etapa consiste en el limpiado de la planta luego de que cada pedido ha sido completado. Primero se verifica que el clasificador haya finalizado, en el caso de que no se espera a que finalice, luego se vacían todos los tachos con las funciones que se encuentran en el recuadro *Vaciado de Tachos*. Una vez finalizado esto, se puede continuar con el siguiente pedido.

Por último, con el objetivo de simular que los días domingo no se trabaja, se crean dos eventos denominados *domingo* y *lunes*. El evento domingo se activa cuando es domingo y asigna un valor de 1 a una variable que bloquea todos los *holds*. Donde al activarse, los procesos que ya habían comenzado se terminan, es decir si hay un tratador operando, el proceso se termina y luego se envía para la planta. Cuando se activa el evento *lunes*, la variable se restablece a cero, permitiendo que el proceso continúe normalmente.

El modelado de la simulación completa se puede ver en la *Figura A.25*.

4.4. Aleatoriedad

Se cuenta con algunas variables aleatorias que mantienen una distribución (véase *Tabla A.10*), y para establecer esta aleatoriedad se estableció una *random seed* para que cada vez que se ejecute el simulador varíen los valores de las mismas.

4.5. Cálculo y visualización de las variables de estado

Se definieron variables de estado del tipo booleanas para lograr un eficiente funcionamiento del modelo. Para la etapa de tratamiento, se generó *EstadoBin* que muestra si hay un contenedor de semillas tratadas disponible, en donde si el valor es 0 no se envían semillas a tratar. A su vez, se creó *EnviaraTrar* que muestra si hay un pedido en tratamiento, donde si su valor es 0 entonces no se manda un pedido a tratar. Para la etapa de empaquetado, se generó *Estadoempa* donde su valor es 1 si hay un pedido siendo empaquetado. Por último, se creó *EstadoBags*, en donde si su valor es 0, el empaquetador está siendo usado. Estas variables se pueden ver en la *Figura A.23* y *Figura A.24*. Por último en la *Figura A.29* se observa las variables de estado de los bin de tratamiento, que indican el peso de semillas que tiene cada uno, junto con la variedad, tamaño y tratamiento de las mismas.

4.6. Funcionalidades extras

Se puede destacar que para la realización de la simulación se tuvo que utilizar ciertas herramientas que no fueron enseñadas en clase. Entre ellas se destaca el *conveyor* (que se vió en la *Figura A.20* y *Figura A.21*) que actúa como cinta transportadora de las semillas entre los contenedores de tamaños clasificados hacia los tratadores, que tiene un tiempo de trabajo de 3 minutos. También, se crean agentes y se les asignan valores a sus variables mediante el

código que se ve en la *Figura A.26*. A su vez, se gestionan las variables de los agentes mientras están en la cola (véase *Figura A.27*), asignando valores a variables globales o locales que pueden ser utilizadas más adelante en el modelo. Por último, otra funcionalidad central del modelado fue la de cambiar y agregar valores a las variables de los agentes a lo largo de la simulación. Los agentes cuando ingresan al clasificador tienen determinadas propiedades, que luego al ingresar al tratamiento se debe asignar a una determinada cantidad de semillas el tratamiento específico que tendrán estas, y luego para el empaquetado esto se repite. Esto se hace con los eventos y funciones *EnviaraTratamiento*, *Setearpedido1*, *EnviaraPack* y *SetearPackaging*, donde como ya fue explicado anteriormente, los eventos determinan cuando los procesos están disponibles, y las funciones “buscan” en los collectors las variables requeridas y estas se asignan a los agentes al salir del respectivo tacho de almacenamiento en el que estaba.

5. Resultados de la simulación

5.1. Stress test

En la gestión de pedidos de semillas, se enfrentaron dificultades durante las pruebas de estrés del modelo al intentar completar todos los pedidos. Se observó que el proceso no completa todos los pedidos al cambiar la semilla de aleatoriedad de un valor fijo a uno aleatorio. Cambia según cada corrida, pero el modelo siempre completa el pedido número 8 y se detiene luego, a veces completa todos los pedidos y otras no. Debido a esto se determina que el análisis estadístico será realizado sobre estos 8 pedidos que son completados para asegurar que las distintas muestras tomadas sean confiables y representen el modelo de forma adecuada.

5.2. Gráficos de variables de referencia

Se realizó un sólo gráfico de la variable de referencia a lo largo del modelo para poder visualizar el porcentaje de pedidos completados en comparación a los que están en la cola para ser completados. Éste se puede visualizar en la *Figura A.28* y ayudó a ver cómo iba corriendo el simulador.

5.3. Análisis a priori

Con el principal objetivo de aumentar productividad y eficiencia de la planta disminuyendo los tiempos del proceso, disminuyendo la espera antes de cada subproceso, y aumentando el nivel de ocupación de cada máquina del proceso, se realizó un análisis a priori para investigar el tiempo total que tardaría todo el proceso de producción en realizar todas las órdenes de producción. Dado que el simulador sólo logra procesar 8 pedidos de clientes, se realiza un análisis a priori de estos primeros pedidos teniendo en cuenta los tiempos que se tarda en

llevar las semillas a las torres, los tiempos que se tarda en limpiar los clasificadores y contenedores, el tiempo en llevar las semillas a los tratadores, el tiempo del tratamiento, para limpiar los tratadores, de transportar las semillas tratadas a empaquetarlas y el tiempo de empaquetamiento. Además, se toma en cuenta la capacidad de producción de cada uno de los componentes principales (clasificadores, tratadores y empaquetadores).

En lineamiento con los supuestos realizados, obtenemos un tiempo estimado de 74411,38 minutos, que serían el equivalente a 1240,19 horas de trabajo. Según este primer análisis y teniendo en cuenta que se trabajan 24 horas 6 días a la semana, se necesitarían alrededor de 9 semanas de trabajo para cumplir con los pedidos mencionados. Cabe aclarar también que, para este primer análisis, se consideró que el proceso se realiza de manera sistemática, siendo cada actividad consecutiva a la anterior bajo el supuesto de que recién al terminar de procesar una orden, puede comenzar con la siguiente. Este último supuesto mencionado, es el que da lugar a la posibilidad de mejora y al objetivo de este trabajo.

5.4. Resultados de la simulación y comparación con análisis a priori

Después de realizar la simulación en 100 ocasiones, se determinó que se procesaron un total de 953500 libras de semillas para satisfacer los pedidos de los ocho clientes. El rango de horas de trabajo total necesarias para procesar esta cantidad de libras oscila entre 1318 y 1338 horas (véase *Figura A.30*). Este rango es notablemente consistente con los resultados del análisis a priori, lo que sugiere que el modelo opera de manera precisa y cumple con todos los requisitos establecidos por la empresa.

5.5. Tamaño de muestra

Previo al análisis de las diferentes muestras asociadas a los distintos modelos se determina el tamaño de muestra mínimo necesaria para poder asegurar una precisión del 5% de la media muestral en las diferentes variables de interés. Para determinar el mínimo tamaño de muestra requerido para satisfacer simultáneamente un determinado nivel de confianza y una precisión deseada se implementa el uso de la siguiente fórmula.

$$N \geq \left(\frac{S_0 Z_{(1-\frac{\alpha}{2})}}{\epsilon} \right)^2$$

N representa el tamaño mínimo que debe de tener la muestra, S0 es el desvío estándar de la muestra inicial, α es el nivel de significancia y ϵ es la precisión deseada. Para la determinación del N requerido por cada muestra se estableció un nivel de confianza del 95% y una precisión del 5% de la media muestral. Para la utilización de la fórmula inicialmente se debe generar una muestra de datos con un tamaño N0 , el cual se decidió que para las diferentes muestras sería de 100 simulaciones. A partir de este número de simulaciones, se

decidió extraer la variable de referencia del nivel de utilización de cada componente del proceso como se visualiza en la *Figura A.31*.

Al calcular el valor N de cada una de las variables extraídas, se determinó que la variable de referencia con el mayor valor de N es el nivel de utilización del contenedor número 3 de semillas tratadas, con un valor de 43.13. Este resultado indica que al realizar 100 muestras de simulación, el nivel de confianza es adecuado.

5.6. Análisis de resultados

La realización de un análisis de Monte Carlo es una técnica estadística utilizada para modelar la probabilidad de diferentes resultados en un proceso que no se puede predecir fácilmente debido a la intervención de variables aleatorias. En este caso, se usará la muestra de 100 corridas de la simulación para poder analizar las variables obtenidas (vistas en la *Figura A.31*) y determinar si siguen alguna distribución de probabilidad. Se decidió analizar los datos de la variable de referencia del nivel de utilización porque se considera que ésta permite sacar conclusiones acerca de posibles cuellos de botella en el proceso de producción.

En primer lugar, notamos que el componente que tiene un mayor nivel de utilización es el de la torre clasificadora de semillas, teniendo un promedio de 0.999015 con un desvío estándar de 0.001307. Esto se puede visualizar en la *Figura A.32*. Se graficó un histograma (véase *Figura A.33*) de la utilización del clasificador en donde se puede ver la distribución de los datos muestrales. Cuando se grafica el gráfico de densidad para esta variable (véase *Figura A.34*) se visualiza una forma acampanada, que para ver si se trataba de alguna distribución conocida, se realizaron los distintas pruebas de Kolmogorov-Smirnov, para evaluar si estos datos se asemejan a una distribución normal, gamma, log-normal o exponencial. Al ver los resultados arrojados en la *Figura A.35*, donde se ve que en todos los test de hipótesis los *p-valor* son muy cercanos a cero, se concluye que no se confirma que los datos pertenecen a alguna de las distribuciones.

Se prosiguió analizando el nivel de utilización de los contenedores de semillas clasificadas por los cuatro distintos tamaños. En la *Figura A.36*, donde se demuestra un boxplot para cada tamaño de semilla clasificada, se puede observar que el tercer contenedor es el que mayor nivel de utilización tiene, seguido por el segundo contenedor, luego el contenedor 4 y por último el primero. Esto quiere decir que se procesa una mayor cantidad de semillas del tamaño 3 y una menor cantidad de semillas de tamaño 1.

Luego, se realizó el mismo gráfico para el nivel de utilización de las máquinas tratadoras. Lo primero que se observa en la *Figura A.37* es que las medias de los niveles de utilización para cada uno de los tratadores son muy distintas entre sí, por ese motivo, para poder respaldar esta observación estadísticamente realizamos un test de ANOVA, y como éste dió que las medias son distintas significativamente, se realizó un Test de Tukey (véase *Figura A.38*) para poder evaluar cuán diferentes son entre sí. Como se puede ver, se observa una mayor

diferencia de medias entre el tratador 1 y 2, con un $-0,039$ de diferencia, y todas las comparaciones tienen un valor p -ajustado de 0, por lo que se confirma que las diferencias entre los niveles de utilización de los tratadores son significativas. Teniendo en cuenta esto, se puede confirmar que la primera tratadora tiene un mayor nivel de utilización, mientras que la segunda tiene por debajo de 5% de utilización. Esto tiene sentido, porque en la programación de los tratadores las semillas que se destinan a ese tratador son aquellas que exceden de capacidad en el primer tratador y no esto no ocurre la mayoría de las veces.

Se decidió realizar un análisis sobre los ocho contenedores de semillas tratadas, y para eso se empezó graficando la *Figura A.39*, que muestra ocho boxplots del nivel de utilización de ellos. A raíz del gráfico se puede sugerir que el primer y quinto contenedor son los que más nivel de utilización poseen. Asimismo, tienen una mayor variabilidad, por lo que se decidió graficar los histogramas de cada uno de los ocho conjuntos de datos (véase *Figura A.40*) para ver si alguno sugiere seguir alguna distribución. Al ver que estos dos contenedores que contienen una mayor variabilidad se asemejan a una distribución gamma, se realizó un test de Kolmogorov-Smirnov para la distribución gamma. En la *Figura A.41* se pueden observar los resultados, y al ver que ambos arrojan un p -valor mayor a 0.05, se infiere que los datos del nivel de utilización de los contenedores de semillas tratadas número 1 y 5 presentan una distribución gamma.

Cuando se analizan los niveles de utilización de ambas líneas de empaquetamiento haciendo unos boxplots (véase *Figura A.42*) ambos tienen un nivel de utilización por encima del 40%. Estos valores están por encima del tratador con mayor nivel de utilización (visto en la *Figura A.37*), lo que sugiere que este punto es un posible cuello de botella.

Por último, se analizó un último componente del proceso que son las dos cintas transportadoras que llevan las semillas de los contenedores clasificadores hasta los tratadores y las que llevan las semillas tratadas hasta las líneas de empaquetamiento. Viendo los niveles de utilización de ambas en la *Figura A.43*, se puede observar que tienen por debajo de un 1%, lo cual se descarta esta parte del proceso como posible cuello de botella.

Para finalizar el análisis, se graficó la *Figura A.44* que contiene los niveles de utilización de los componentes del proceso de producción. Para graficarlos, se tomó el promedio de los niveles de utilización de cada uno. A raíz de esto, se pudo evidenciar que el claro cuello de botella es la torre clasificadora. Se contrastaron los resultados con un Test de Tukey que afirma que todas las medias sean distintas significativamente entre sí (véase *Figura A.46*).

6. Experimentación

6.1. Procedimiento de la experimentación

A raíz de los resultados obtenidos de la simulación, se pudo determinar que el clasificador de semillas es un cuello de botella que limita la productividad en libras de semillas. Por este

motivo, decidimos tomar las variables de decisión de la velocidad de clasificador y peso mínimo de semillas para utilizar el segundo clasificador. En el caso cuando estas variables no se modifican se sabe que el promedio del nivel de utilización es de 99.17% y el promedio de la productividad en libras 323,69.

Se investigó cómo la velocidad de la clasificadora y el peso máximo de la capacidad del clasificador de las semillas influye en el rendimiento del sistema. Para ello, se realizaron 14 simulaciones, de 50 corridas cambiando los siguientes valores:

- Experimento 1: Aumentar velocidad de clasificadoras de 1 a 2.5 % de pasos de 0.5
- Experimento 2: Disminuir Peso mínimo a las que se utiliza la clasificadora 2 de 1% a 1.6% en pasos de 0.2

Para realizar los experimentos se utilizó la herramienta *Parameter Variation* de *Anylogic*. Se cargaron las cotas máximas y mínimas de cada parámetro a modificar y se obtuvieron un total de 800 corridas totales, ya que existen 16 combinaciones posibles, y se realizaron 50 corridas de cada combinación para asegurar que la muestra representa estadísticamente a la población.

6.2. Resultados de la experimentación

En la *Figura A.46* se ilustran los resultados de la fase de experimentación, mostrando las combinaciones de las variables con sus respectivos promedios de la productividad en libras. Se realizó un gráfico de barras en la *Figura A.47*, para una mejor comprensión de los resultados, y como se ve, a menor capacidad de la torre clasificadora, más productividad hay en la planta de producción. Lo mismo se puede decir de la velocidad del clasificador, a mayor velocidad aumenta la productividad en libras. El experimento que en promedio tiene una mayor productividad en libras es el que se asigna una velocidad de clasificador de 2.5 y una disminución del 1.4%, devolviendo un resultado final de 862,88.

Al analizar la utilización de la torre clasificadora (véase *Figura A.47*), se puede ver que las barras del gráfico se mantienen bastante parejas, sin mucha modificación a lo largo de las experimentaciones. Para determinar si las diferencias entre las medias de los grupos son significativas basándose en un umbral de significancia del 0.05, se realizó un test de ANOVA, cuyo resultado se visualiza en la *Figura A.48*, que demuestra que no hay diferencia significativa en los resultados de las utilidades de la clasificadora.

Se realizó un gráfico (véase *Figura A.49*) que demuestra los intervalos de confianza para la productividad en libras para los casos en donde “División clasificadores” es constante (es decir que se mantiene la capacidad de la clasificadora) y se muestran los cuatro casos en donde cambia la velocidad del clasificador. Como se puede ver en los resultados, la velocidad de 2 muestra una mayor variabilidad que el resto de las velocidades.

Asimismo, se graficó los intervalos de confianza para la productividad pero, en este caso dejando la variable de decisión “Velocidad clasificador” constante. En esta *Figura A.50* se muestran cuatro casos en donde se achica la capacidad de las torres clasificadoras, y se puede

observar que ocurre un gran salto desde que se divide la capacidad por 1.4, siendo este el caso con mayor variabilidad en los datos, razón por la cual el promedio de la productividad ocurre en el experimento con mayor resultado ocurre en este caso.

7. Dificultades, debugging y errores en la experimentación

Durante el desarrollo del modelo de producción de semillas, se enfrentaron varios desafíos que dificultaron la construcción del simulador como la adaptación al software de simulación, el lenguaje Java, y la amplia variedad de funcionalidades que el programa ofrece.

El principal desafío desde el primer momento fue el de representar como “grupos” de semillas que en un principio ingresaban al sistema con un conjunto de propiedades iniciales, luego debían dividirse y más propiedades debían ser agregadas en función de los datos de los órdenes de producción, por ejemplo un conjunto de semillas ingresa al clasificador y se divide, luego diferentes cantidades deben recibir diferentes tratamientos, y por último, un mismo grupo de semillas de un tamaño y tratamiento deben recibir diferentes empaquetados. Este problema se resolvió con la creación un evento luego de los tachos clasificados y otro luego de los tachos de tratamiento, los cuales asignaban las propiedades respectivas en el momento que las semillas salían del almacenamiento intermedio.

Otro problema importante que tuvimos fue que, luego de haber solucionado el problema, al realizar una alta cantidad de corridas, seguimos teniendo problemas relacionado a lo anterior, ocasionando que algunas corridas no puedan realizar el 100% de los pedidos. El problema no era claro ni era siempre el mismo, y asumimos que era debido a la alta cantidad de variables, funciones y eventos que se tenían. Debido a esto decidimos simplificar el sistema, juntando funciones y eventos, eliminando otros y añadiendo controles redundantes, lo que mejoró el sistema pero no al 100%.

