

Índice

1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. EL LABORATORIO DE CALIDAD DEL PRODUCTO	6
1.1.1. Ensayos Endurance	8
1.1.2. Ensayos Rolling Resistance	9
1.1.3. Análisis dimensional	10
1.2. OBJETIVOS	10
2. MARCO TEÓRICO	11
2.1. SIMULACIÓN DE EVENTOS DISCRETOS	11
2.1.1. Terminología y funcionamiento de una DES	12
2.1.2. Exposición de un caso ficticio usando una DES	14
2.1.3. Etapas de desarrollo de una DES	18
2.2. TEORÍA DE LA PROBABILIDAD Y DES	23
2.2.1. Variables aleatorias o random	24
2.2.2. Distribuciones de probabilidad	24
2.2.3. Test de hipótesis	25
3. DESARROLLO	26
3.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA, ESTABLECIMIENTO DE OBJETIVOS Y PLAN GENERAL	26
3.2. CONCEPTUALIZACIÓN DEL MODELO	26

3.3. RECOPIACIÓN DE DATOS	27
3.4. TRADUCCIÓN DEL MODELO	29
3.5. VERIFICACIÓN Y VALIDACIÓN	29
4. RESULTADOS	30
5. CONCLUSIONES	37
A. ANEXO I: CÓDIGO FUENTE	39
B. ANEXO II: DIAGRAMAS DE FLUJO	51

1. INTRODUCCIÓN

El sector de la automoción, engloba una gran variedad de industria y servicios dedicados a servirla. Se estima que la aportación económica total de las actividades relacionadas, en este sector, asciende a un 11 % del PIB, lo que la convierte en la industria manufacturera que mas ingresos aporta después del 18,8 % del PIB que posee la industria agroalimentaria española (Díaz y Montorriol Garriga, 2021).

En este sector, el vehículo de propulsión autónoma, es generalmente utilizado tanto por los servicios de transporte a pasajero, como por los servicios logísticos dedicados al transporte de mercancías. Entre los componentes que forman el vehículo autónomo, se encuentran las cubiertas o neumáticos, los cuales se comportan como enlace entre el vehículo y el pavimento. Este nexo permite una transmisión eficiente de la energía producida por el motor de combustión interna, y a su vez, sus propiedades elásticas atenúan las irregularidades de la vía.

La industria manufacturera de cubiertas, ha mantenido un incremento sostenido en su producción en los últimos años, como puede observarse en la Figura 1. El mercado de neumáticos es liderado por dos empresas: Bridgestone y Michelin (Rodgers, 2020). Las demás empresas compiten entre ellas a un magnitud inferior a los lideres del sector, como se aprecia en la Figura 2.

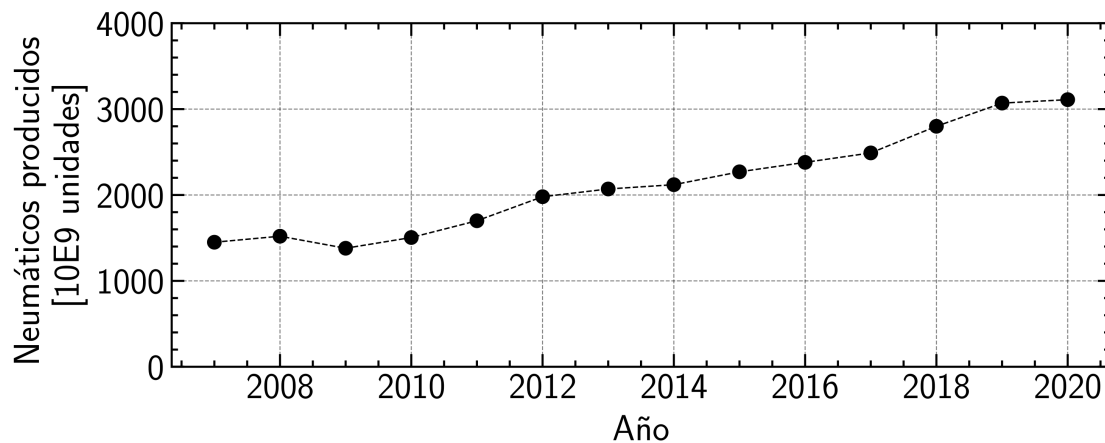


Figura 1: Evolución de la producción mundial de cubiertas (Rodgers, 2020).

La elevada competitividad característica del mercado, sumada a la emergente comercialización de producto asiático, incentiva a las establecidas multinacionales, a tomar un enfoque innovativo, con la intención de mantener su liderazgo (Chicu

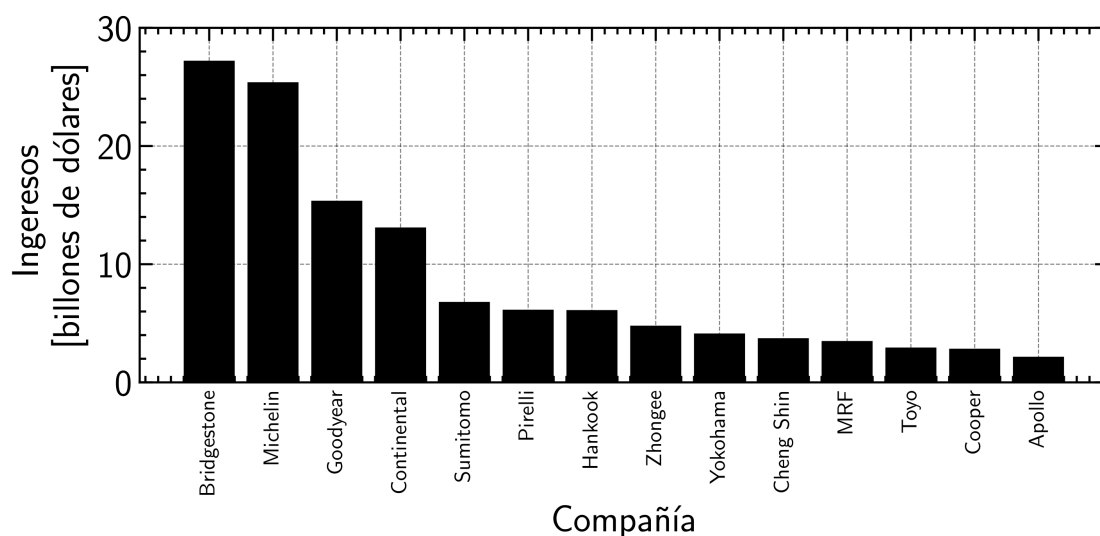


Figura 2: Ingresos de los fabricantes de neumáticos más relevantes en 2019 (Rodgers, 2020).

et al., 2020). El esfuerzo invertido en innovación, por una parte, intenta alcanzar sus objetivos mediante el rediseño y la mejora del producto. Mientras que por la otra, trata de optimizar sus procesos y reducir desperdicios, mediante la automatización y el uso inteligente de los recursos disponibles.

A la hora de implementar mejoras, ya sea a un producto o a un proceso, la monitorización de los resultados se vuelve esencial. El producto o proceso experimental debe satisfacer las expectativas del cliente, y a su vez, cumplimentar la legislación vigente, como los estándares de calidad y medio ambiente. La monitorización de estas mejoras implica un coste elevado, a nivel temporal y económico, ya que estas deben ser puestas a prueba. En el caso del producto, su industrialización, supone reservar recursos que podrían ser destinados a la producción regular. Desde la materia prima utilizada en la elaboración de estos productos experimentales, a través de cada máquina ocupada para transformarlo, hasta llegar a el laboratorio de calidad, donde se realizan ensayos para otorgar feedback a el cliente.