Sin embargo observamos que en todas de las corridas completaron hasta el pedido 8 inclusive y luego de este comenzaban a tener problemas. Debido a esto se decidió avanzar con el modelo.

8. Conclusiones y Propuesta de mejora

Tras haber realizado el primer análisis estadístico del modelo sin modificaciones, fue claro que la única forma de mejorar el proceso sería mejorando el funcionamiento de los clasificadores. Se decidió aumentar la velocidad de los mismos y además disminuir el peso mínimo de un pedido para dividir el mismo en las dos torres de clasificación, para aumentar la utilización del segundo. Al realizar esto pudimos observar como aumentó la productividad de la planta pasando de 323 Lb/Hora a 862,8 Lb/Hora. Un aumento de la misma del 167% con pocas modificaciones. Esta mejora también trajo importantes aumentos en la utilización del resto de los procesos que antes estaban en la mayoría del tiempo desocupados pero estos aumentos consideramos no son suficientes.

El principal problema se encuentra en que los clasificadores son altamente utilizados, y en contraparte, el resto de la planta está dimensionada de manera incorrecta, generando así que la mayoría de los procesos estén a más del 50% del tiempo desocupados. Debido a esto las propuestas de mejora son las siguientes:

Aumentar la capacidad de los clasificadores, e inclusive adquirir uno nuevo y de esta forma equiparar la utilización y productividad de todos los procesos de la planta.

Otra opción, en el caso que la compañía decida no invertir tanto capital en la planta, sería la de reducir las capacidades de los procesos con bajos niveles de utilización y al mismo tiempo aumentar el del clasificador pero en menor medida que el caso anterior. Esta propuesta permitiría utilizar el dinero de vender las máquinas en desuso, y reinvertir el dinero en la mejora del clasificador.

La decisión final será tomada en función de las prioridades que tenga el cliente, en función de los costes de cada una.

9. Bibliografía

- Devore, J. (2008). Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias. Séptima edición. México: Cengage.
- Benko, J. (2010). Modeling Stochastic Inventory Policy with Simulation [Informe]. Mechanical Engineering Letters.
- AnyLogic. Guía de usuario de AnyLogic 8.8.6 [Tutoriales y guías].

Softwares utilizados

- AnyLogic. AnyLogic 8 Personal Learning Edition (Versión 8.8.6) [Aplicación de software]. Recuperado de <https://www.anylogic.com/>
- Python Software Foundation. (2021). Python (Version 3.9.7) [Software]. Recuperado de <https://www.python.org/downloads/release/python-397/>

Anexo

Torre	Tasa máxima de transferencia del clasificador (Libras/Hora)	Capacidad máxima del clasificador (libras)	S1 Peso Máximo (libras)	S2 Peso Máximo (libras)	S3 Peso Máximo (libras)	S4 Peso Máximo (libras)
1	60000	30000	9000	9000	16000	16000
2	60000	30000	9000	9000	16000	16000

Tabla A.1: Especificaciones Torres de clasificación
Fuente: La empresa contratista

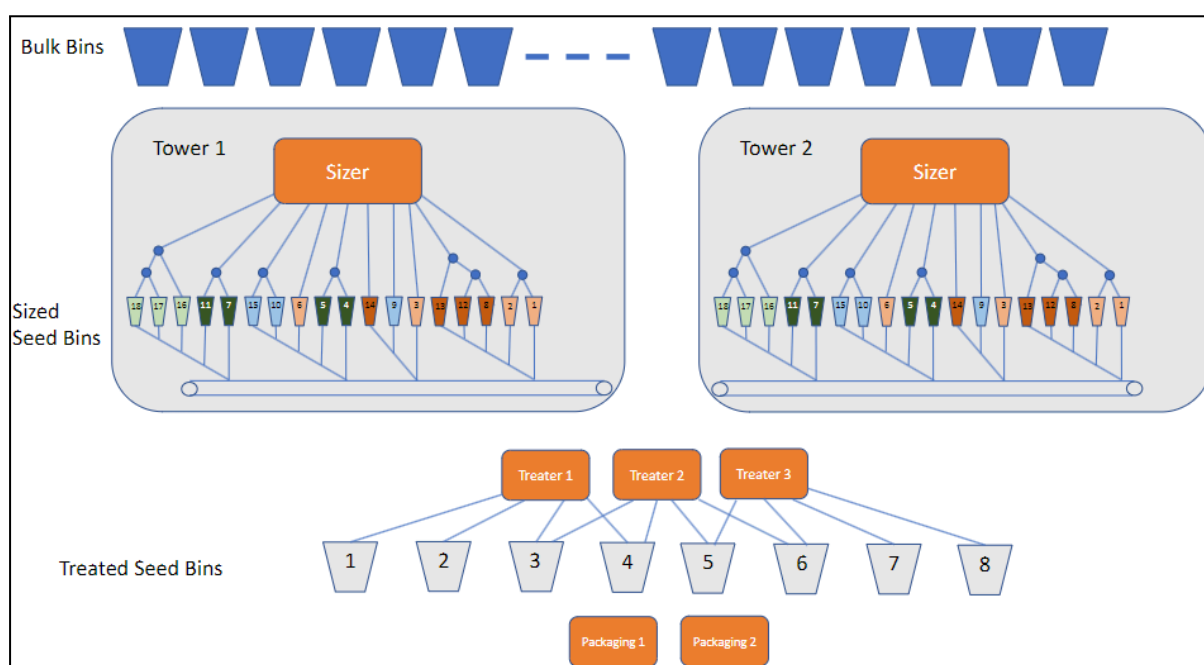


Figura A.1: Diagrama del proceso de fabricación
Fuente: La empresa contratista

ID contenedor	Tipo de contenedor	Capacity (pounds)	Sublote	Capacity Total (pounds)
18	Open	30012.50	1	359231.25
17	Open	59,718.75		
16	Open	30,012.50		
11	S4	119,743.75		
7	S4	119,743.75		
15	S2	119,743.75	2	359231.25
10	S2	119,743.75		
6	S3	59,718.75		
5	S4	30,012.50		
4	S4	30,012.50		
14	S1	119,743.75	3	359231.25
9	S2	119,743.75		
3	S3	119,743.75		
13	S1	59,718.75	4	478668.75
12	S1	119,743.75		
8	S1	119,743.75		
2	S3	59,718.75		
1	S3	59,718.75		

Tabla A.2: Datos sobre los contenedores separados por tamaños de las semillas
Fuente: Elaboración propia con datos ofrecidos por la empresa

Treatment Package	Total cycle Time (seconds)	Max Batch Size (pounds)
Treatment 1	70	330
Treatment 2	55	330
Treatment 3	60	330

Tabla A.3: Datos sobre las tratadoras
Fuente: La empresa contratista

Treater Name	Treated Seed Bin Id
Treater 1	TB001
Treater 1	TB002
Treater 1	TB003
Treater 1	TB004
Treater 2	TB003
Treater 2	TB004
Treater 2	TB005
Treater 2	TB006
Treater 3	TB008
Treater 3	TB007
Treater 3	TB006
Treater 3	TB005

Tabla A.4: Contenedores de las semillas tratadas
Fuente: La empresa contratista

From Treatment	To Treatment	Setup Time (minutes)
Treatment 1	Treatment 2	Pert(35,45,55)
Treatment 2	Treatment 1	Pert(30,38,45)
Treatment 3	Treatment 2	Pert(35,45,55)
Treatment 3	Treatment 1	Pert(30,38,45)
Treatment 2	Treatment 3	Pert(40,50,65)
Treatment 1	Treatment 3	Pert(40,50,65)

Tabla A.5: Tiempos de preparación de las tratadoras
Fuente: La empresa contratista

Line Number	Type	S1 Rate (pounds/minute)	S2 Rate (pounds/minute)	S3 Rate (pounds/minute)	S4 Rate (pounds/minute)	Setup Time (minutes)
Packaging 1	Bags	575	575	520	520	Uniform(3,5)
Packaging 2	Seed pack	640	640	640	640	Uniform(16,24)

Tabla A.6: Información acerca de las líneas de empaque
Fuente: La empresa contratista

Purchase Order	Seed Variety	Grade Size	Weight (pounds)	Treatment Code	Packaging Type
197874330	LD3309HKNT	S3	14280	Treatment 2	Bags

Tabla A.7: Formato de planilla de producción de los pedidos de clientes
Fuente: La empresa contratista

Variable	Clase de variable	Tipo de variable	Descripción	Unidad de medida	Valor	Expresión de cálculo
Número de Clasificadores siendo utilizados	Estado	Entera	Número de clasificadores dentro de las torres siendo utilizados.	Clasificadores	[1;2]	-
Número de órdenes en espera	Estado	Entera	Cantidad de órdenes en espera de semillas que faltan preparar	Órdenes	[0; +inf)	-
Variedad de semilla siendo clasificado	Estado	Categórica	El tipo de semilla que ha entrado por la torre para preparar el pedido	1;100 (Categórica)	[1;100]	-
Peso en clasificador	Estado	Doble	El peso del lote de las semillas que entraron por el clasificador	Libras	[0; 381300]	-
Variedad de semilla en cada contenedor clasificador	Estado	Categórica	El tipo de semilla que ha entrado por la torre para ser clasificada que en ese momento se encuentra en el clasificador	1;100 (Categórica)	[1;100]	-

Tamaño de semilla en cada contenedor clasificador	Estado	Catagórica	El tamaño de la semilla que fue clasificada para un pedido	S1;S4 (Catagórica)	[1;4]	-
Porcentaje de ocupación de cada clasificador	Estado	Doble	Cantidad de espacio siendo ocupado en el clasificador por el lote de semillas que ingresó	Porcentaje	[0;1]	-
Número de Contenedores de semillas clasificadas siendo utilizados	Estado	Entera	Cantidad de contenedores de semillas clasificadas por tamaño que son utilizados	Contenedores	[1; 18]	-
Número de tratadores siendo utilizados	Estado	Entera	Cantidad de máquinas tratadoras realizando tratamientos a las semillas	Tratadores	[1;3]	-
Variedad de semilla en tratador	Estado	Catagórica	El tipo de semilla que ingresa a un tratador determinado	1;100 (Catagórica)	[1;100]	-
Tamaño de semilla en tratador	Estado	Catagórica	El tamaño de semilla que ha entrado en un tratador determinado	S1;S4 (Catagórica)	[1;4]	-
Tratamiento de semilla en tratador	Estado	Catagórica	El tratamiento que se efectúa en el tratador determinado a un lote de semillas	1;3 (Catagórica)	[1;3]	-
Número de contenedores de semillas tratadas siendo utilizados	Estado	Entera	Cantidad de contenedores ocupados de semillas que ya fueron tratadas	Contenedores	[1; 18]	-
Variedad de semillas en contenedor de semillas tratadas	Estado	Catagórica	El tipo de semillas que se encuentra en un contenedor de semillas tratadas	1;100 (Catagórica)	[1;100]	-
Tamaño de semillas en contenedor de semillas tratadas	Estado	Catagórica	El tamaño de las semillas que se encuentran en un contenedor de semillas tratadas	S1;S4 (Catagórica)	[1;4]	-
Tratamiento de semillas en contenedor de semillas tratadas	Estado	Catagórica	El tratamiento efectuado sobre las semillas que se encuentran en un contenedor de semillas tratadas	1;3 (Catagórica)	[1;3]	-
Peso en contenedor de semillas tratadas	Estado	Entera	El peso de un contenedor de semillas que ya fueron tratadas	Libras	[0;59400]	-
Líneas de empaquetado siendo utilizadas	Estado	Entera	Cantidad de líneas de empaquetado que se encuentran siendo utilizadas	Líneas de empaquetado	[1;2]	-

Variedad de semillas en cada línea de empaquetado	Estado	Entera	El tipo de semillas que se encuentra en la línea de empaquetado	1;100 (Categoría)	[1;100]	-
Tratamiento de semillas en cada línea de empaquetado	Estado	Categoría	El tipo de tratamiento al cual fueron sometidas las semillas en la línea de empaquetado	1;3 (Categoría)	[1;3]	-
Tamaño en semillas en cada línea de empaquetado	Estado	Categoría	El tamaño de las semillas que se encuentran en la línea de empaquetado	S1;S4 (Categoría)	[1;4]	-
Tipo de empaquetado en cada línea	Estado	Categoría	El tipo de empaquetado de las semillas en la línea de empaquetado	1;2 (Categoría)	[1;2]	-
Porcentaje de pedido terminado	Estado	Doble	La proporción del pedido que ha sido completada hasta el momento, expresada como un valor porcentual	Porcentaje	[0;1]	Semillas entregadas hasta el momento/ Semillas solicitadas
Número de contenedores de semillas clasificadas	Decisión	Entera	La cantidad de contenedores de semillas clasificadas utilizados	Contenedores	[1;18]	-
Numero de tratadores	Decisión	Entera	La cantidad total de tratadores que hay para utilizar	Tratadores	[1;3]	-
Número de contenedores de semillas tratadas para cada tratador	Decisión	Entera	La cantidad de contenedores de semillas tratadas asignados para cada tratador	Contenedores	[1;4]	-
Cantidad de líneas de empaquetado en bolsas	Decisión	Entera	Cantidad de líneas de empaquetado en bolsa que hay en la etapa de empaquetamiento	Líneas de empaquetado	[1;3]	-
Cantidad de líneas de empaquetado en cajas	Decisión	Entera	Cantidad de líneas de empaquetado en caja que hay en la etapa de empaquetamiento	Líneas de empaquetado	[1;3]	-
Nivel de servicio P	Referencia	Doble	Porcentaje de órdenes completadas sobre total de orden solicitadas	Porcentaje	[0;1]	
Nivel de servicio Q	Referencia	Doble	Porcentaje de semillas entregadas sobre el total de semillas solicitadas	Porcentaje	[0;1]	
Nivel de utilización de cada componente de cada proceso	Referencia	Doble	Cantidad de horas que el componente se encuentran trabajando en comparación con la cantidad de horas	Porcentaje	[0;1]	Tiempo en trabajo/Tiempo total

			que se requirió para completar todas las órdenes			
Productividad de los pedidos	Referencia	Doble	Es la cantidad de pedidos entregados sobre las horas totales trabajadas	Pedidos/Hora	-	Cantidad de pedidos/Horas totales trabajadas
Productividad de la cantidad	Referencia	Doble	Es la cantidad de semillas entregadas sobre las horas totales trabajadas	Semillas/Hora	-	Cantidad de semillas/Horas totales trabajadas
Porcentaje de semillas perdidas entre clasificación y tratamiento	Referencia	Doble	Proporción de semillas extraviadas durante el proceso de clasificación y tratamiento una vez que se realizaron mejoras para reducir las pérdidas	Porcentaje	[0;1]	-

Tabla A.8: Variables planteadas totales

Fuente: Elaboración propia

Entidades	Atributos	Rango valores	Descripción
Orden de Produccion	ID OrdenCompra		Numero de identificacion de la orden de compra
	ID Orden Produccion		Número de identificación de la orden de producción
	ID Variedad		Número de identificación de variedad pedida
	ID Tamaño	(S1-S4)	Número de identificación del tamaño requerido
	ID Tratamiento	[1:3]	Numero de identificacion de tratamiento requerido
	ID Empaquetamiento	[1:2]	Numero de identificacion de empaquetamiento requerido
	Peso		Peso total requerido
	Fecha y hora entrada		Fecha de emisión de orden
	Fecha y hora salida		Fecha de terminación de pedido