En las empresas de neumáticos, el laboratorio de Calidad del Producto (LCP), es el encargado de llevar a cabo los ensayos relevantes para asegurar la conformidad de la producción. A diario se cerciora de que los neumáticos manufacturados dentro de la planta cumpla con los estándares de calidad definidos por la compañía. El laboratorio logra asegurar la calidad del producto, mediante un control estadístico de las muestras elegidas al azar por cada gamma de producto. Parale-

lamente, una fracción de los recursos disponibles, es demandada por los proyectos de industrialización. Obligando al departamento a equilibrar ambas necesidades.

En un entorno con recursos limitados, donde la demanda no cesa de incrementar, es cuestión de tiempo que los recursos se agoten y la capacidad de el laboratorio se vea sobrepasada. Para hacer frente a esta situación, y poder mantener el esencial ritmo marcado por los estándares de control de calidad e industrialización, debe realizarse un escalado de los recursos del LCP. A fin de que esta expansión, de este sistema complejo, se realice de la manera optima, debe realizarse un estudio de el impacto de las inversiones que podrían realizarse, en la capacidad del LCP. Debido a que experimentar con el sistema real, y desarrollar una solución analítica no es factible, se ha propuesto el uso de la simulación. Dentro de los tipos de simulación, existen varias alternativas.

- Simulación Monte Carlo: Este tipo de simulaciones toma el nombre del famoso casino ubicado en Mónaco. Este tipo de simulación se caracteriza por desencadenar un evento una y otra vez con el fin de obtener los resultados esperados. Suele ser utilizado con el fin de aproximar expresiones matemáticas complejas. Este método puede ser usado, por ejemplo, para determinar la probabilidad de que un dado obtenga como resultado al menos un 5 en 4 de cada diez tiradas. Siendo esta aproximación tan sencilla, resulta fácil de implementar, aunque el análisis de los resultados puede verse limitado debido a su sencillez.
- Cadena de Markov: La cadena de Markov, es un modelo estocástico que describe una secuencia de posibles eventos, en los que la probabilidad de cada evento depende únicamente del estado del evento anterior. Mediante este modelo, se pueden representar de manera sencilla sistemas estadísticos complejos. Mientras que este tipo de simulación es comúnmente utilizado en la cuántica, los procesos industriales presentan una gran interdependencia entre procesos, reduciendo la variedad de procesos que pueden ser efectivamente modelados por este tipo de simulación.
- Simulación de Eventos Discretos (DES): Las DES toman el enfoque de representar sistemas reales mediante la ejecución y concatenación de procesos en un entorno virtual. Esta representación computacional, se asemeja al sistema real. La DES ha demostrado su capacidad de resolver problemas de optimización en sistemas estocásticos. Como menciona el (Allen, 2011), su versatilidad ha sido demostrada en numerosos ámbitos, como aplicaciones militares, sistemas sanitarios, problemas logísticos y optimización de procesos de manufacturación.

1.1. EL LABORATORIO DE CALIDAD DEL PRODUCTO

A lo largo del proceso de fabricación de una cubierta, son varios los estándares de calidad que debe cumplir el producto para que pueda ser vendido en los distintos mercados a nivel global. Desde la composición química de las materias primas usadas, hasta las propiedades físicas del producto finalizado, la certificación de que el producto se halla dentro de los límites especificados, asegura un producto de calidad.

En el proceso final de control de calidad que se lleva a cabo en un laboratorio de evaluación del producto, estos son los ensayos principales.

- Ensayos *Endurance*
- Ensayos *Rolling Resistance*
- Ensayos dimensionales

En el LCP, son dos clientes internos los que comparten los recursos disponibles. Por una parte, se encuentran los procesos de conformidad de la producción (CP), encargados de aseguramiento de la calidad de el producto destinado a la venta a clientes. Por otra parte, se encuentran los procesos de desarrollo de nuevos productos, o el departamento de industrialización (IND), encargados de desarrollar nuevas líneas del producto, y optimizar los procesos de producción mediante cambios controlados que suceden en grupos reducidos. Finalmente, se reciben solicitudes de ensayo de ajenos al laboratorio, que simularían los encargos particulares que recibe el laboratorio, a través de otras vías (EXT). Para este caso, en el LCP, se ha estimado que, estas 3 fuentes de muestras de ensayo suman la cantidad descrita en la tabla 1. La cual está cerca, de los límites de capacidad teóricos para un laboratorio con el equipamiento descrito en las tablas 4 y 5. Las perspectivas de futuro, prevén que el incremento de la actividad en el mercado continúe, por lo que el LCP deberá afrontar una demanda superior a su capacidad estimada.

El flujo de los procesos llevados a cabo en el laboratorio, se representa en la Figura 3.

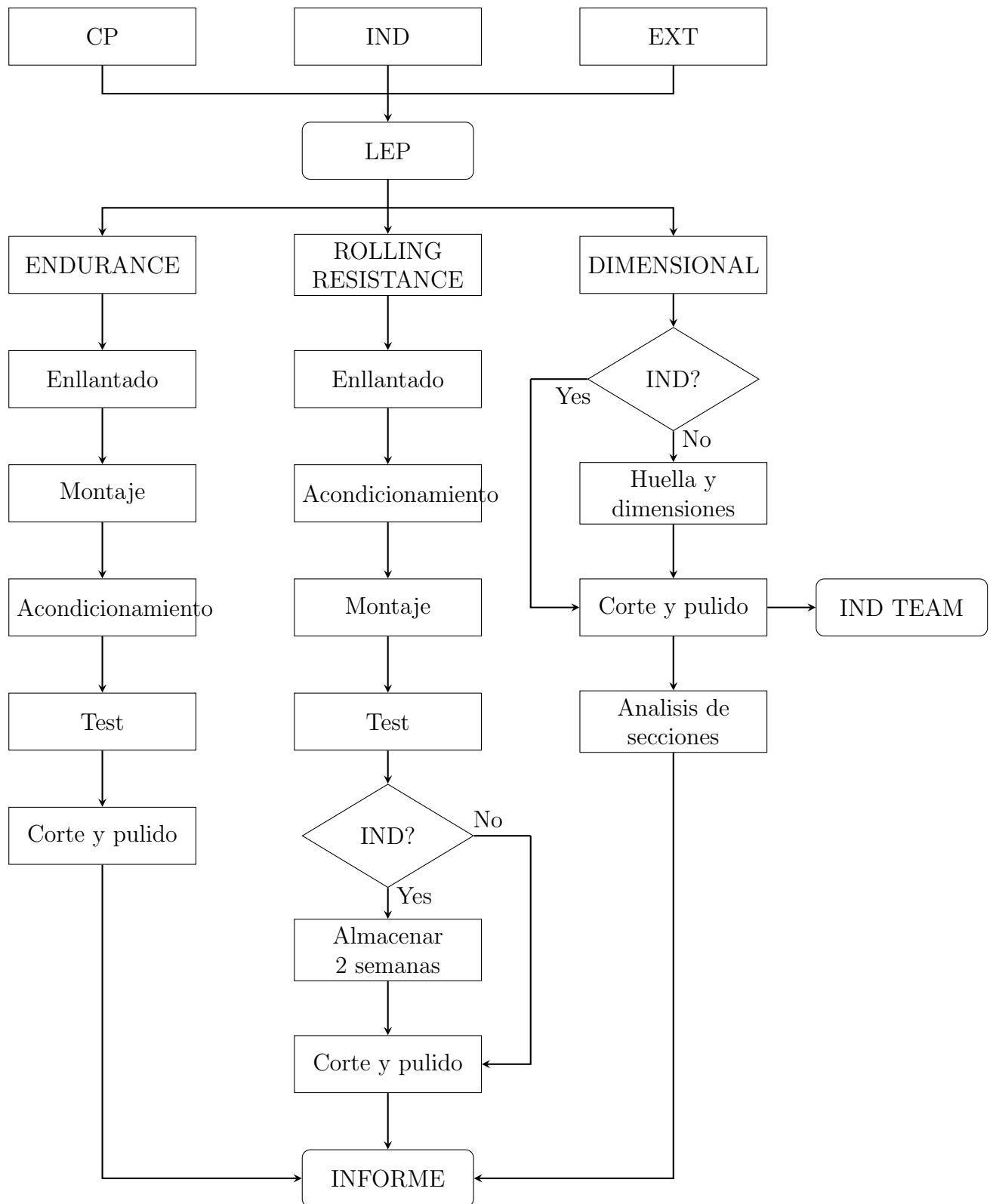


Figura 3: Diagrama de flujo de los procesos llevados a cabo en el Laboratorio de Evaluación del Producto.

Cuadro 1: Suma de la demanda estimada de ensayos por tipo de ensayo.

Ensayo	Demanda (unds.)
Endurance	280
Rolling	760
Dimensional	140



Figura 4: Maquina utilizada en los ensayos Endurance

1.1.1. Ensayos Endurance

Estos ensayos someten a las cubiertas a unas condiciones particularmente extremas que no se llegan a alcanzar dentro del margen de uso habitual para el que están diseñadas. El ensayo consiste en hacer rodar el objeto de ensayo durante un periodo aproximado de 72 horas a una temperatura constante de 40 °C, aumentando la carga en pasos discretos a lo largo del test.

El laboratorio dispone de 4 maquinas similares a la que aparece en la Figura 4, cada una de ellas teniendo la capacidad de montar hasta 2 cubiertas.

El ensayo se comunica como exitoso si el objeto de ensayo no ha sufrido deformaciones antes de el tiempo específico para cada producto. Una vez finalizado el test, 2 secciones se cortan y se pulen por un operario y se almacenan para la elaboración del informe.



Figura 5: Maquina utilizada en los ensayos Rolling Resistance

1.1.2. Ensayos Rolling Resistance

El objetivo de este ensayo es determinar el consumo energético de la cubierta debido a la fricción causada mientras rueda. La maquina que aparece en la Figura 5 mide la resistencia que ofrece el objeto de ensayo a 25 °C. La duración media del ensayo es de unas 3 horas. La particularidad de este ensayo consiste en que el resultado es sensible a la presión de inflado y temperatura de la sala. Debido a esto, la mayor parte del ensayo consiste en asegurar que la cubierta alcance el estado estable, siendo los últimos 10 minutos el tiempo en el que ocurre la medición de la resistencia a la rodadura.

El laboratorio dispone de una maquina capaz de realizar estos ensayos. Dentro de la sala de la maquina, hay espacio para almacenar cubiertas para que estén acondicionadas a la hora de preparar el siguiente ensayo.

1.1.3. Análisis dimensional

El objetivo de este ensayo es verificar que tanto las dimensiones generales de la cubierta, como sus componentes internos quedan dentro de la tolerancia de las especificaciones.

Para ello, el laboratorio dispone de 2 técnicos adicionales que se dedican únicamente a llevar a cabo estos análisis.

1.2. OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es proveer a la planta hipotética de cubiertas con la información necesaria para la optima expansión del LCP. Este trabajo se limitara a analizar los distintos escenarios investigados, ofreciendo métricas e información cualitativa sobre las distintas posibilidades, para finalmente decantarse por la mejor opción.

Para lograr el objetivo final se deberán completar los siguientes subobjetivos:

- Modelar los procesos del LCP de acuerdo a los fundamentos de una DES, obteniendo un modelo ajustado a la realidad.
- Definir las variables independientes del proceso, que posteriormente serán usadas en la simulación.
- Estimar el tiempo de ciclo de cada proceso, a través de la asignación de distribuciones ajustadas a cada subproceso.
- Definir las variables dependientes que otorgara el sistema a la salida.
- Desarrollar un programa de simulación en el entorno de Python mediante el uso de la librería Simpy. Dicha simulación, sera capaz de emular los distintos escenarios propuestos durante el desarrollo.
- Proponer una alternativa de la distribución de los recursos actuales para asegurar la capacidad del LCP cuando en el futuro aumente la demanda de ensayos.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. SIMULACIÓN DE EVENTOS DISCRETOS

Con el avance tecnológico experimentado desde los inicios de la computación, nuevas maneras para afrontar la resolución de problemas han surgido, que un siglo antes, habrían sido descartadas por su falta de viabilidad. La capacidad de cálculo y el diseño de inteligencias artificiales, a proporcionado las herramientas necesarias para solucionar aquellos problemas, que con métodos clásicos, definitivamente demasiado complejos para modelar. La simulación, hoy en día, es una de las tres metodologías consolidadas, en el ámbito científico e ingenieril, para la resolución de problemas (Banks, 1998). Siendo esta metodología descrita como “la técnica del ultimo recurso”, por (Garzia et al., 1986), debido a la intensa demanda computacional que requería en el momento de su publicación, el transcurso de los años ha mermado esta desventaja.

Diversos autores describen la simulación de la siguiente manera

- “Una simulación es el establecimiento de un modelo lógico-matemático de un sistema y la manipulación experimental de este en una computadora digital (Pritsker, 1974)”.
- “La simulación es el proceso de diseñar el modelo de un sistema real y realizar experimentos con este modelo con el propósito de, entender el comportamiento del sistema, o evaluar distintas estrategias (dentro de los límites impuestos por un criterio o conjunto de criterios) para la operación del sistema” (Shannon and Johannes, 1976).
- “Una simulación es la imitación de el modo de operación de un proceso real o sistema durante el transcurso del tiempo” (Banks, 1999).

Como se puede observar, el modelo, es un termino recurrente en el ámbito de la simulación. Banks sostiene que el modelo es la representación del sistema simulado (Banks, 1998). El autor matiza que la virtud de un modelo radica en su complejidad, siendo necesario el balance entre una representación ajustada, sin complicar en exceso el modelo. Por tanto, aquellos factores que no influyan lo suficiente en los resultados de la simulación, deberían ser eliminados, ya que únicamente extienden el proceso de desarrollo.

El modelo, por tanto, constituye la base de la simulación, define las variables, y criterios para las decisiones tomadas en la simulación. Banks señala, la distinción entre un modelo matemático convencional y el modelo de una simulación (Banks, 1998). Los modelos matemáticos y estadísticos suelen representar las variables de manera explícita, relacionando variables independientes y variables dependientes para obtener un resultado. En el caso de una DES, el modelo utilizado se enfoca en la representación de sus componentes internos y sus interacciones.

El funcionamiento de la DES, se basa en registrar los cambios que van ocurriendo en el estado del sistema durante el transcurso del tiempo. En el intervalo entre alternaciones de estado, ocurren el concepto de eventos, propios de esta rama de simulación. Varga (Varga, 2001) describe estos eventos como instantáneos, siendo la duración de los mismos nula. Durante el evento no ocurre nada especial, salvo la alteración del estado del sistema. Una sencilla representación de este concepto puede ser observada en la Figura 6, donde el sistema representado es un coche. El coche posee 3 estados, los cuales se van sucediendo, durante el transcurso del tiempo.