Tabla A.9: Entidades y atributos

Fuente: Elaboración propia

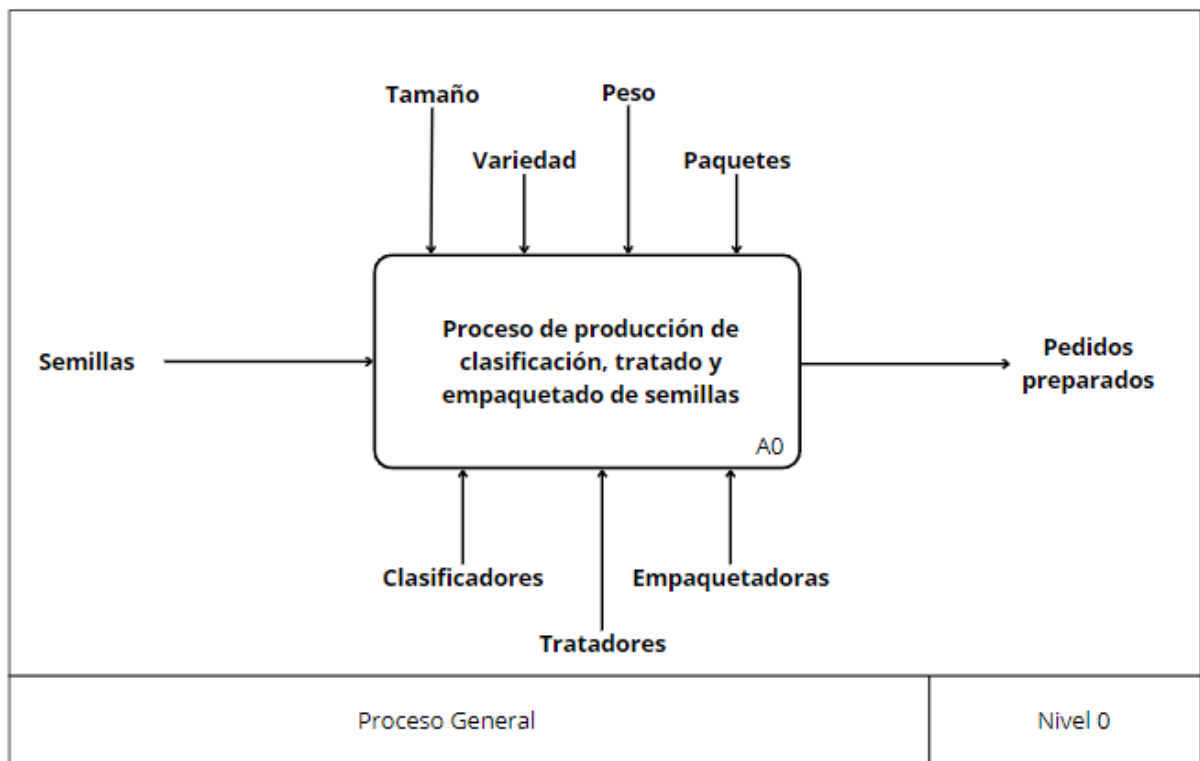


Figura A.2: Diagrama IDEF0, Nivel 0
Fuente: Elaboración propia

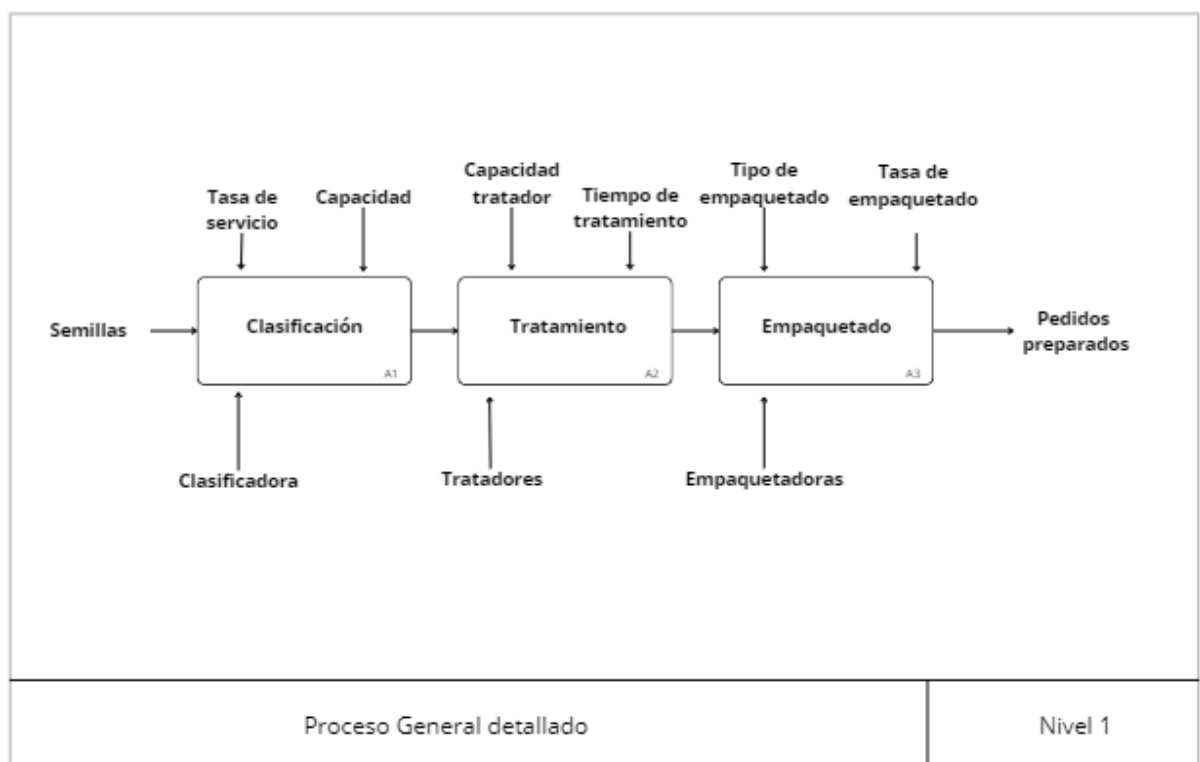


Figura A.3: Diagrama IDEF0, Nivel 1
Fuente: Elaboración propia

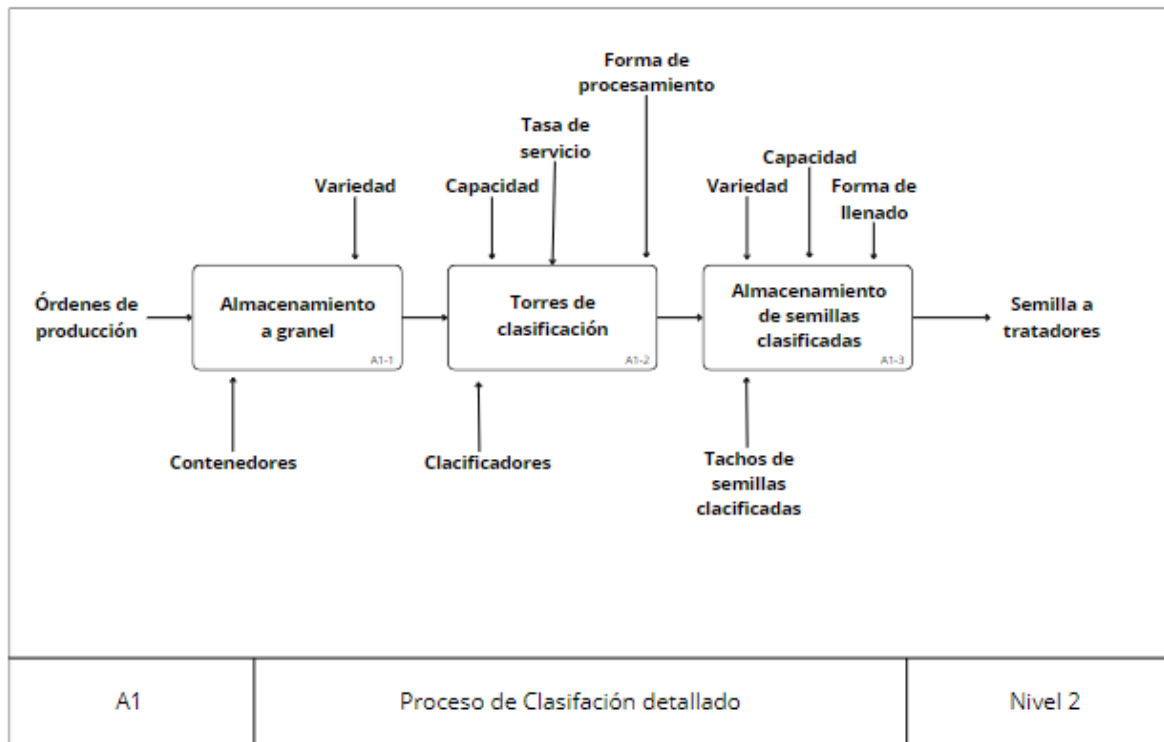


Figura A.4: Diagrama IDEF0, Nivel 2
Fuente: Elaboración propia

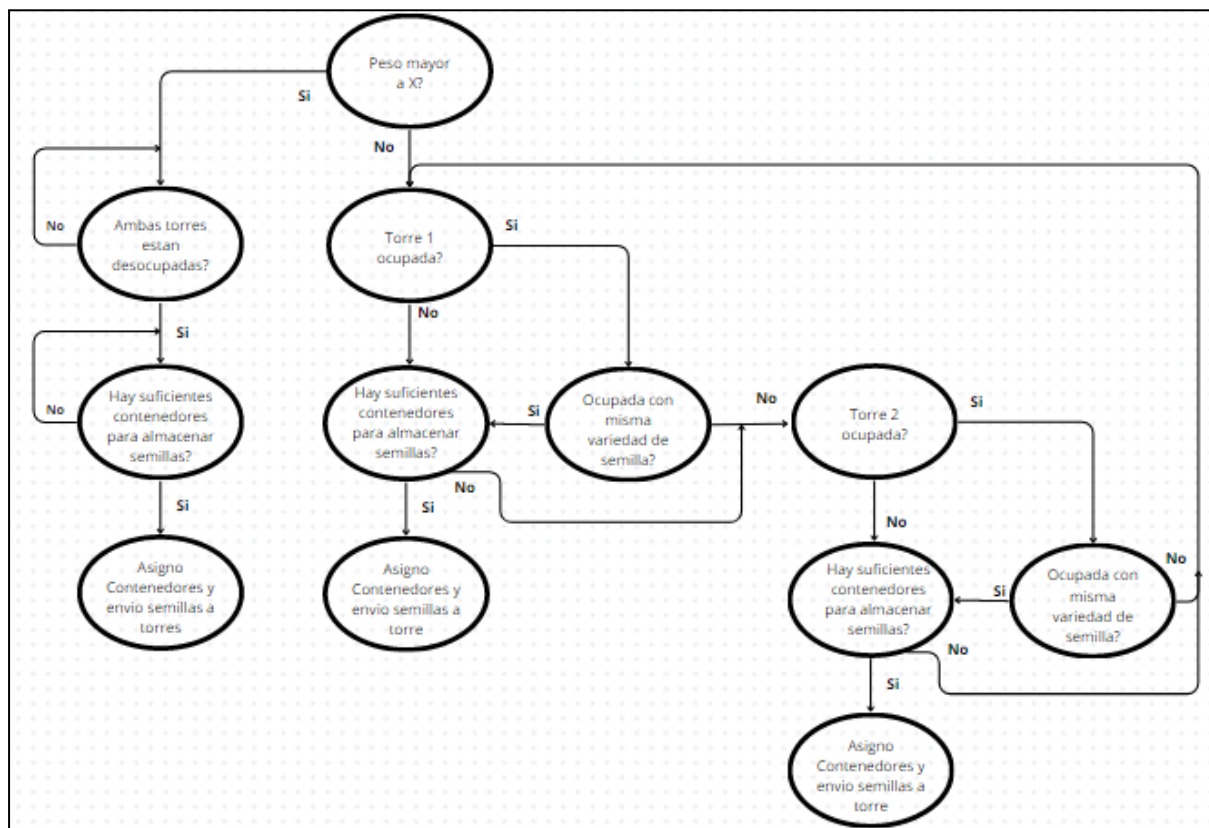
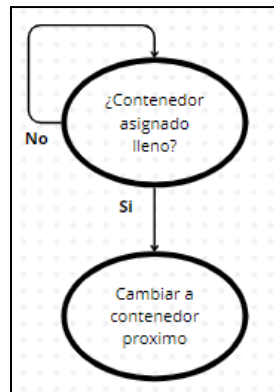
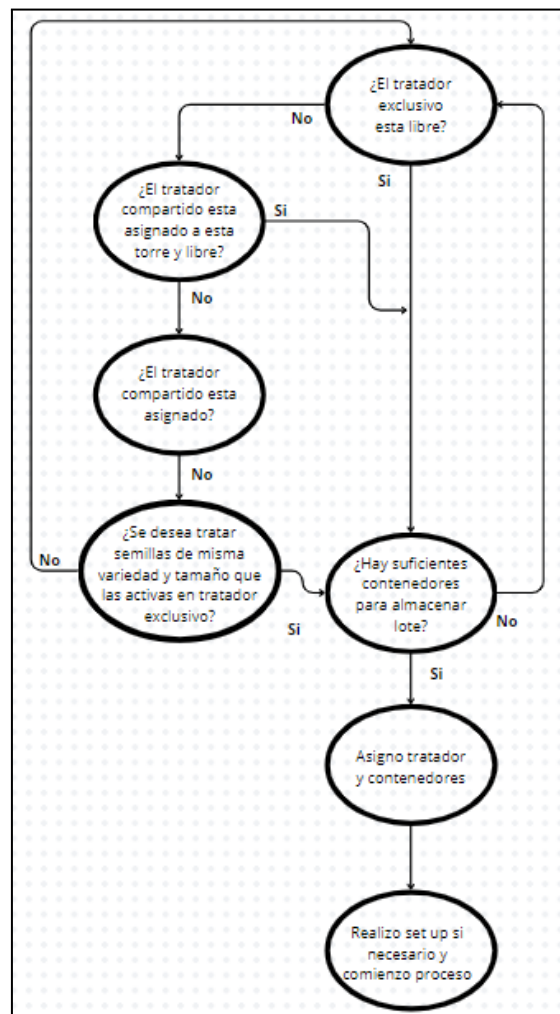


Figura A.5: Lógicas de funcionamiento elección de torres.
Fuente: Elaboración propia



*Figura A.6: Lógicas de cambio de contenedor clasificador.
Fuente: Elaboración propia*



*Figura A.7: Lógica de elección de tratador.
Fuente: Elaboración propia*

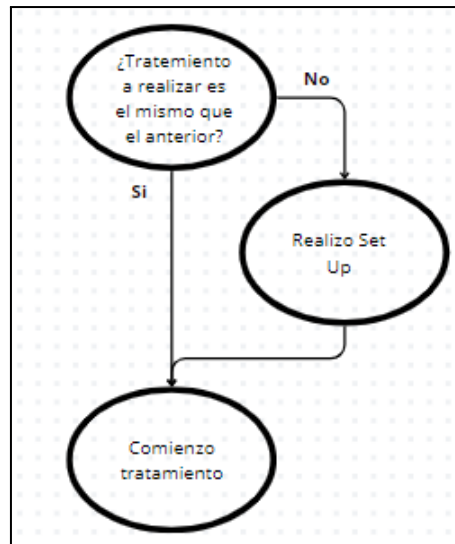


Figura A.8: Lógica de elección de set-up. en tratador elegido
Fuente: Elaboración propia

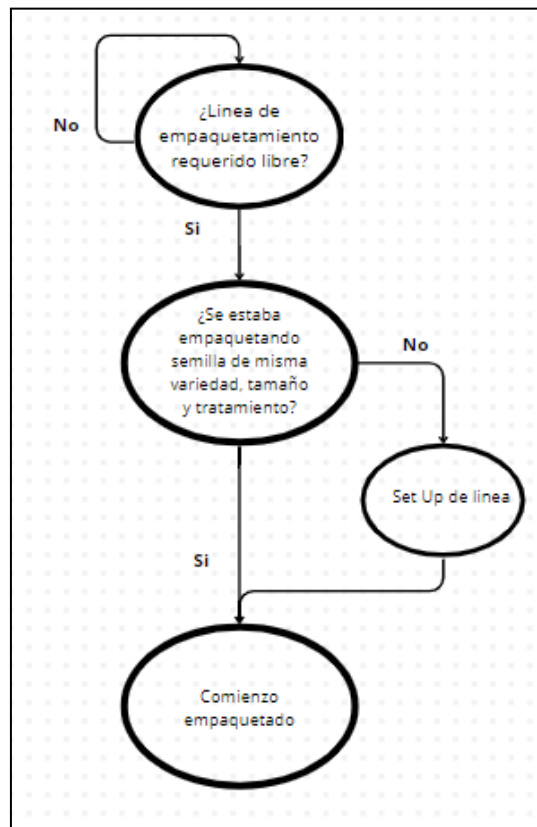


Figura A.9: Lógica de elección de set-up. en tratador elegido
Fuente: Elaboración propia

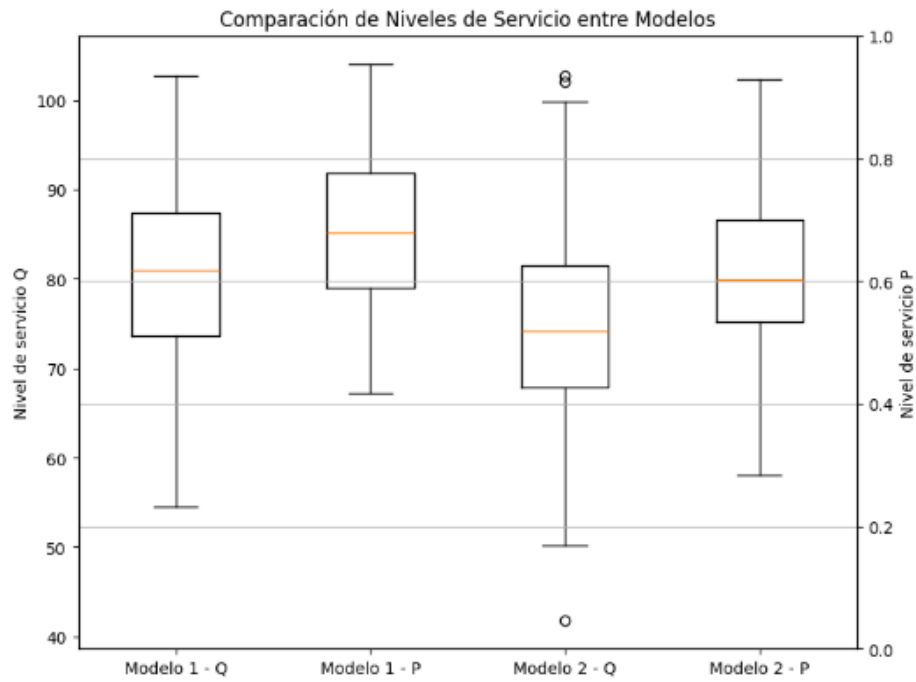


Figura A.10: Boxplot de Nivel de Servicio - Comparación entre ambos modelos
Fuente: Elaboración propia en Python

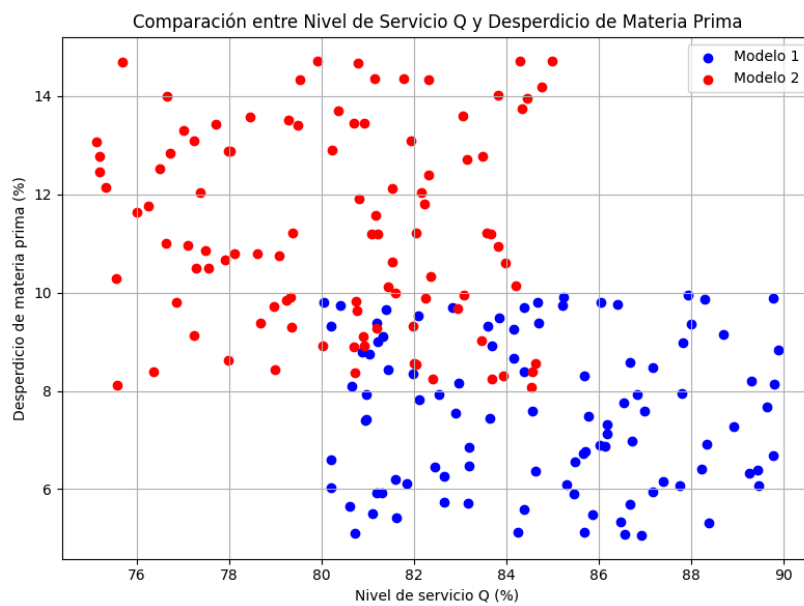


Figura A.11: Boxplot de comparación de Nivel de Servicio Q y Desperdicio de Materia Prima
Fuente: Elaboración propia en Python