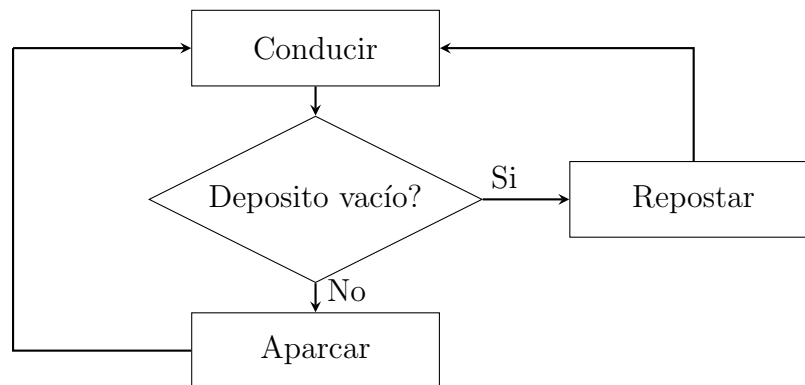


Figura 6: Representación del cambio de estado en una DES, los rectángulos representan el estado del sistema, mientras que las flechas indican el suceso de un evento instantáneo.

2.1.1. Terminología y funcionamiento de una DES

Para describir detalladamente este tipo de simulaciones, es necesario definir previamente algunos conceptos. Los siguientes conceptos son la síntesis de la información redactada por (Banks, 1998) aplicados en el entorno de Python y su librería Simpy.

Las variables del estado del sistema proporcionan información acerca de el comportamiento de los procesos que se llevan a cabo durante la simulación. Determina las variables de estado que el programa debe retornar depende de el objetivo del proyecto. El programa deberá ser diseñado entorno a ellas, puesto que, serán usadas para el posterior calculo de indicadores del rendimiento. Un ejemplo, es el momento de inicio y fin de un subproceso.

Las entidades son los objetos representados por el modelo. Se distinguen dos tipos de entidades, las dinámicas y las estáticas. Las primeras, avanzan en el sistema a través de los procesos simulados, mientras que las segundas, dan servicio a las primeras permaneciendo ocupadas en el proceso. Considerando una gasolinera como sistema, la entidad dinámica seria un coche repostando combustible, mientras que la estática, seria la estación de repostaje. Estos objetos pueden poseer atributos, como el consumo de combustible o el tamaño de su deposito. Dependiendo de el objetivo de la simulación, algunos atributos serán relevantes en diseño del modelo.

Un recurso es una entidad que provee de servicio a una entidad dinámica. Los recursos pueden servir a múltiples entidades simultáneamente. De manera similar, una entidad puede solicitar varios tipos de recursos en distintas cantidades. Si la demanda de una entidad no se satisface, esta entrara en una cola, a la espera de la liberación del recurso. Cuando la entidad tome el recurso, lo mantendrá ocupado durante la duración del proceso. Los recursos pueden tener varios estados, como disponible, ocupado, averiado, en mantenimiento. . . Un ejemplo de recurso, puede ser el número de estaciones de autoservicio que posee una gasolinera.

Una actividad es un periodo de tiempo, el cual es conocido previo a su inicio. Su duración puede ser determinada de varias maneras; mediante una constante, una distribución estadística, el resultado de una ecuación, un archivo o una decisión lógica. El conocimiento de su duración, supone saber cuando un recurso sera liberado, lo que facilita el trabajo de computación.

Una demora es un periodo de espera indefinido antes del comienzo de una actividad. Este depende de la ejecución de el resto de actividades prioritarias, por lo que el final de la espera no se puede determinar mientras el recurso siga ocupado.

Un evento ocurre al principio y al final de una actividad o demora. Marcan la transición de el sistema de un estado a otro.

Considerando todos estos conceptos, las entidades del sistema compiten entre ellas por el uso de los recursos, si estos no se encuentran disponibles, quedan a la espera de poder solicitarlos. Tanto las actividades como las demoras reclaman estas entidades durante los intervalos entre eventos, siendo liberadas para el siguiente proceso una vez finalizado el periodo. Una DES, puede describirse como el avance de una entidad o conjunto de entidades a través de las actividades que modelan el proceso real. Este avance es accionado mediante el transcurso de tiempo virtual dentro de la simulación.

2.1.2. Exposición de un caso ficticio usando una DES

Con el objetivo de ilustrar los conceptos descritos en la sección 2.1.1 y demostrar la capacidad de resolución de problemas de la DES, se ha procedido a emular un caso práctico.

Supóngase que un ayuntamiento ficticio desea disminuir los problemas causados por el congestionamiento del tráfico en la ciudad. El ayuntamiento solicita a una consultoría ingenieril desarrollar un proyecto para observar el desempeño de las distintas soluciones planteadas. La consultoría ve apropiado usar una DES para valorar el impacto de las distintas propuestas y proponer un plan de acción óptimo a la entidad contratante.

El objetivo principal de el ayuntamiento es minimizar la cantidad de vehículos que circulan por la ciudad. Una de las causas de congestión apunta a una estación de repostaje con unos precios particularmente competitivos que causa complicaciones a la entrada de la ciudad. Se cree que su capacidad de abastecimiento no es suficiente durante los picos de alta actividad. Por otra parte, la ciudad es un potente centro de actividad comercial. Muchos empleados se desplazan a diario en coche, lo que sumado a los espacios limitados de estacionamiento, y la alta densidad poblacional, hace sospechar que los conductores se demoran en exceso a la hora de buscar parking. Se teme que este tiempo adicional, sea un factor considerable en las emisiones totales de los vehículos.

Con las siguientes dos medidas se espera obtener una reducción del congestionamiento del tráfico en la ciudad.

- Primeramente, negociar un ampliamento del servicio de distribución de com-

Cuadro 2: Especificaciones generales.

Nombre	Valor
Duración	960 min
Ejecuciones	20 uds.
Capacidad del parking	100 uds.
Estaciones de repostaje	4 uds.
Probabilidad de repostaje	50 %

bustibles con la empresa propietaria de la estación de repostaje.

- Paralelamente, ampliar la capacidad de un parking publico gratuito ubicado cerca del núcleo de actividad laboral.

La simulación planteada, tratara de emular el comportamiento de los vehículos que circulan por la ciudad durante el transcurso de una jornada laboral normal. Es por ello que el comienzo de la simulación se estima entorno a las 7:00 a.m. y se prologa hasta 9:00 p.m. El modelo producirá 2 tipos de entidades, el vehículo de tipo ‘A’, que sera el medio de transporte para los trabajadores de la zona, y el de tipo ‘B’ que englobará todo tipo de usuarios ajenos a el ámbito laboral. Esta distinción se ha considerado necesaria, debido a la uniformidad que representa el primer grupo, respecto al segundo, algo más caótico. Los vehículos generados seguirán la rutina descrita el la Figura 7.

La consultoría, por una parte, establece las propiedades generales de su modelo en la Tabla 2. Mientras que, por otra parte, decide recopilar información clave para el desarrollo del modelo de simulación. A raíz de un análisis obtiene los datos mostrados en la Tabla 3.