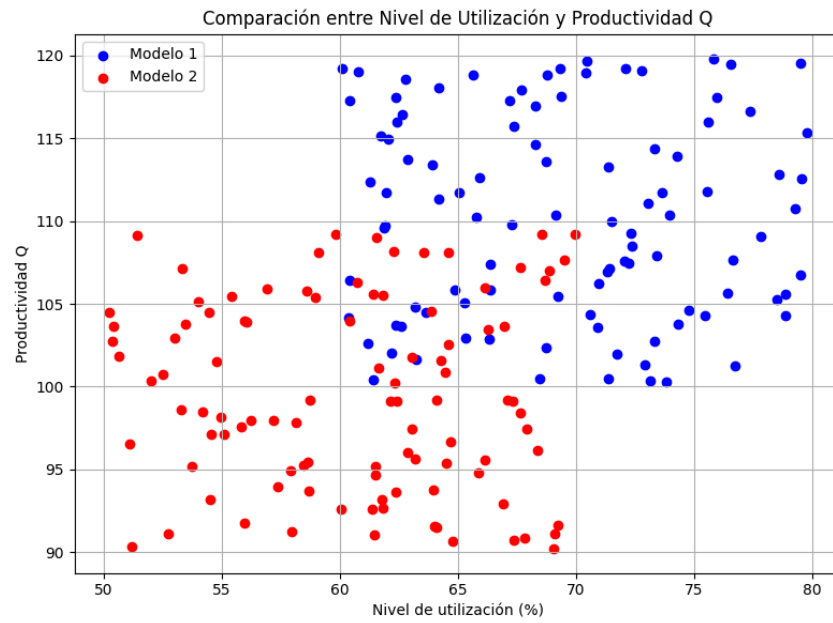


Figura A.12: Boxplot de comparación de Nivel de Utilización y Productividad Q
Fuente: Elaboración propia en Python

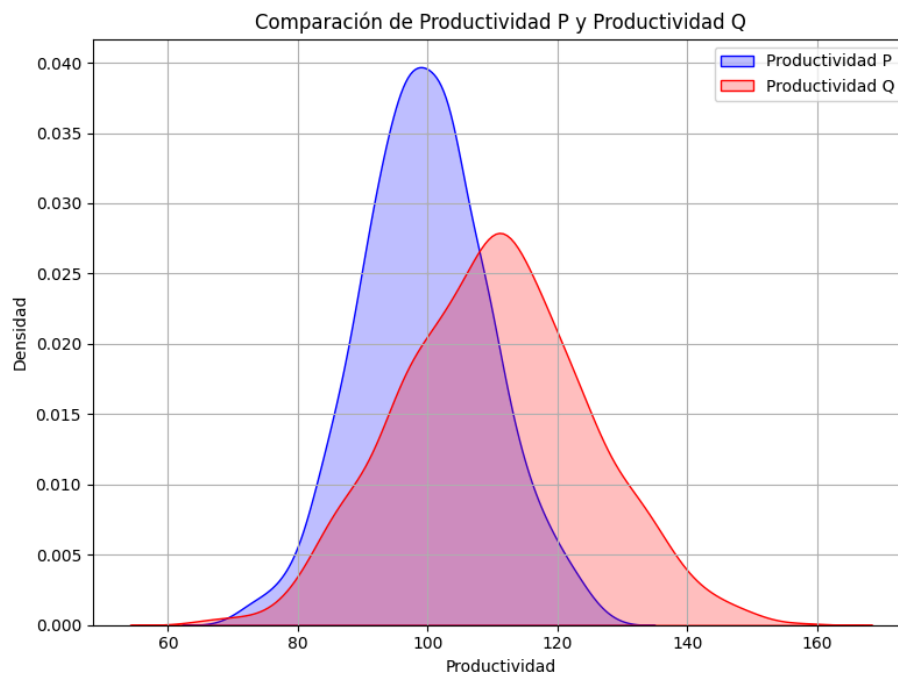


Figura A.13: Gráfico de Densidad con comparación de Productividad P y Productividad Q
Fuente: Elaboración propia en Python

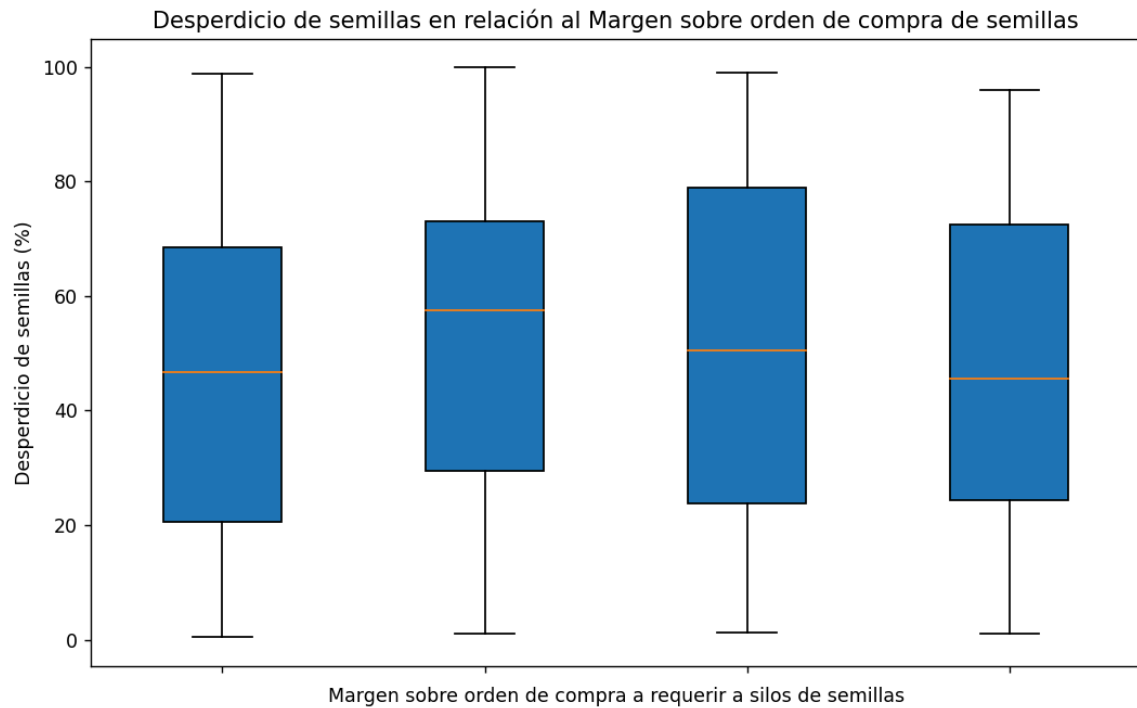


Figura A.14: Nuevo gráfico para el plan de cuadros
Fuente: Elaboración propia usando Python

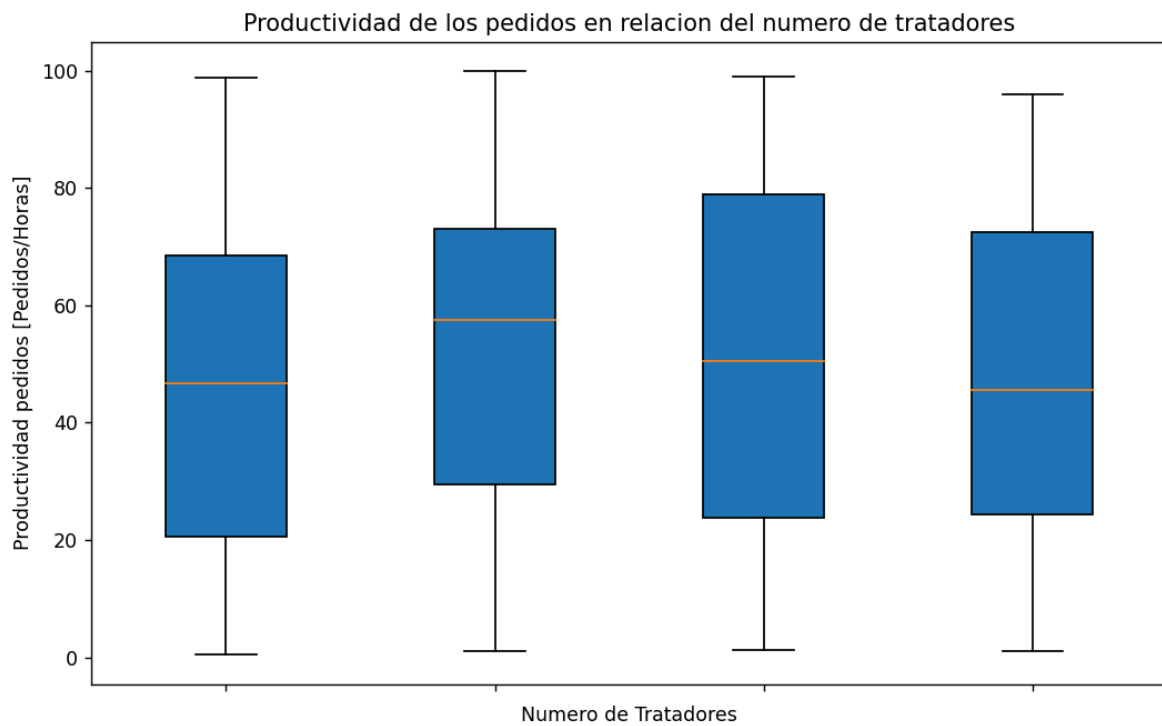


Figura A.15: Segundo nuevo gráfico para el plan de cuadros
Fuente: Elaboración propia usando Python

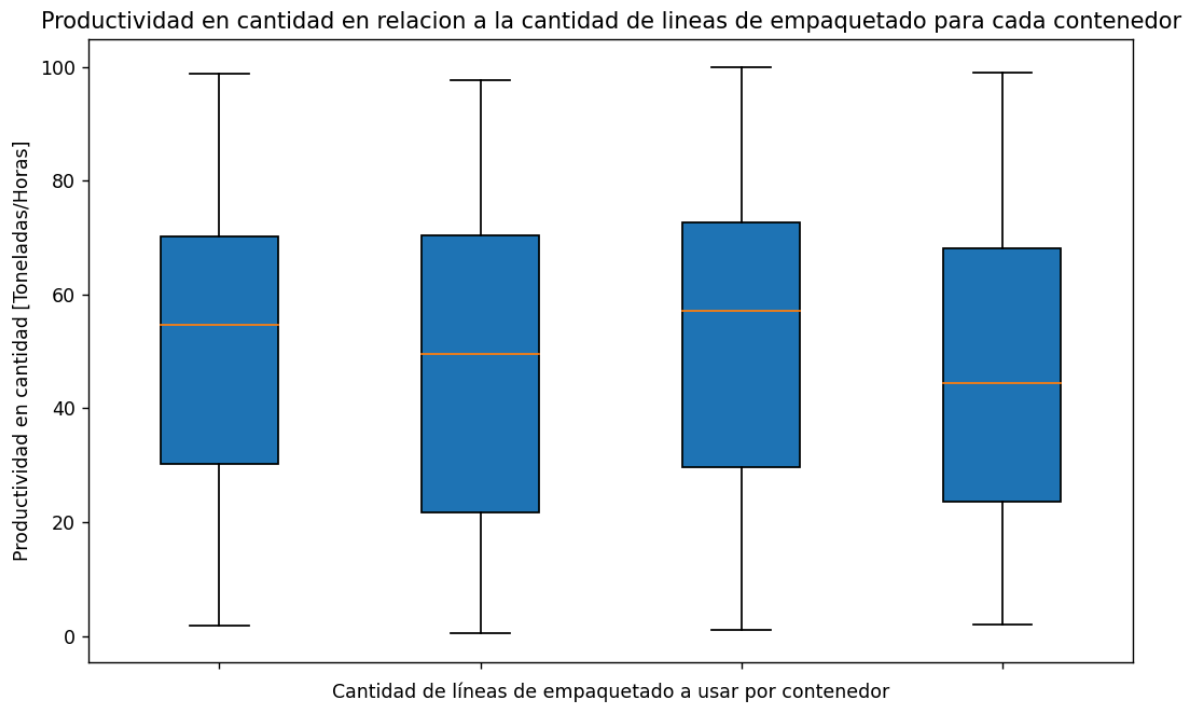


Figura A.16: Tercer nuevo gráfico para el plan de cuadros
Fuente: Elaboración propia usando Python

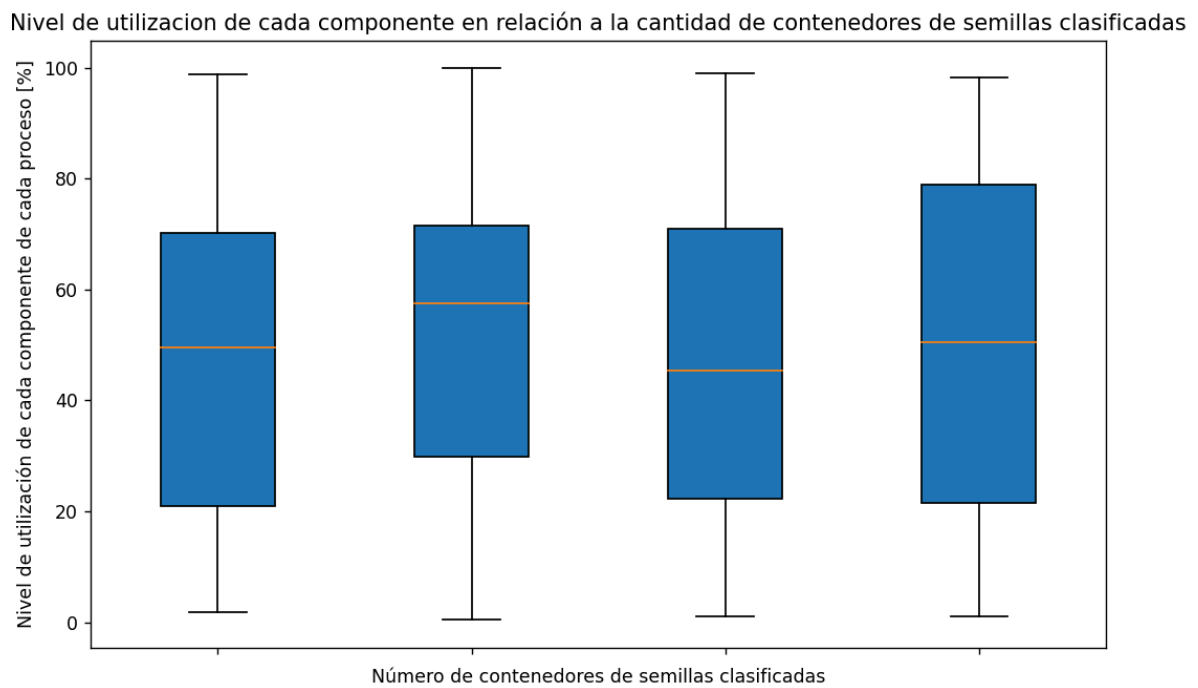


Figura A.17: Cuarto nuevo gráfico para el plan de cuadros
Fuente: Elaboración propia usando Python

Variable aleatoria	Descripción	Distribución	Unidad
Tiempo de limpieza clasificadores y contenedores de semillas clasificadas (Variedad)	Tiempo de limpieza de clasificador y contenedores de semillas clasificadas frente a cambio de variedad de semillas	Triangular(55,67.5,75)	Minutos
Tiempo de limpieza de clasificadores y contenedores de semillas clasificadas (Órdenes)	Tiempo de limpieza de clasificador y contenedores de semillas clasificadas entre órdenes de la misma variedad	Triangular(20,25,30)	Minutos
Semillas perdidas en cinta transportadora	Porcentaje de semillas que se pierden en cinta transportadora al salir de contenedores de semillas clasificadas	Triangular(0,1,5)	Porcentaje
Frecuencia de limpieza de tratadores 1, 2 y 3	Horas que transcurren entre limpiezas de cada tratador	Triangular(15,20,25)	Horas
Tiempo de limpieza de tratadores 1, 2 y 3	Tiempo de limpieza de tratadores 1, 2 y 3	Uniform(15,20)	Minutos
Setup Time tratamiento 1	Tiempo de preparación de tratador para realizar el tratamiento 1	Pert(30,38,45)	Minutos
Setup Time tratamiento 2	Tiempo de preparación de tratador para realizar el tratamiento 2	Pert(35,45,55)	Minutos
Setup Time tratamiento 3	Tiempo de preparación de tratador para realizar el tratamiento 3	Pert(40,50,65)	Minutos
Set Up línea de bolsas	Setup Time para línea bolsas cuando cambia variedad, tamaño o tratamiento de la semilla	Uniform(3,5)	Minutos
Set Up línea de cajas	Setup Time para línea bolsas cuando cambia variedad, tamaño o tratamiento de la semilla	Uniform(16,24)	Minutos

*Tabla A.10: Variables aleatorias con su distribución
Fuente: Elaboración propia*