Como puede observarse en la Figura 8, la adición de 2 estaciones de autoservicio en la gasolinera evita su colapso en intervalos críticos. En el gráfico situado a la izquierda, el pico de actividad azul entorno al minuto 150 de la ejecución de la simulación, se ve drásticamente reducido, mientras que el repunte secundario es completamente eliminado. A su vez, en el gráfico adyacente, La desviación estándar de tiempos de espera queda reducida y su media queda desplazada hacia el eje.

Continuando con el análisis, el la Figura 9, El efecto de incrementar en un 50 % las plazas de parking disponible, no es apreciable en el gráfico expuesto arriba. La cantidad de vehículos en carretera permanece similar, mientras que en el gráfico inferior los vehículos saturan el parking hasta su nuevo limite. Al no haber una clara

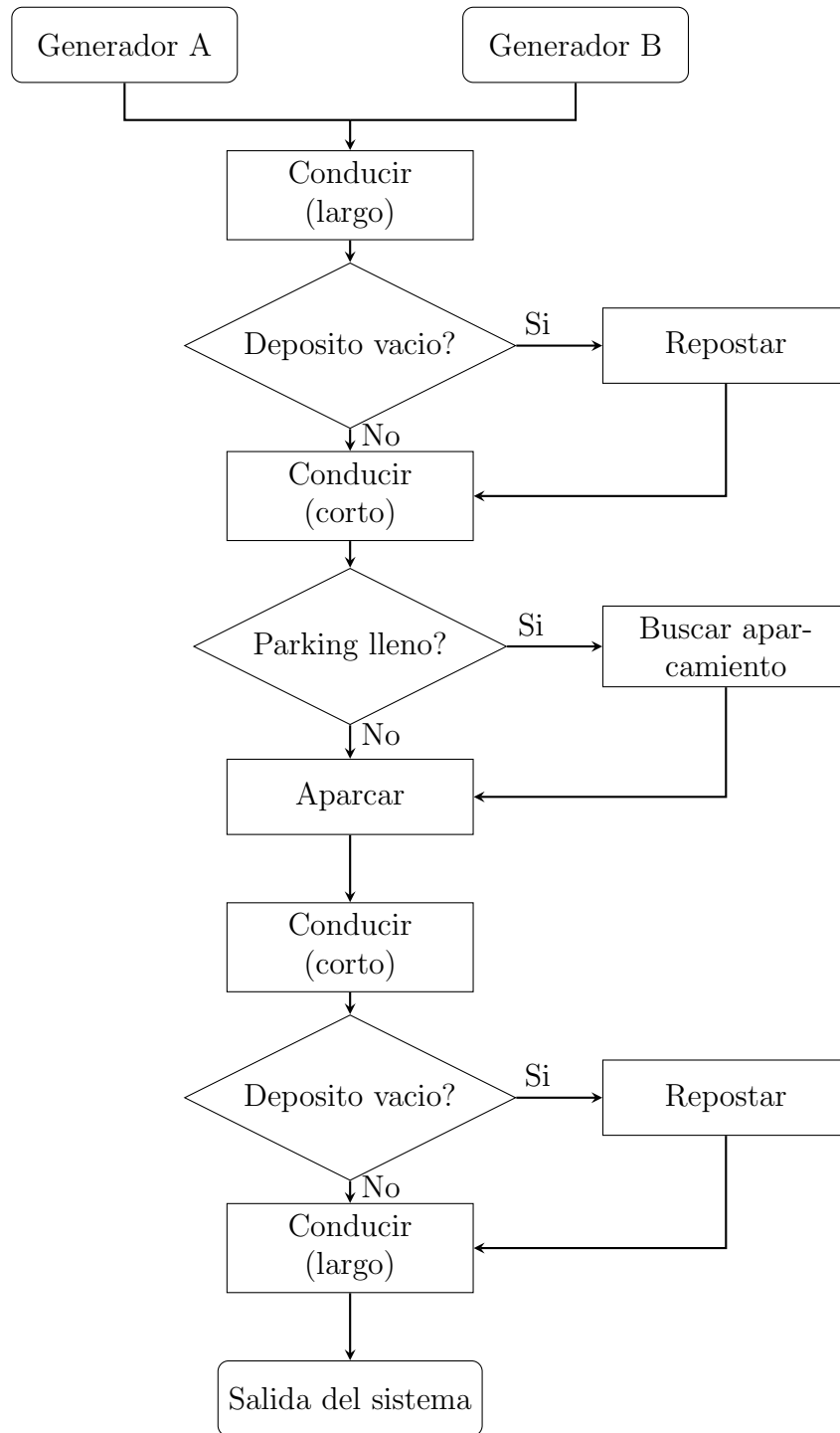


Figura 7: Modelo del caso practico descrito en el apartado 2.1.2

Cuadro 3: Propiedades de las distribuciones observadas en los procesos reales.

Variable	Tipo de vehiculo	Distribución	Constantes (min)
Conducir largo	A y B	Gamma	$k = 8, \theta = 3$
Conducir corto	A y B	Triangular	$min = 2, moda = 3, max = 4$
Buscar parking	A y B	Gamma	$k = 10, \theta = 1$
Repostar	A y B	Triangular	$min = 4, moda = 5, max = 8$
Entre llegadas	A*	Exponencial	$\lambda = 1$
	B	Exponencial	$\lambda = 15$
Estacionamiento	A	Normal	$\mu = 560, \sigma = 60$
	B	Lognormal	$\mu = 5, \sigma = 0,7$

*La generación de entidades tipo ‘A’ únicamente se prolonga desde el comienzo de la simulación hasta el minuto X. Así, se obtiene una aproximación, a el horario típico de un día laboral.

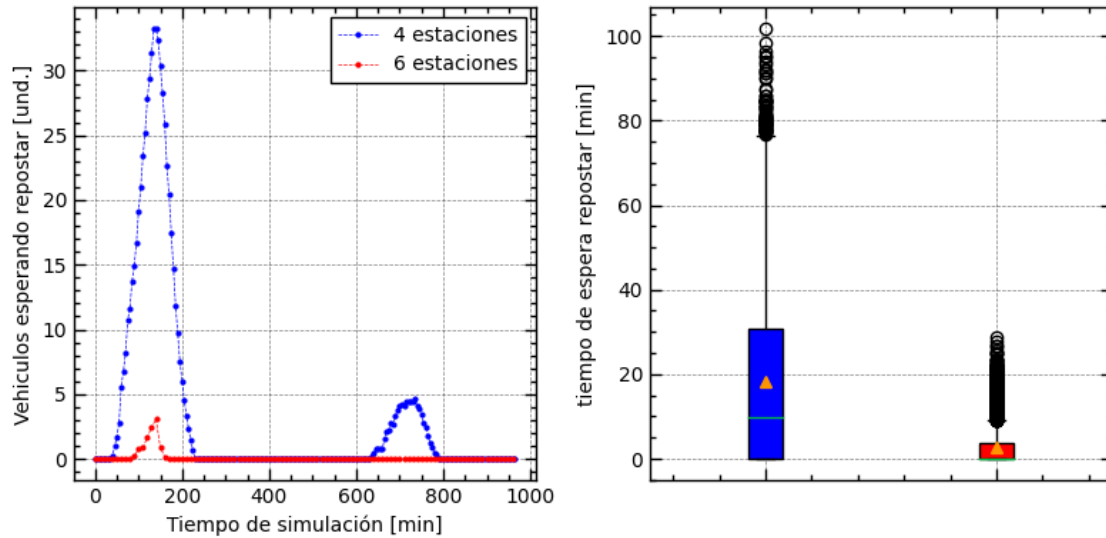


Figura 8: Izquierda: Evolución de los vehículos a la espera de repostar para distintos escenarios. Derecha: Distribución de los tiempos de espera de repostaje para los distintos escenarios

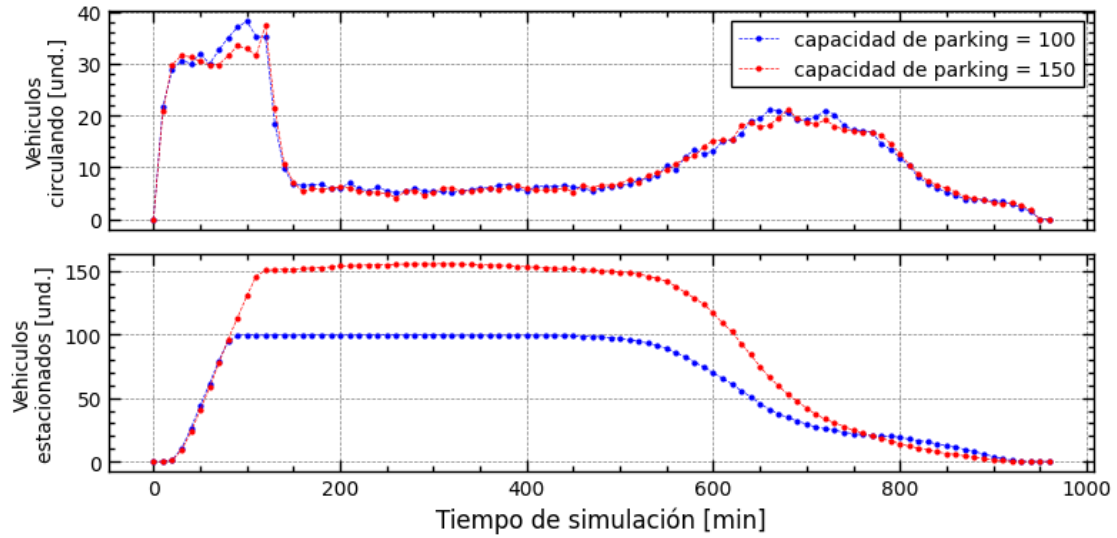


Figura 9: Evolución de la cantidad de vehículos a lo largo de la simulación, en distintos escenarios. Arriba: Vehículos en circulación. Abajo: Vehículos estacionados.

correlación entre ambos indicadores, se ilustra la representación de la distribución de tiempos de conducción en la Figura 10. En esta exposición, puede llegar a apreciarse una ligera diferencia en los tiempos de conducción, aunque un test de hipótesis sería necesario para determinar si estas diferencias son estadísticamente significativas.

En conclusión, los resultados muestran una clara ruta de inversión a la hora de ampliar la estación de combustibles, mientras que la expansión de el parking parece irrelevante. Esto demuestra la capacidad de recopilación de datos que ofrece una DES. Simultáneamente subraya la importancia del tratamiento de los datos obtenidos, y el uso de pruebas estadísticas, para la obtención de conclusiones certeras.

2.1.3. Etapas de desarrollo de una DES

Para que un proyecto tan complejo como una DES prospere, es fundamental estructurarlo. El diagrama expuesto en la Figura 11 publicado por (Banks, 1998) define las etapas que deberían seguir este tipo de proyectos. Al ser este proyecto un simple Trabajo de Fin de Grado, este esquema servirá como orientación, más que como plano para la construcción de la simulación. Por ejemplo, la recopila-

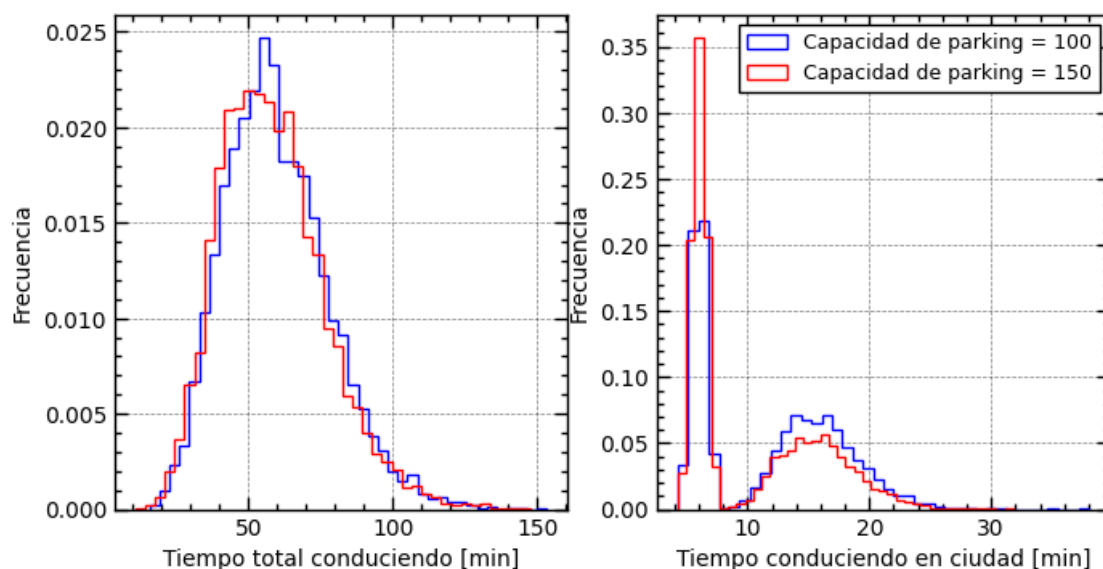


Figura 10: Distribución de el tiempo de conducción para distintos escenarios. Izquierda: Tiempo total en circulación. Derecha: Tiempo circulando dentro de la ciudad.

ción de datos ha resultado imposible en el momento de redacción del trabajo, pero se espera desarrollar el proyecto a partir de las más ajustadas distribuciones de probabilidad supuestas para el desarrollo del modelo. Se espera que este trabajo asiente una base, y que las imperfecciones actuales puedan ser corregidas en el futuro.

Formulación del problema, establecimiento de objetivos, y plan general.

Cada DES comienza con la declaración del problema que se tratará de solucionar. Esta etapa es crucial debido a que el resto de el trabajo se asentara sobre esta base. Se debe asegurar que el problema que se esta formulando sea el correcto, la comunicación entre el cliente y el equipo desarrollador debe ser optima. Una descripción precisa y un conocimiento extenso del sistema son necesarios para evitar trabajar en solucionar el problema equivocado. Es por ello que debe haber comunicación y feedback constante entre cliente y equipo.