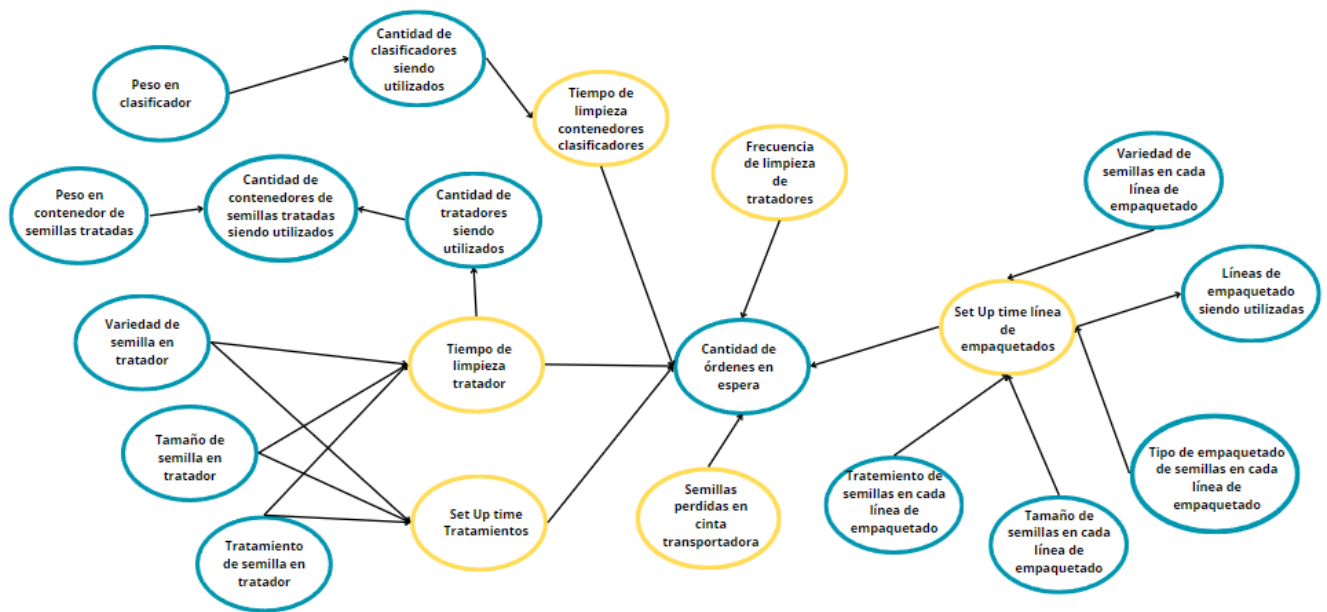


Figura A.18: Relaciones entre variables aleatorias y variables de estado
Fuente: Elaboración propia

PurchaseOrder	SeedVariety	POTotalCount	WeightRequired	TreatmentCount
197874330	1	15	477	1
197874330	2	15	1806	12
197874973	3	9	1871	9
197875668	3	6	1321	6
197887197	4	12	3525	12
197887198	4	12	5340	12
197895709	4	12	2549	12

Tabla A.11: Primera tabla “weight” creada para la primera etapa del proceso
Fuente: Elaboración propia

PurchaseOrder	TreatmentCount	Treatmentnumber	SeedVariety	GradeSize	TreatmentCode2	Weight
197874330	1	1	1	3	2	143
197874330	13	2	2	1	1	31
197874330	13	3	2	1	2	35
197874330	13	4	2	1	3	36
197874330	13	5	2	2	1	30
197874330	13	6	2	2	2	31
197874330	13	7	2	2	3	31
197874330	13	8	2	3	1	231
197874330	13	9	2	3	2	81
197874330	13	10	2	3	3	232
197874330	13	11	2	4	1	31
197874330	13	12	2	4	2	36
197874330	13	13	2	4	3	35
197874973	9	1	3	1	1	74

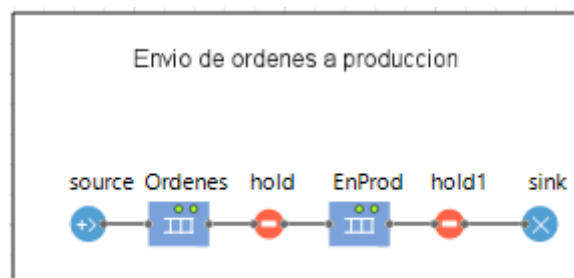
*Tabla A.12: Segunda tabla "treatment" creada para la segunda etapa del proceso
Fuente: Elaboración propia*

Ordenproduccion	PurchaseOrder	POTotalCount	POCount	SeedVariety	GradeSize	Weight_Packaging	WeightRequired	TreatmentCode	PackagingCode
197874330131428021	197874330	1	1	1	3	143	477	2	1
19787433021300012	197874330	15	5	2	1	31	1806	1	2
19787433021346021	197874330	15	4	2	1	35	1806	2	1
19787433021352031	197874330	15	6	2	1	36	1806	3	1
19787433022296011	197874330	15	8	2	2	30	1806	1	1
19787433022300021	197874330	15	7	2	2	31	1806	2	1
19787433022306031	197874330	15	9	2	2	31	1806	3	1
197874330231500012	197874330	15	2	2	3	151	1806	1	2
19787433023800012	197874330	15	14	2	3	81	1806	1	2
19787433023800022	197874330	15	13	2	3	81	1806	2	2
19787433023816031	197874330	15	15	2	3	82	1806	3	1
197874330231500032	197874330	15	3	2	3	151	1806	3	2

*Tabla A.13: Tercera tabla "codes" creada para la última etapa del proceso
Fuente: Elaboración propia*

Diccionario		
Atributo	Codigo original	Codigo anylogic
Seed Variety	LD3309HKNT	1
	LD3309HMRT	2
	LB2783NZZ	3
	LB4827NZZT	4
	LA4793NZZT	5
	BE76	6
	BEC65D565	7
	LD3118VMPT	8
	PR-736	9
	BE565AB	10
	BE86	11
	BE87	12
	BE88	13
	BE89	14
	LD3118VM	15
	BEM56C42	16
Treatment Code	T1	1
	T2	2
	T3	3
Packaging Code	Bags	1
	SP	2

*Tabla A.14: Diccionario creado para codear en Anylogic
Fuente: Elaboración propia*



*Figura A.19: Simulación de la recepción de las órdenes de producción
Fuente: Elaboración propia*

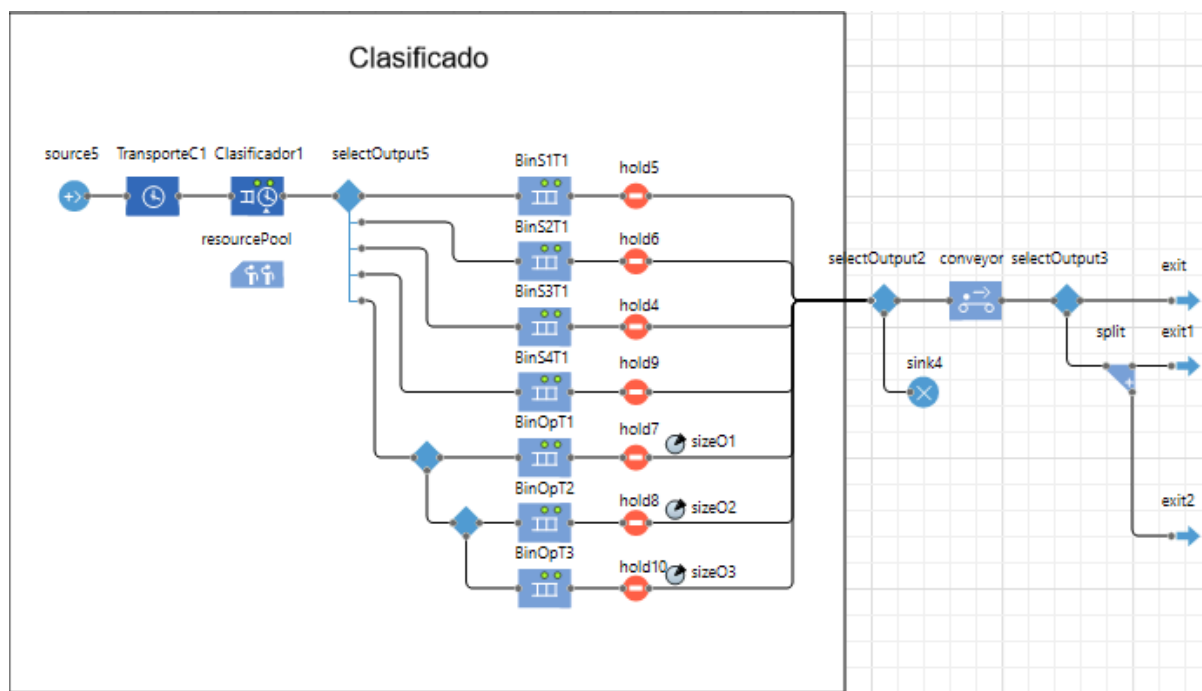


Figura A.20: Simulación de la clasificación y almacenamiento de las semillas
Fuente: Elaboración propia

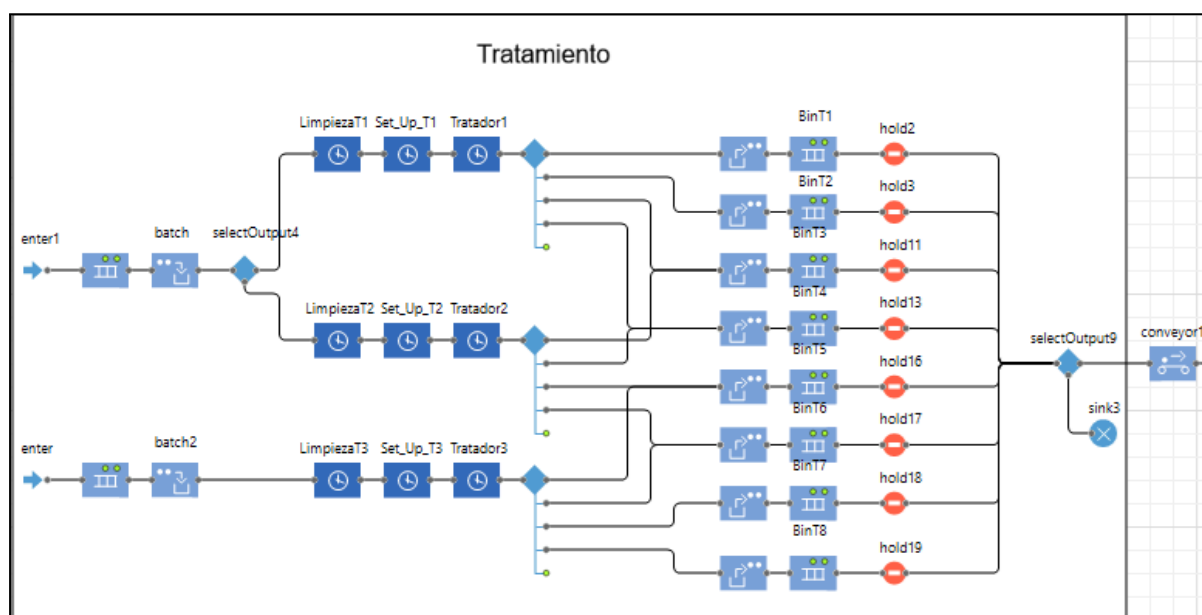


Figura A.21: Simulación del tratamiento de las semillas
Fuente: Elaboración propia

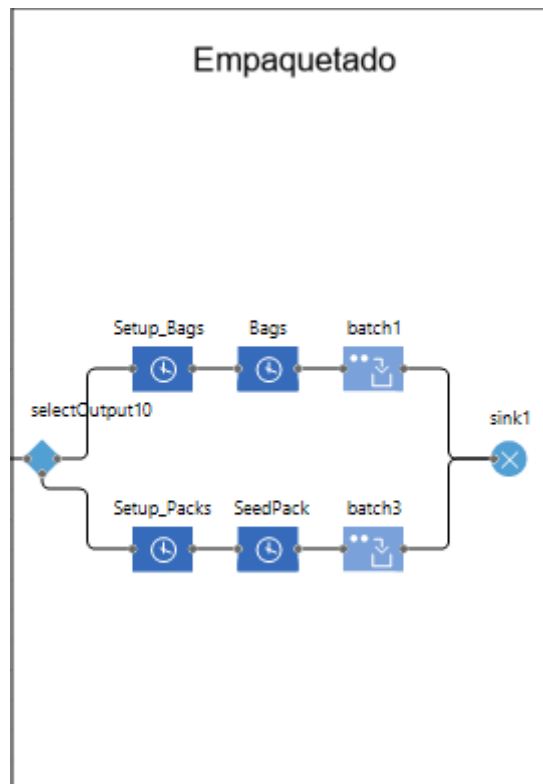


Figura A.22: Simulación del packaging de las órdenes
Fuente: Elaboración propia



Figura A.23: Variables, eventos y funciones que se usan en Tratamiento
Fuente: Elaboración propia

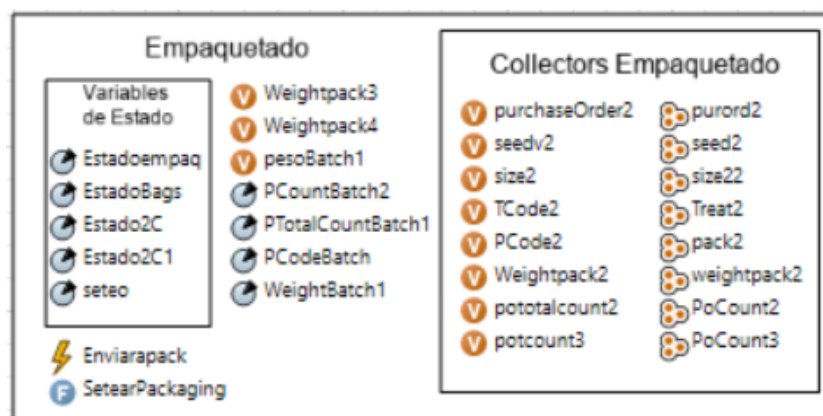


Figura A.24: Variables, eventos y funciones que se usan en Empaquetado
Fuente: Elaboración propia

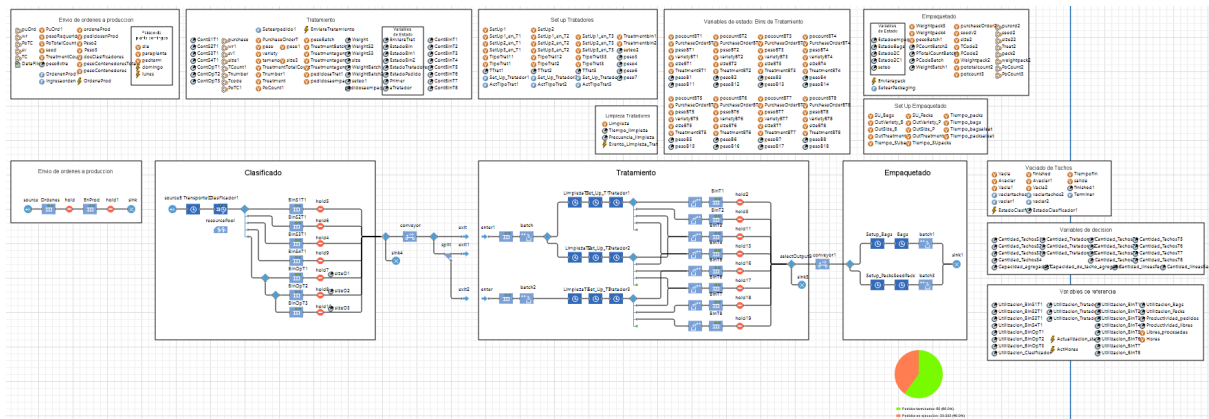


Figura A.25: Simulación completa
Fuente: Elaboración propia

+

source5 - Source

Nombre:

source5

☒ Mostrar nombre

☐ Ignorar

Llegadas definidas por:

Llamadas de función inject()

Ubicación de llegada:

No especificado

▼ Agente

Nuevo agente:

OrdenCompra

Cambiar dimensiones:

☐

Añadir agentes a:

☒ población predeterminada
☐ personalizar población

Empuje forzado:

☒

En la salida:

En la salida:

```

agent.purchaseOrder = PurchaseOrderT;
agent.seedVariety = variety;
agent.pototalCount = PoCount1;
agent.size = 5;
agent.Treatment = 4;
agent.pack=4;

```

Figura A.26: Ejemplo de código extraído en Anylogic 1
Fuente: Elaboración propia en Anylogic

BinT1 - Queue

Agent location:

Advanced

Queuing:

Enable exit on timeout: ☐

Enable preemption: ☐

Restore agent location on exit: ☒

Force statistics collection: ☐

Actions

On enter:

```
PurchaseOrderBT1 = agent.purchaseOrder;
sizeBT1 = agent.size;
varietyBT1 = agent.seedVariety;
TreatmentBT1 = agent.Treatment;
agent.pack = PCode2;
PTotalCountBatch1 = pototalcount2;
```

Figura A.27: Ejemplo de código extraído en Anylogic 1
Fuente: Elaboración propia en Anylogic

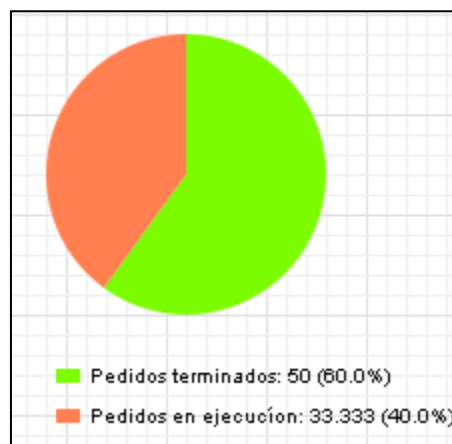


Figura A.28: Gráfico de variable de referencia
Fuente: Elaboración propia en Anylogic

Variables de estado: Bins de Tratamiento			
pocountBT1	pocountBT2	pocountBT3	pocountBT4
PurchaseOrderBT1	PurchaseOrderBT2	PurchaseOrderBT3	PurchaseOrderBT4
pesoBT1	pesoBT2	pesoBT3	pesoBT4
varietyBT1	varietyBT2	varietyBT3	varietyBT4
sizeBT1	sizeBT2	sizeBT3	sizeBT4
TreatmentBT1	TreatmentBT2	TreatmentBT3	TreatmentBT4
pesoB1	pesoB2	pesoB3	pesoB4
pesoB11	pesoB12	pesoB13	pesoB14
pocountBT5	pocountBT6	pocountBT7	pocountBT8
PurchaseOrderBT5	PurchaseOrderBT6	PurchaseOrderBT7	PurchaseOrderBT8
pesoBT5	pesoBT6	pesoBT7	pesoBT8
varietyBT5	varietyBT6	varietyBT7	varietyBT8
sizeBT5	sizeBT6	sizeBT7	sizeBT8
TreatmentBT5	TreatmentBT6	TreatmentBT7	TreatmentBT8
pesoB5	pesoB6	pesoB7	pesoB8
pesoB15	pesoB16	pesoB17	pesoB18

Figura A.29: Variables de Estado de Tachos de tratamiento.