En el caso de este trabajo, algo similar sucede. Al ser un único autor, la comunicación no sera un factor importante, pero esto conllevara otras complicaciones. El autor debe, comprender profundamente el sistema a modelar, y a su vez, dominar el uso de las herramientas de simulación. Manejar ambas, requerirá recordar

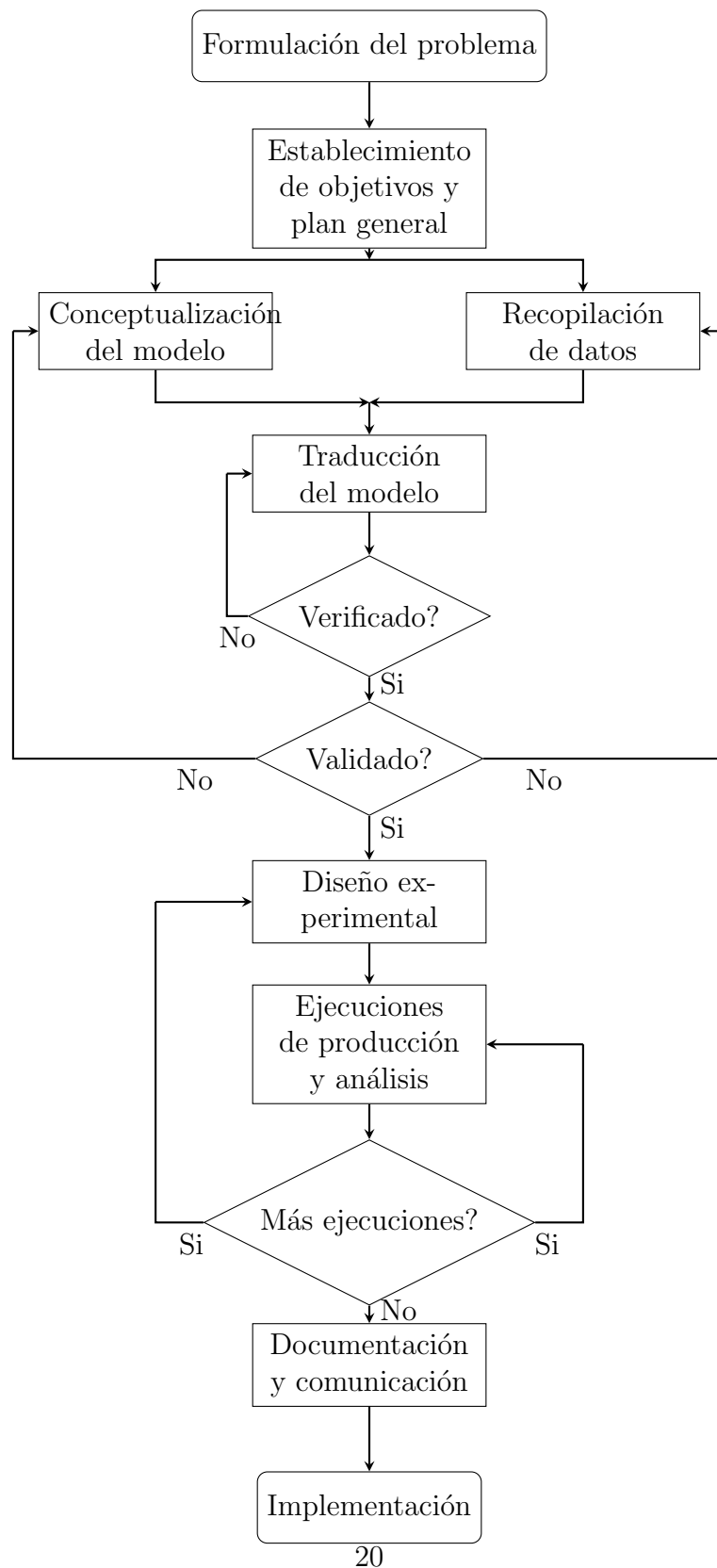


Figura 11: Esquema del proceso de desarrollo de una DES.

la formulación del problema inicial más frecuentemente para no desviarse de la dirección.

Respecto a los objetivos, estos deben ayudar a asentar la dirección de trabajo actuando como plan general. El establecimiento de varios objetivos alcanzables, cohesivos y correctamente secuenciados, guiará el proceso de desarrollo. Estos objetivos quedan listados en la sección 1.2.

Conceptualización del modelo. El sistema propuesto sugiere conceptualizar el modelo en orden inverso, es decir, comenzar identificando los objetivos del proyecto, tal y como se ve en la Figura 12.

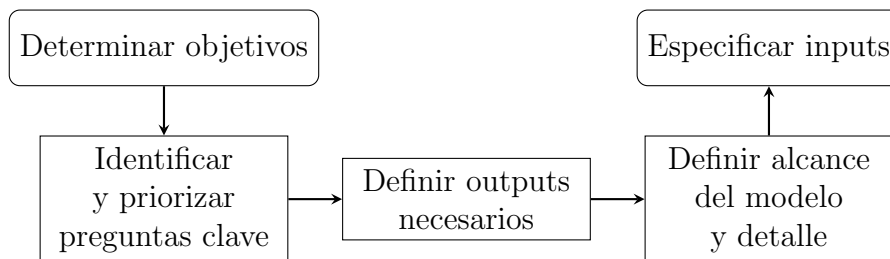


Figura 12: Diagrama de pasos a seguir en la conceptualización de un modelo.

El siguiente paso es hallar las preguntas clave a las que se les quiere dar respuesta. Generar una lista, y ordenar las preguntas respecto a su relevancia es lo ideal. Además, cuantificar los beneficios asociados a estas, aclara su jerarquía.

Después, se debe determinar que outputs son necesarios para contestar a las preguntas previamente formuladas. Introduciendo en la simulación únicamente la complejidad necesaria, agilizará el proceso de desarrollo y mantendrá el enfoque original.

Continuando con el alcance de la simulación, se deben detallar los procesos críticos en el cálculo del *output*, descartando o simplificando aquellos que no tengan gran impacto en la salida. Por ejemplo, modelar recursos abundantes en la simulación, no tendrá impacto en el output, mientras que conocer los tiempos de espera de un proceso sí lo hará.

Se Finaliza, especificando las variables independientes que se introducirán al sistema. Estas variables tienen que ser de alta calidad, ya que, de lo contrario su introducción puede perjudicar al sistema al completo. Un ejemplo sería el de distinguir

entre distintas distribuciones para entidades con atributos pobremente caracterizados.

Recopilación de datos. Cualquier DES requiere datos. La recopilación de la información del sistema, o la estimación en caso de ser un sistema ficticio, es una necesidad.

Traducción del modelo. El modelo de simulación se construye a partir de la información desarrollada en el anterior punto. Este proceso consiste en traducir de manera eficaz el esqueleto previamente desarrollado, a un lenguaje que el ordenador pueda procesar. Para ello Banks sugiere lo siguiente:

- Enfoque en el problema. El proyecto no debería limitarse a desarrollar el modelo, si no que debería tratar de invertir aproximadamente el mismo tiempo en la exploración del sistema y la solución de problemas.
- Comienzo simple. El comienzo del proyecto debe ser simple, adquiriendo complejidad hasta alcanzar el detalle necesario.
- Manejo de la inteligencia del modelo. El modelo no debe superar el rendimiento de los procesos reales. El modelo desarrollado puede desarrollar ventajas respecto a su contrapartida real, como conocer la ubicación exacta de una pieza instantáneamente. Los humanos que gestionan el proceso difícilmente van a poder lograr este control, y supondrá una característica inalcanzable en el sistema real.
- Revisión. Revisar el funcionamiento del proyecto frecuentemente. Esto evitara desvíos respecto al objetivo principal y facilitara el proceso de verificación y validación.

Verificación y validación. Comprobar el correcto funcionamiento de la DES es fundamental. Esta es la labor de la verificación y validación (VV). Banks sugiere que este paso se realice frecuentemente a lo largo de el proceso de desarrollo. Esto evita complicaciones una vez el proyecto se vuelve demasiado extenso y demasiado complejo. Realizar la VV en cada pieza funcional de el modelo cada vez que suceda algún cambio es lo recomendable.

Por una parte, la verificación es el proceso encargado de comprobar que la simulación se ejecute de la manera esperada. En este proceso se intentará hallar errores

en el programa. Esto se logra comprobando que la ejecución de cada paso en la simulación sea la correcta y dé los resultados esperados.