> summary(datos)						
Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.	
1318	1318	1319	1327	1338	1338	

Figura A.30: Resumen estadístico de la variable de horas de producción de las simulaciones
Fuente: Elaboración propia en R

Utilizacion Clasificador	Utilizacion BinS1T1	Utilizacion BinS2T1	Utilizacion BinS3T1	Utilizacion BinS4T1	Utilizacion BinOpt1	Utilizacion BinOpt2	Utilizacion BinOpt3	Utilizacion Tratador1	Utilizacion Tratador2	Utilizacion Tratador3	Utilizacion BinT1	Utilizacion BinT2	Utilizacion BinT3	Utilizacion BinT4	Utilizacion BinT5	Utilizacion BinT6	Utilizacion BinT7	Utilizacion BinT8	Utilizacion EmpaqBags	Utilizacion EmpaqPacks	Productividad Pedidos	Productividad Libras
0.23330343	6.12944524	12.5772108	18.7801913	8.00508699				0.09571115	0.0136827	0.04791011	9.48863465	11.2444936	13.3984415	12.5734402	7.65742411	9.2058979	8.61406743	7.710768433	42.60669861	47.69471036	0.060538117	712.6308
0.23673996	6.20118872	12.5996413	18.7581715	8.29310237				0.09607953	0.01355069	0.04912505	9.13658467	11.123207	11.7108206	11.65974	11.0740301	9.67759101	8.47181015	7.400982303	43.23305557	48.41820269	0.061410159	722.8961
0.23674894	6.21603366	12.6810524	18.3605962	8.69212071				0.09601302	0.01550664	0.04909388	9.02723555	11.5105266	11.7034087	11.6504401	11.0841633	9.67747514	8.45341698	7.387826402	43.2288753	48.4190733	0.061410159	722.8961
0.23673996	6.08110334	12.7316181	18.991109	8.13808332				0.09780756	0.0132472	0.04908501	10.1715048	10.3068196	11.7820677	11.6961319	11.1210977	10.0505206	8.48108924	7.422622983	43.2272432	48.41763983	0.061410159	722.8961
0.23674295	6.03903196	12.7727133	19.0022868	8.0958334				0.09637776	0.01314665	0.04907727	10.0878593	10.4474973	11.7925622	11.981149	10.8245346	9.92707033	8.4904316	7.40172695	43.22790082	48.41880098	0.061410159	722.8961
0.23674594	6.27489622	12.6969254	18.8326837	8.16805807				0.0959265	0.01550551	0.04904914	9.08712779	11.2335039	11.6805483	11.647081	11.0233049	9.65544898	8.44112485	7.384921359	43.22840753	48.41817274	0.061410159	722.8961
0.23673996	5.98408584	12.6558965	18.7895351	8.62870891				0.0946861	0.0149625	0.04909323	10.0947222	10.0718949	11.7301057	11.8994315	10.8128293	9.65932195	8.43438934	7.372559127	43.23298492	48.41871507	0.061410159	722.8961
0.23673696	6.09158581	12.4964137	18.8626122	8.6077305				0.0949416	0.0168608	0.04909693	9.07151424	10.1382085	12.8532565	11.9415698	10.8077822	9.7145444	8.48112071	7.381867126	43.2307155	48.41700398	0.061410159	722.8961
0.23674894	5.68598111	13.0940642	18.8756481	8.44883948				0.09467205	0.0149846	0.04907772	10.0586617	10.195286	11.7402884	11.9030242	10.8078668	9.66248286	8.43252504	7.3693786	43.23475532	48.41880973	0.061410159	722.8961
0.2330634	5.75976152	12.4949091	19.2021549	8.46045407				0.09511711	0.01443495	0.04791362	9.19235262	13.5674716	12.4816674	12.3052651	7.92095295	10.3164801	8.62263804	7.807075626	42.60694945	47.69512028	0.060538117	712.6308
0.23674594	6.02746592	12.4891617	19.0493596	8.46842789				0.09606027	0.01550581	0.04911331	9.06362611	11.3124096	11.7091272	11.6414922	11.101447	9.67743984	8.45753334	7.374389179	43.228628	48.41926714	0.061410159	722.8961
0.23674594	6.05727413	12.8341854	18.8387606	8.04755647				0.09605796	0.01550664	0.04911819	9.17249806	11.6311846	11.7632596	11.7096083	11.1626641	10.0036706	8.51825053	7.437256721	43.23410448	48.41906898	0.061410159	722.8961
0.23674594	5.6615561	12.6203866	19.4043697	8.51119669				0.09425475	0.01536899	0.04905614	9.19066731	11.3113674	11.6872704	11.6479465	11.0908601	9.66535032	8.42828501	7.373945699	43.2347105	48.4187081	0.061410159	722.8961
0.23674295	5.99035679	12.310708	19.4344423	8.3941461				0.09603251	0.01354512	0.04910575	9.08072245	11.2376792	11.6707555	11.620093	11.0749118	9.65809473	8.43319494	7.364340387	43.23375686	48.4190018	0.061410159	722.8961
0.23674295	5.83433144	12.5313491	19.2094539	8.47443569				0.09806638	0.01294613	0.04909403	10.0755526	10.4789168	11.7711605	11.9924262	10.841852	9.93209131	8.4766171	7.411955151	43.23805607	48.41789113	0.061410159	722.8961
0.23674295	6.23848334	12.6854259	18.7689401	8.29330095				0.09767954	0.0139773	0.04908072	9.0181137	11.361658	11.7004168	11.6474401	11.0643182	9.66774187	8.46143638	7.386228606	43.22790754	48.41797523	0.061410159	722.8961
0.2330924	5.85794478	12.4518439	19.3660148	8.29934298				0.09570524	0.0136773	0.04791431	9.79708744	11.8336358	13.3807484	12.3629942	7.65023147	9.82150909	8.62955544	7.818263883	42.60651416	47.69537328	0.060538117	712.6308
0.2331506	6.04229038	12.5288034	18.9805281	8.27544871				0.097112345	0.01174904	0.0479159	10.5724163	11.7588594	13.2352229	12.625912	7.62915105	9.80479088	8.64145828	7.803507903	42.60784102	47.6948586	0.060538117	712.6308
0.23673996	5.67154824	12.3879971	19.2123618	8.9450825				0.09638144	0.01314625	0.04909367	10.0555442	10.1961195	11.7540479	11.9651725	10.7801892	9.66868221	8.44745119	7.385043772	43.22735027	48.41716848	0.061410159	722.8961
0.23674295	6.16454582	12.209357	18.9897943	8.6652683				0.09641011	0.01505445	0.04910988	10.0329413	10.2885287	11.7737763	11.9668372	10.8214951	9.70343192	8.48237916	7.417499425	43.23466255	48.41933231	0.061410159	722.8961
0.23674894	5.97780037	12.828803	18.6892616	8.49690562				0.09476087	0.01499808	0.04912619	10.0253219	10.1890495	11.7534559	11.9524658	10.7811143	9.67428933	8.45512689	7.389551092	43.23483794	48.42030327	0.061410159	722.8961
0.2330634	6.30942182	12.5457572	19.145535	7.70716482				0.09546909	0.01399556	0.04791068	10.2259359	11.8394509	12.577495	12.656377	7.62353162	8.2855859	8.63807147	7.804276219	42.60642669	47.69441187	0.060538117	712.6308
0.2331215	5.89700163	12.8693696	19.1718444	7.9643695				0.0951228	0.0144796	0.04791355	9.12856182	13.0067676	12.5121921	12.3352489	7.89394651	8.81047073	8.60343059	7.785700534	42.60154634	47.69504815	0.060538117	712.6308
0.2331506	6.53588645	12.395928	18.60675	8.05744357				0.09406343	0.01591956	0.04790889	9.13111429	11.5462995	13.6760293	12.6583725	7.6602272	9.87336456	8.65969791	7.806572171	42.6076551	47.69495112	0.060538117	712.6308

Figura A.31: Resultado de las 100 simulaciones iniciales
Fuente: Elaboración propia

Promedio: 0.999015
Valor minimo: 0.992194496
valor maximo: 0.999530236
Desviación estándar: 0.001307

Figura A.32: Datos resumen del nivel de utilización de la clasificadora
Fuente: Elaboración propia en Python

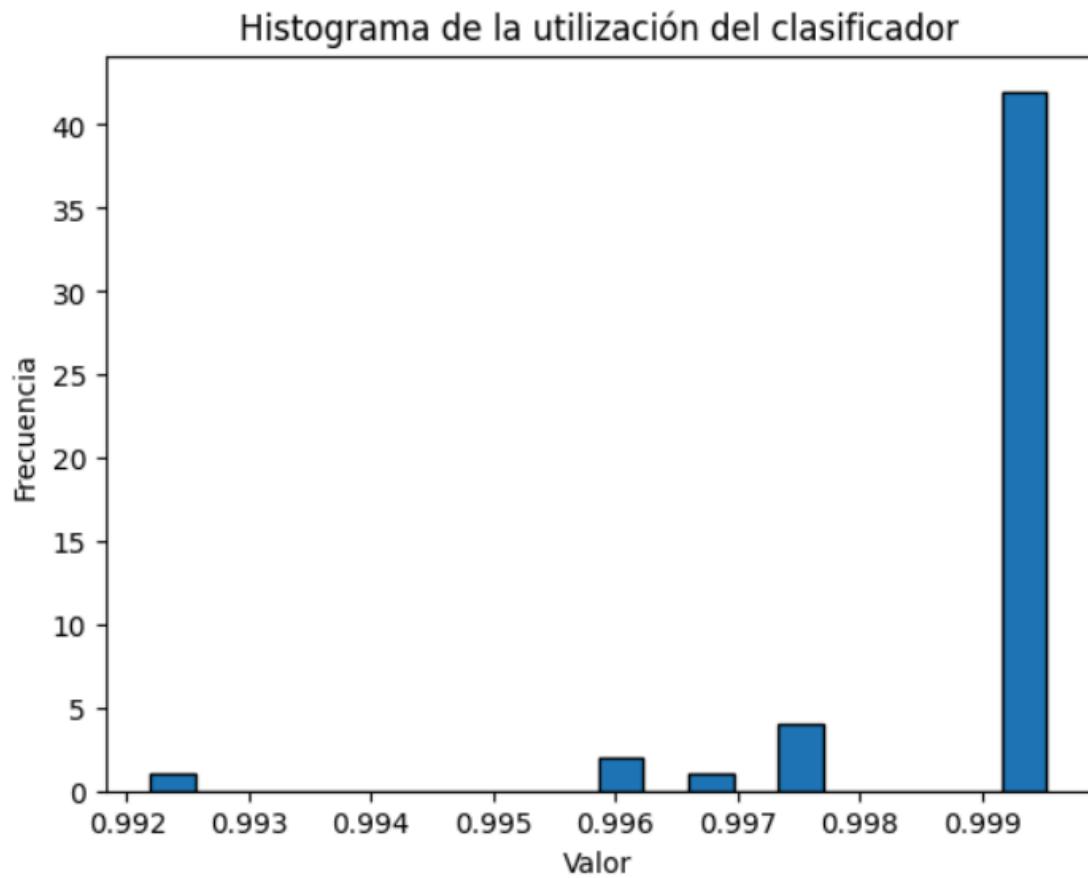


Figura A.33: Histograma del nivel de utilización de la clasificadora
Fuente: Elaboración propia en Python

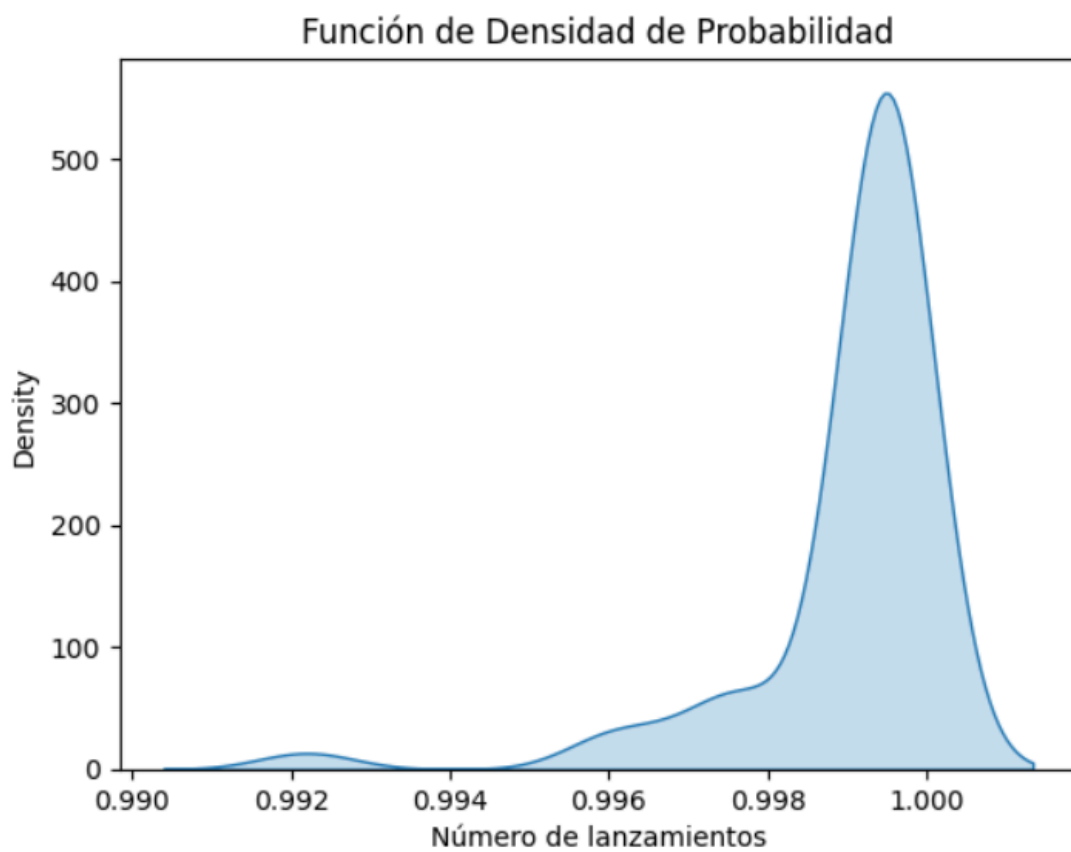


Figura A.34: Densidad del nivel de utilización de la clasificadora
Fuente: Elaboración propia en Python

Prueba de Kolmogorov-Smirnov: Estadístico=0.45652670092067366, p-value=4.793648629219141e-10
Prueba K-S para distribución gamma: Estadístico=0.5804152511804799, p-value=1.618358211266104e-16
Prueba K-S para distribución exponencial: Estadístico=0.4866520210567763, p-value=1.9660448448939253e-11
Prueba K-S para distribución log-normal: Estadístico=0.45644748942358365, p-value=4.832453696485684e-10

Figura A.35: Test de hipótesis para buscar alguna distribución ajustada para el nivel de utilización de la clasificadora
Fuente: Elaboración propia en Python

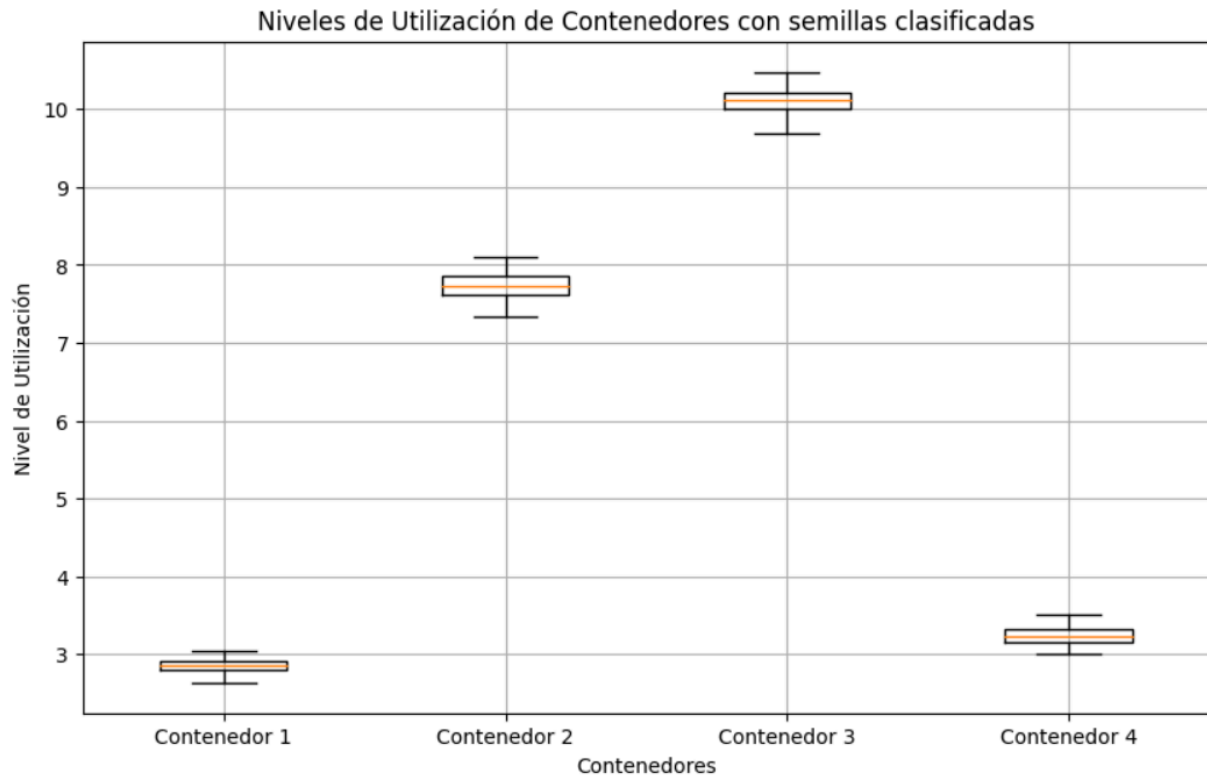


Figura A.36: Boxplots del nivel de utilización de los contenedores de semillas clasificadas
Fuente: Elaboración propia en Python

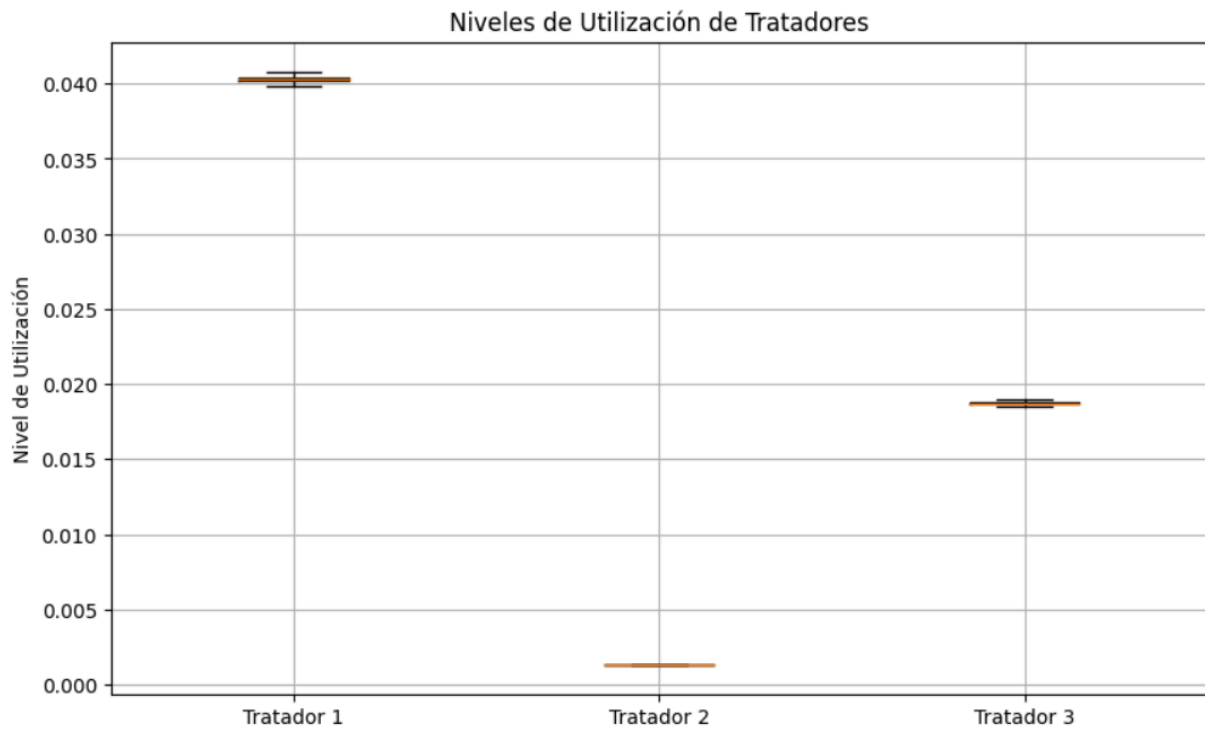


Figura A.37: Boxplots del nivel de utilización de las tratadoras
Fuente: Elaboración propia en Python

Multiple Comparison of Means - Tukey HSD, FWER=0.05						
group1	group2	meandiff	p-adj	lower	upper	reject
tratador1	tratador2	-0.039	0.0	-0.039	-0.0389	True
tratador1	tratador3	-0.0216	0.0	-0.0216	-0.0215	True
tratador2	tratador3	0.0174	0.0	0.0173	0.0174	True

Figura A.38: Test de Tukey del nivel de utilización de las tratadoras
Fuente: Elaboración propia en Python

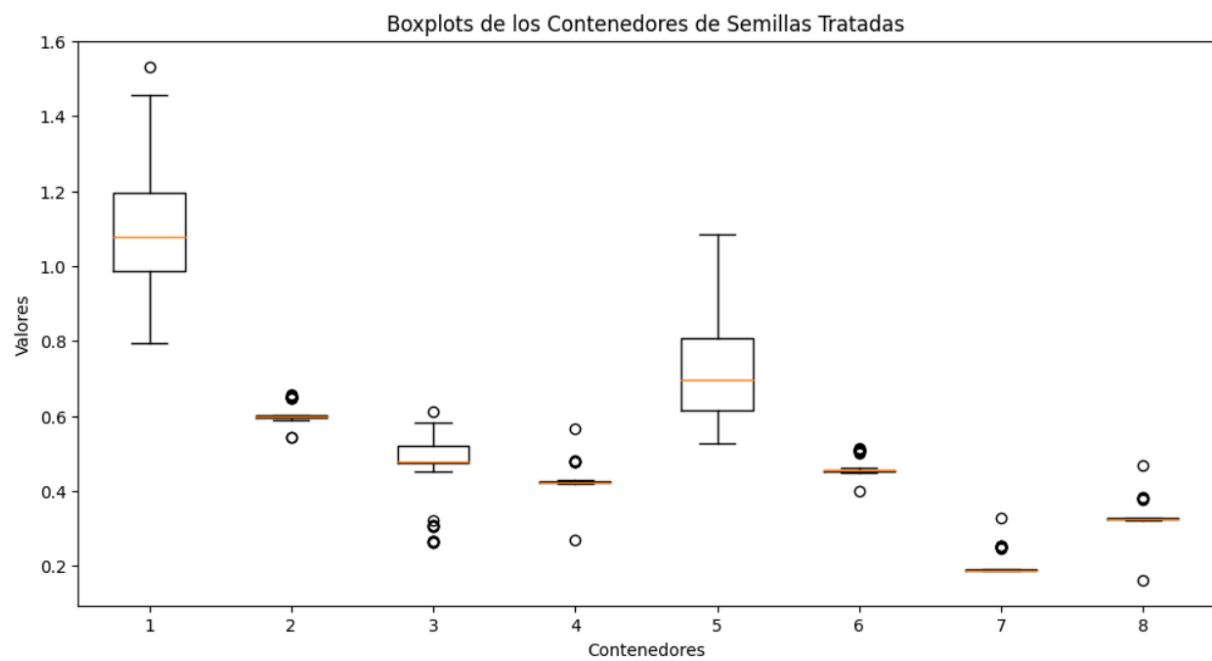


Figura A.39: Boxplots de los contenedores de semillas tratadas
Fuente: Elaboración propia en Python

Histogramas de los Contenedores de Semillas Tratadas

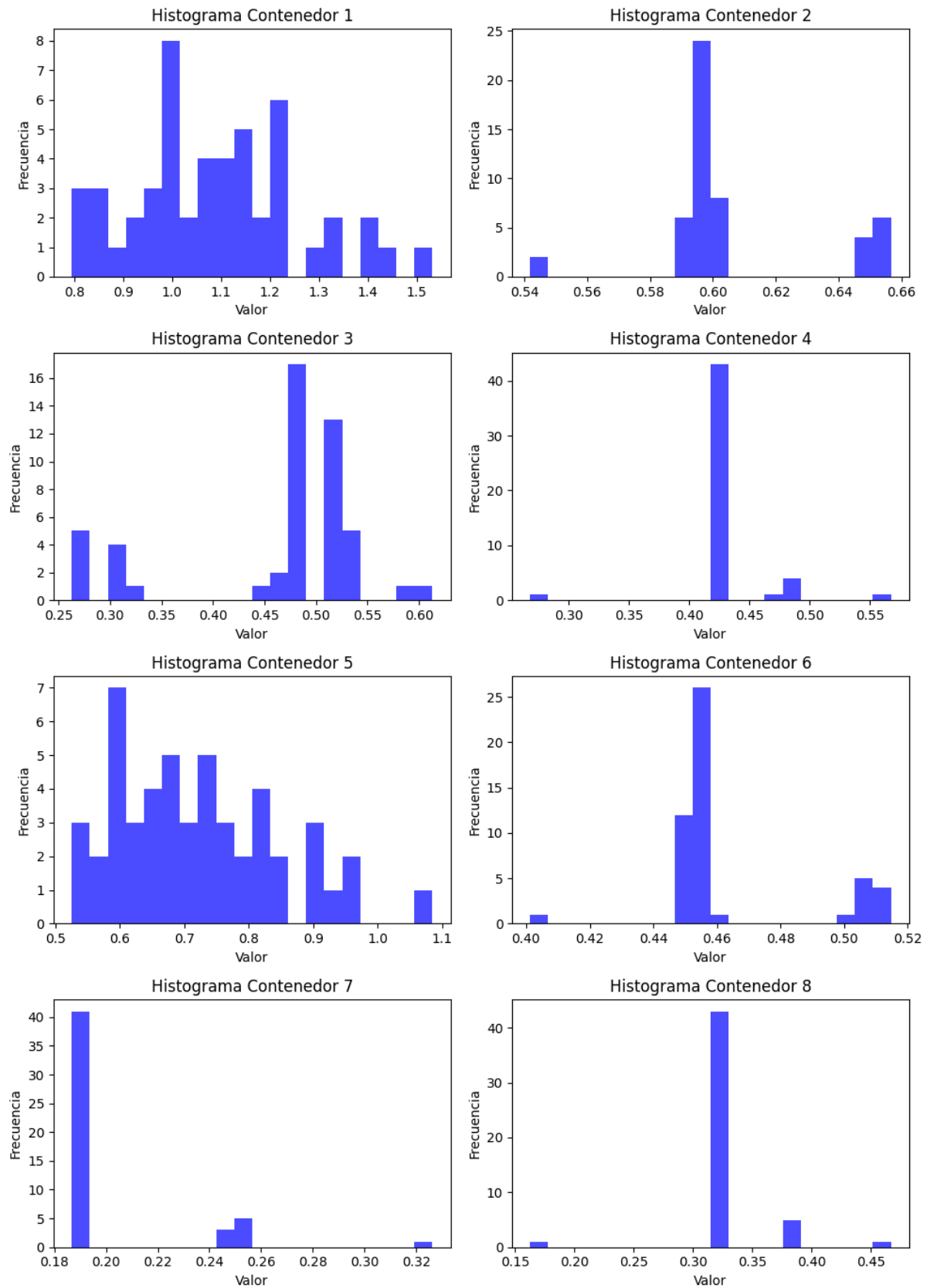


Figura A.40: Histogramas del nivel de utilización de los contenedores de semillas tratadas
Fuente: Elaboración propia en Python

Para el Contenedor 1:
Prueba K-S para distribución gamma: Estadístico=0.06271635092159411, p-value=0.9823551798686349
Para el Contenedor 5:
Prueba K-S para distribución gamma: Estadístico=0.06019159426378673, p-value=0.9885282009536311

Figura A.41: Test de distribución para nivel de utilización de contenedor 1 y 5 de semillas tratadas
Fuente: Elaboración propia en Python

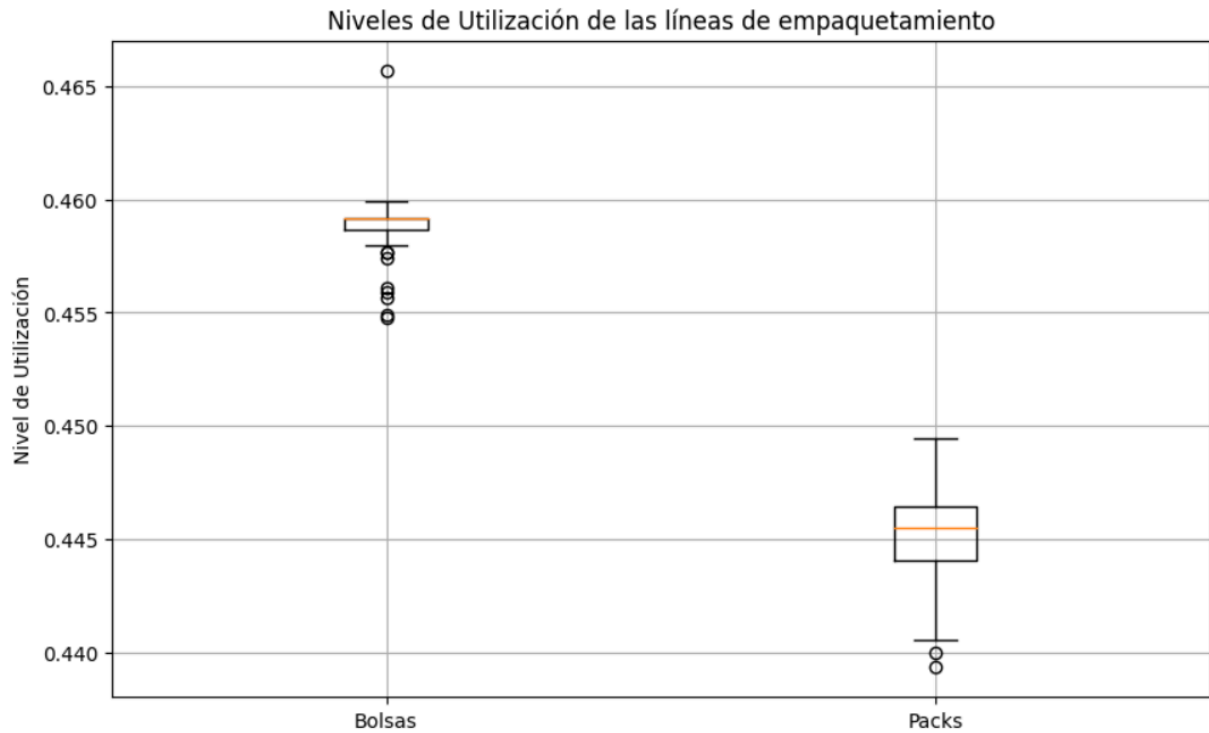


Figura A.42: Boxplots de utilización de las líneas de empaquetado
Fuente: Elaboración propia en Python

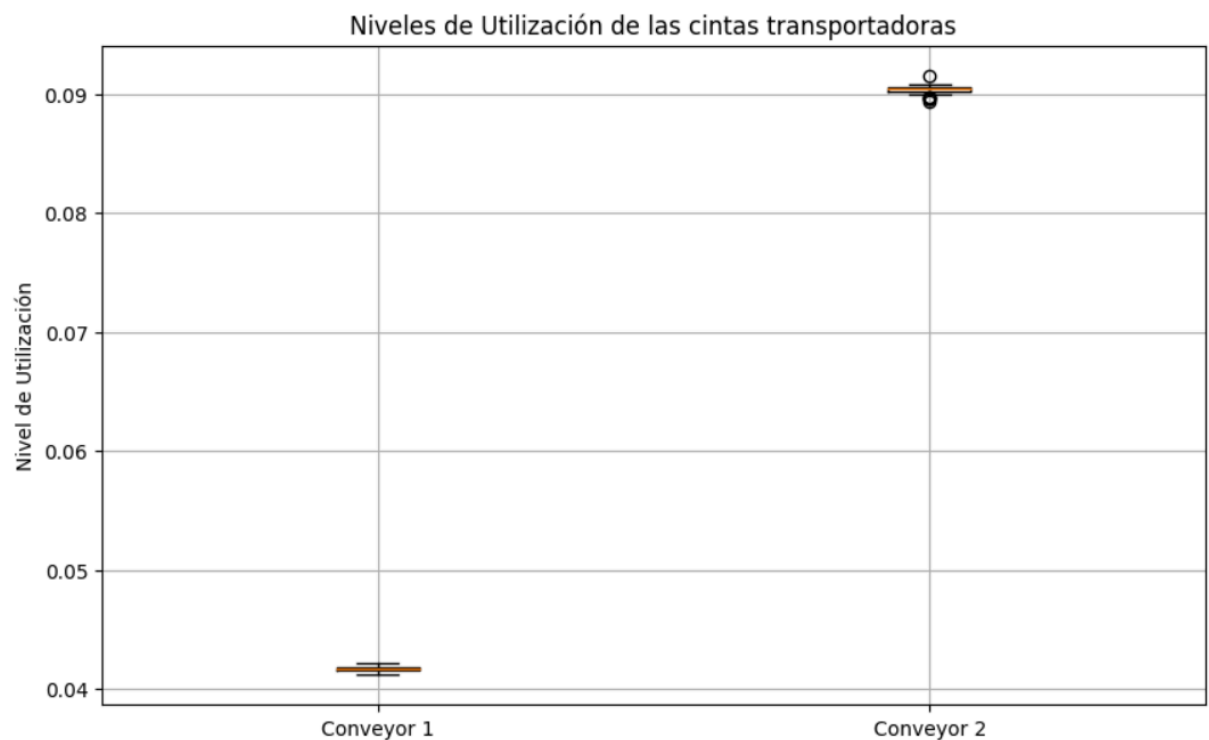


Figura A.43: Boxplots de utilización de las cintas transportadoras

Fuente: Elaboración propia en Python

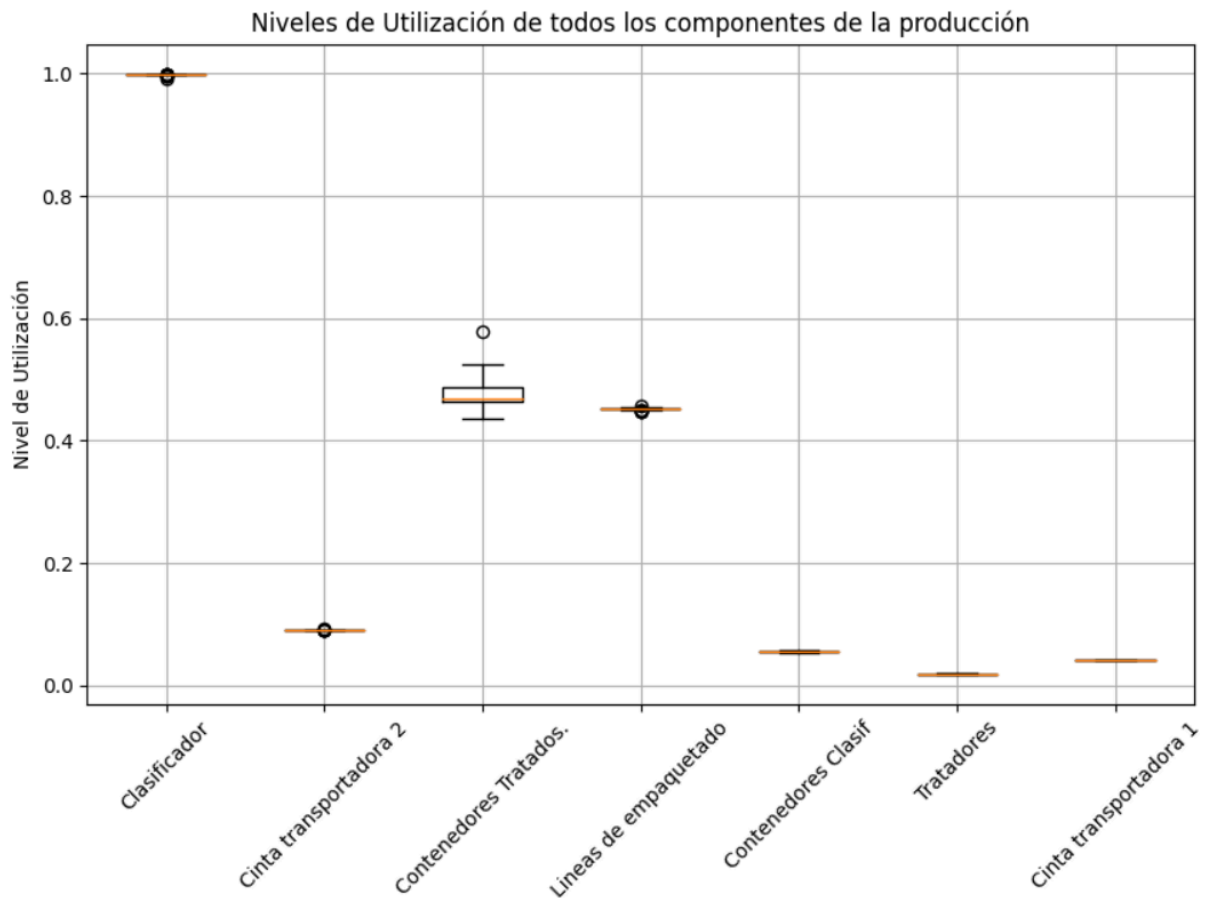


Figura A.44: Boxplots de utilización de todos los componentes de la producción
Fuente: Elaboración propia en Python

group1	group2	meandiff	p-adj	lower	upper	reject
clasificador	conveyor1	-0.9574	0.0	-0.9639	-0.9509	True
clasificador	conveyor2	-0.0951	0.0	-0.1016	-0.0886	True
clasificador	promedio_contenedores1	-0.9441	0.0	-0.9506	-0.9376	True
clasificador	promedio_contenedores2	-0.5218	0.0	-0.5283	-0.5153	True
clasificador	promedio_empaque	-0.547	0.0	-0.5535	-0.5405	True
clasificador	promedio_tratadores	-0.9803	0.0	-0.9868	-0.9738	True
conveyor1	conveyor2	0.8623	0.0	0.8558	0.8688	True
conveyor1	promedio_contenedores1	0.0132	0.0	0.0067	0.0197	True
conveyor1	promedio_contenedores2	0.4356	0.0	0.4291	0.4421	True
conveyor1	promedio_empaque	0.4103	0.0	0.4038	0.4168	True
conveyor1	promedio_tratadores	-0.0229	0.0	-0.0294	-0.0164	True
conveyor2	promedio_contenedores1	-0.8491	0.0	-0.8556	-0.8426	True
conveyor2	promedio_contenedores2	-0.4267	0.0	-0.4332	-0.4202	True
conveyor2	promedio_empaque	-0.452	0.0	-0.4585	-0.4455	True
conveyor2	promedio_tratadores	-0.8852	0.0	-0.8917	-0.8787	True
promedio_contenedores1	promedio_contenedores2	0.4223	0.0	0.4158	0.4288	True
promedio_contenedores1	promedio_empaque	0.3971	0.0	0.3906	0.4036	True
promedio_contenedores1	promedio_tratadores	-0.0362	0.0	-0.0427	-0.0297	True
promedio_contenedores2	promedio_empaque	-0.0253	0.0	-0.0317	-0.0188	True
promedio_contenedores2	promedio_tratadores	-0.4585	0.0	-0.465	-0.452	True
promedio_empaque	promedio_tratadores	-0.4332	0.0	-0.4397	-0.4268	True

Figura A.45: Test de Tukey para las medias de los niveles de utilización de todos los componentes
Fuente: Elaboración propia en Python

Division Clasificadores	1.0	1.2	1.4	1.6
Velocidad Clasificador				
1.0	323.689665	323.303831	351.046550	353.173469
1.5	483.683810	483.033041	529.389517	528.572206
2.0	629.503354	640.757479	688.743529	702.363312
2.5	787.166419	783.924162	862.886337	862.746443

Figura A.46: Resultados a los promedios de la producción para cada experimento
Fuente: Elaboración propia en Python

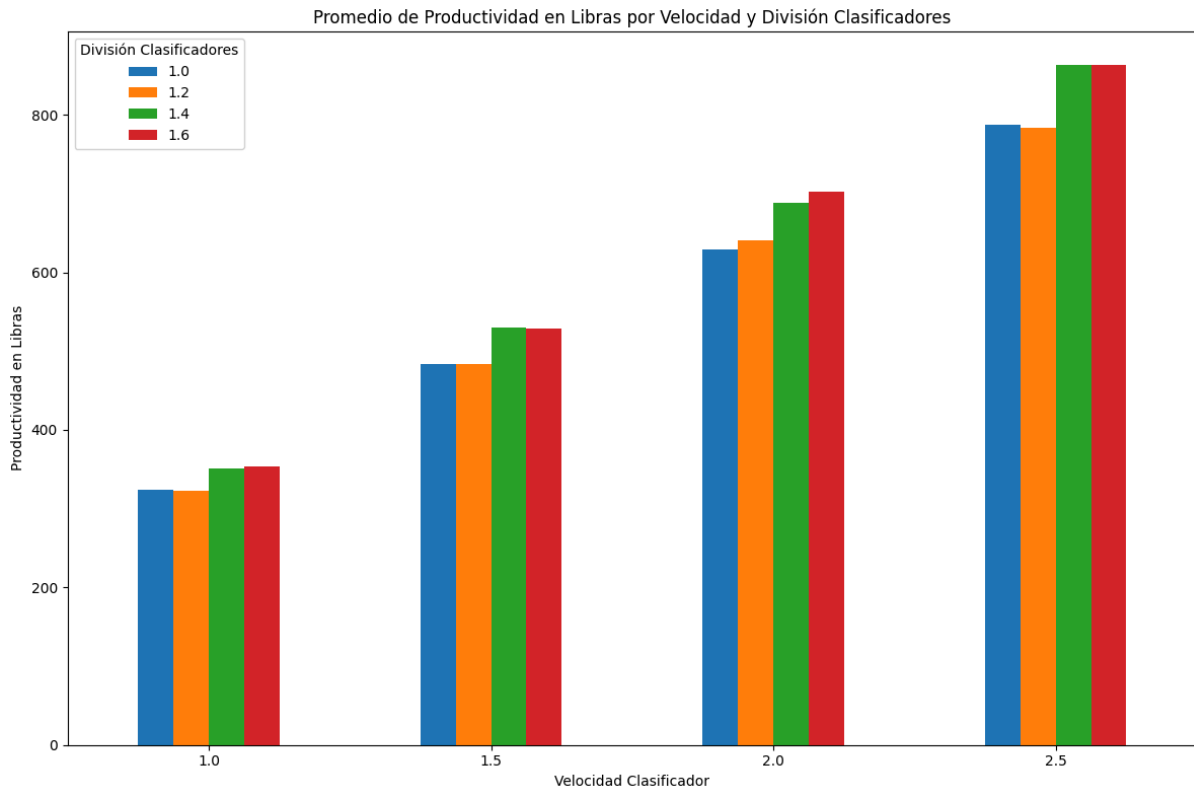


Figura A.47: Resultados a los promedios de productividad en cada uno de los experimentos
Fuente: Elaboración propia en Python

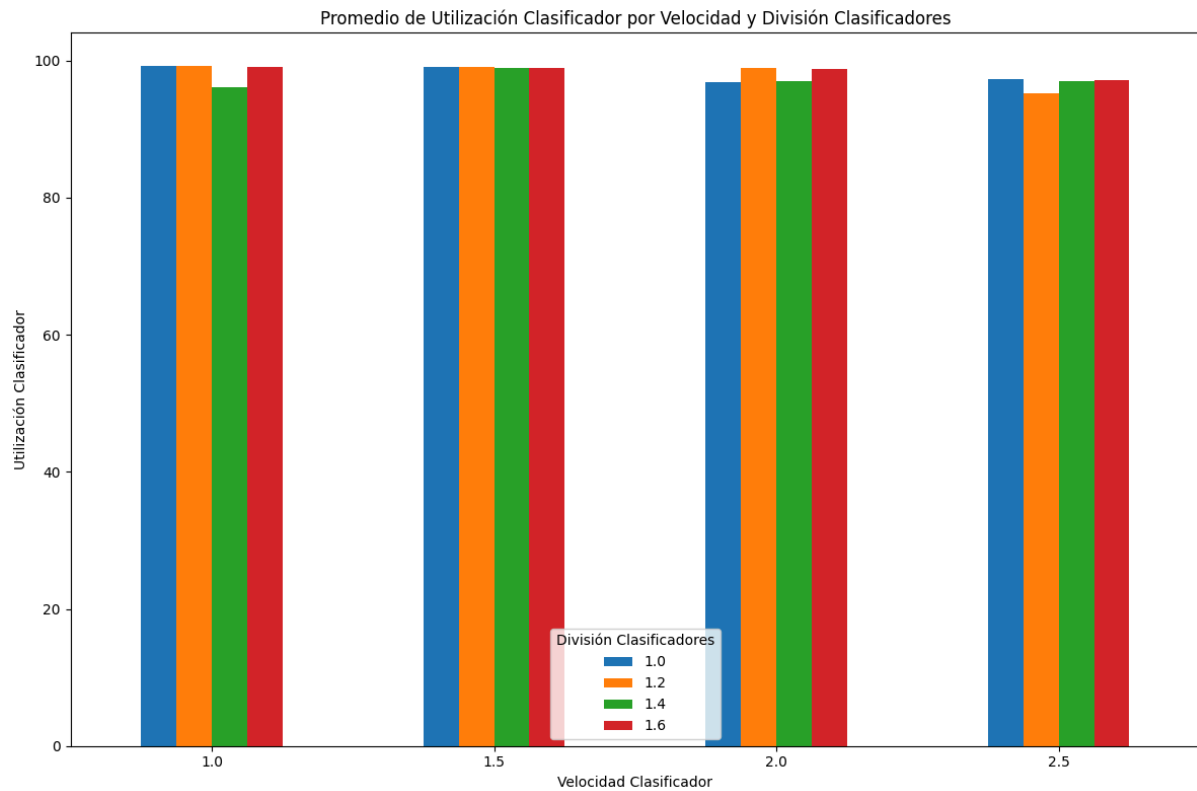


Figura A.47: Resultados a los promedios de utilización del clasificador en cada uno de los experimentos
Fuente: Elaboración propia en Python

P-Value: 0.649017496153212

Las diferencias entre las medias de los grupos no son significativas.

Figura A.48: Al ANOVA para comparar las medias de las alturas de los cuatro grupos
Fuente: Elaboración propia en Python

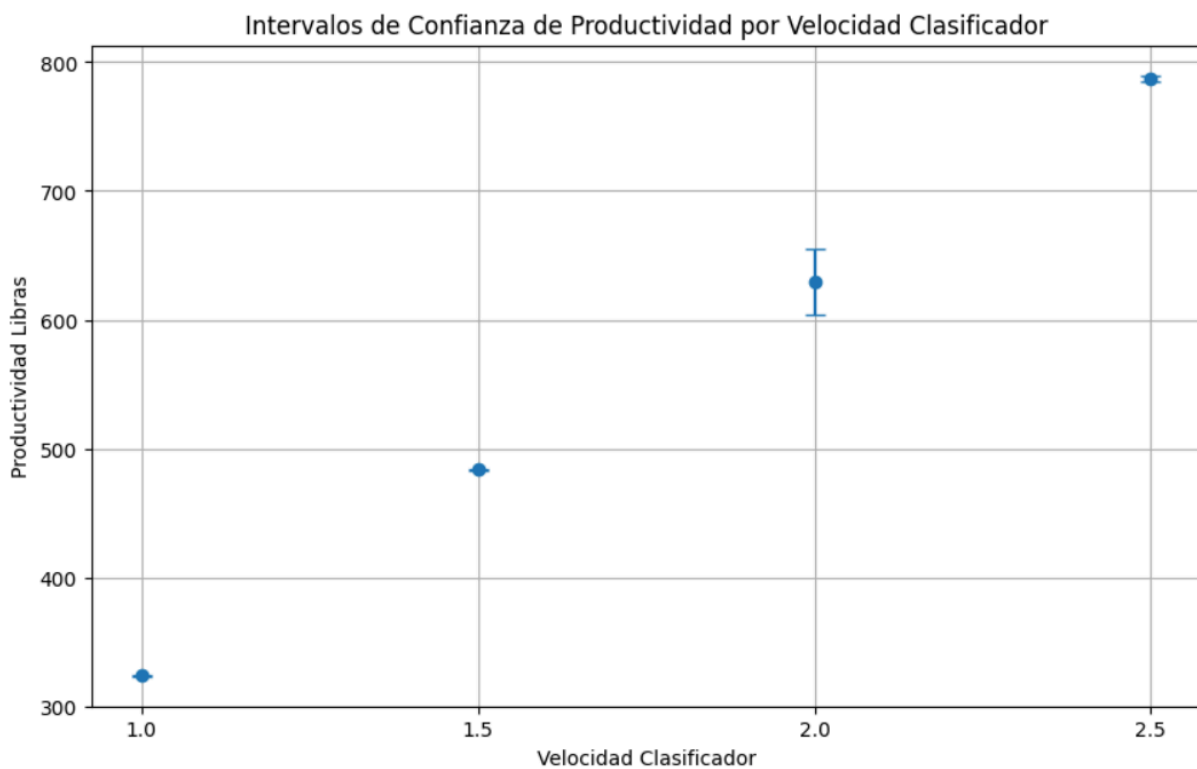


Figura A.49: Intervalos de confianza para la experimentación 1
Fuente: Elaboración propia en Python

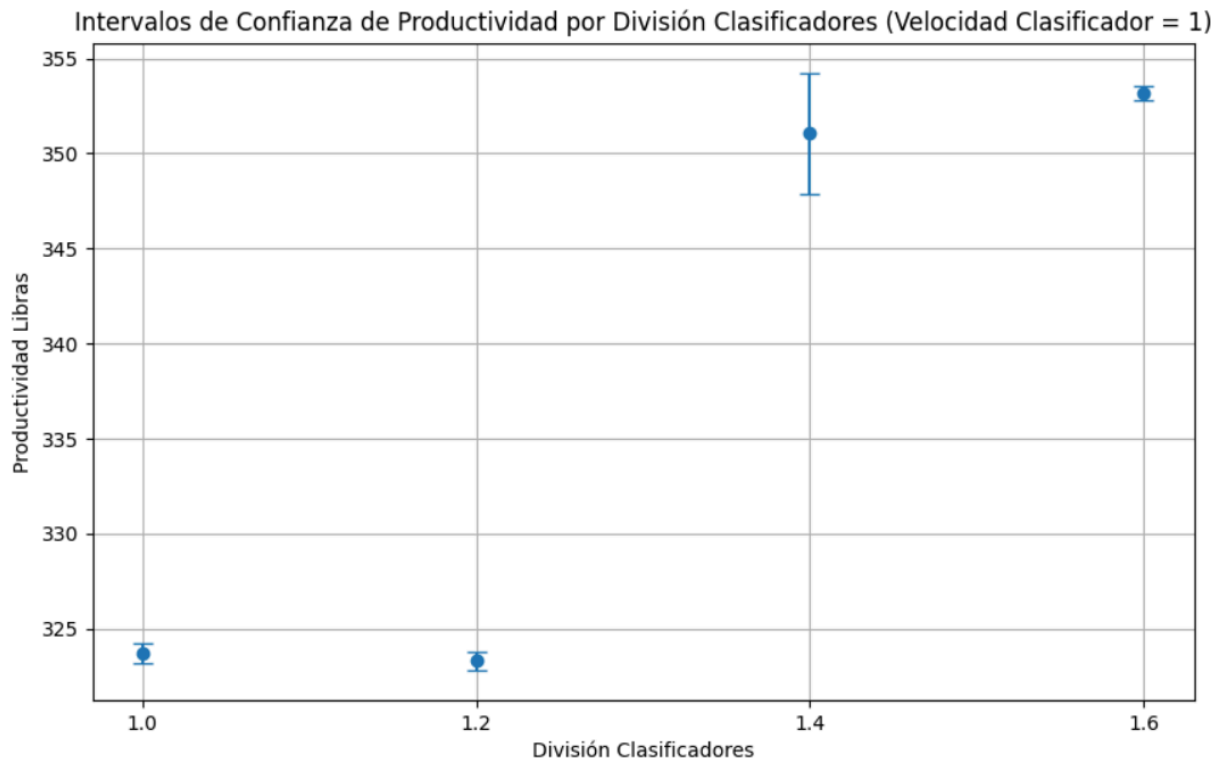


Figura A.50: Intervalos de confianza para la experimentación 2
Fuente: Elaboración propia en Python