Por otra parte, la validación consiste en comparar, el comportamiento del modelo respecto a el comportamiento real del sistema. En el caso de poseer datos sobre el sistema simulado, el libro sugiere utilizar herramientas estadísticas como, el test Student t o análisis de regresión donde el ajuste a la realidad sera comprobado. En el caso de no poseer los datos del sistema, como es este, se optara por un enfoque cualitativo. Aunque no haya datos, el comportamiento de un sistema puede predecirse cualitativamente, al cambiar ciertas variables. Por ejemplo en un tanque de agua cilíndrico, aunque el volumen del tanque y el caudal de entrada del agua sea desconocido, el nivel del agua disminuirá si el flujo neto es negativo. Si el programa, ejecutado obtiene el resultado contrario, este sera invalidado comenzando la revisión del mismo.

Análisis. Mediante el análisis del output obtenido de la simulación, se obtienen las conclusiones a las preguntas planteadas al inicio del proyecto. Primeramente, se deberán plantear los distintos escenarios que serán simulados. Estos escenarios serán ejecutados en la simulación obteniendo su *output*. El correcto tratamiento de los datos, junto con una exposición significativa de ellos dará claridad a los resultados. No obstante, para obtener las conclusiones deseadas, deberán realizarse testes estadísticos a los resultados para certificarlos.

Documentación y comunicación. Con la intención de que este proyecto pueda ser continuado en el futuro por otra persona, la documentación se vuelve necesaria. El proyecto se considera documentado, por una parte, mediante este trabajo, y por la otra mediante un código fuente auto-explicativo, con abundantes comentarios.

2.2. TEORÍA DE LA PROBABILIDAD Y DES

La probabilidad esta estrechamente relacionada con la DES. Todo el calculo realizado en una simulación tiene el objetivo de calcular el valor esperado o la media de las variables dependientes de un proceso que se esta intentando medir. Definir ciertos conceptos estadísticos se vuelve imprescindible para el correcto desarrollo de este tipo de proyecto.

2.2.1. Variables aleatorias o random

Según el autor (Meester, 2008), una variable random (X) se puede explicarse como un numero cuyo valor no es conocido en el momento de su planificación. Aunque el valor ultimo de esta variable sea desconocido, el rango de valores que pueden tomar estas variables viene determinado por una función.

2.2.2. Distribuciones de probabilidad

Una distribución de probabilidad es una función estadística que determina la probabilidad de que una variable random (Simon, 2002), obtenga todos los valores posibles que contiene la propia distribución. Las distribuciones comúnmente usadas en los modelos de una DES son las siguientes:

Distribución uniforme.

$$P(x) = \frac{1}{b-a} \quad (1)$$

Distribución normal.

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^2} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

Distribución lognormal.

$$P(x) = \frac{1}{\sigma x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(x)-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

Distribución triangular.

$$P(x; a, m, b) = \begin{cases} \frac{2(x-a)}{(b-a)(m-a)} & \text{para } a \leq x \leq m, \\ \frac{2(b-x)}{(b-a)(b-m)} & \text{para } a \leq x \leq m, \\ 0 & \text{para el resto} \end{cases} \quad (4)$$

Distribución exponencial.

$$P(x; \lambda) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x} & x \geq 0, \\ 0 & x < 0 \end{cases} \quad (5)$$

Distribución gamma.

$$P(x) = x^{k-1} \frac{e^{-x/\theta}}{\theta^k \Gamma(k)}, \text{ siendo: } \Gamma(k) = (k-1)! \quad (6)$$

2.2.3. Test de hipótesis

La comprobación de los resultados obtenidos en las DES, es una parte fundamental de la simulación. Para ello se suelen emplear los test de hipótesis como muestra de la validez de las conclusiones obtenidas.

El test de hipótesis involucra formular, 2 o más hipótesis, que serán puestas a prueba mediante el empleo de test estadísticos, a las muestras poblacionales obtenidas (Martin, 2022).

Un formato común en el ámbito de test de hipótesis es el siguiente:

- Hipótesis nula, H_0 , trata de demostrar que el fenómeno observado es únicamente resultado del azar.
- Hipótesis alternativa, H_1 , trata de demostrar la hipótesis que se desea probar. Existen 3 tipos:
 - parámetro de población $>$ valor hipotetizado.
 - parámetro de población $<$ valor hipotetizado.
 - parámetro de población \neq valor hipotetizado.

Para realizar un test de hipótesis, primero debe escogerse un test, y aplicarlo a las muestras de la población a analizar. Después, la hipótesis nula es rechazada o no dependiendo de el valor-p obtenido.

Un test de hipótesis muy usado es el test t-student 7.

$$t = \frac{\tilde{x} - \mu_0}{s/\sqrt{n}} \quad (7)$$

El valor-p, es la probabilidad condicional de los valores a los extremos de un test estadístico, asumiendo que la hipótesis nula es cierta. Por convención, si la

probabilidad de la hipótesis nula es $< 5\%$, o $< 0,05$, la hipótesis nula es rechazada. De lo contrario, no es posible rechazar la hipótesis nula, lo que no supone que esta sea cierta.

3. DESARROLLO

3.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA, ESTABLECIMIENTO DE OBJETIVOS Y PLAN GENERAL

Esta etapa corresponde a la sección 1 de introducción.

3.2. CONCEPTUALIZACIÓN DEL MODELO

Empezando desde el final, una vez han quedado los objetivos descritos, se ha procedido a determinar las cuestiones clave para dar con una solución. La siguiente lista de preguntas ha sido formulada.

- ¿Que sucedería si el tiempo disponible para el montaje de las máquinas fuese mayor? Aumentar el número de turnos cuantos ensayos más acabaría proporcionando?
- ¿Cuál sería el efecto de que dos técnicos trabajasen simultáneamente en los ensayos?
- ¿Cómo afectaría la instalación de máquinas Endurance adicionales a la cantidad de ensayos realizados?

Para responder a las preguntas planteadas, se ha programado la simulación de tal manera que devuelva una tabla conteniendo los tiempos de inicio y fin de cada proceso. A través de análisis de los datos indexados, se han podido obtener estadísticas como: número de ensayos totales realizados por tipo de test, o el tiempo total de máquina en funcionamiento por cada ejecución de la simulación.

El modelo a reproducir para obtener los datos descritos en el anterior párrafo, ha sido deliberadamente diseñado de manera simple. Esto ha facilitado la obtención

Cuadro 4: Características generales de la simulación.

Propiedad	Valor
Duración	365 días
Jornada laboral	8 h
Turno(s)	1
Ejecuciones	100 unds.

Cuadro 5: Recursos representados en el modelo.

Recurso	Cantidad (unds.)
Máquina endurance	4
Máquina rolling	1
Máquina butler	1
Personal técnico	1
Llantas endurance	14
Llantas rolling	20

de datos representativos y su posterior análisis. Se ha tomado parte de el diagrama de la Figura 3, Excluyendo ciertos procesos irrelevantes para las preguntas previamente formuladas. Estos diagramas se encuentran en el Anexo B.

Los *inputs* necesarios para el funcionamiento del modelo se han recopilado en las Tablas 4, 5, 6 y 7.

3.3. RECOPIACIÓN DE DATOS

Se ha tratado de representar cada proceso mediante distribuciones acordes a sus propiedades. Para los tiempos entre llegadas de objetos en la simulación, se ha elegido la distribución exponencial debido a su asociación a tiempos de espera entre eventos.

Para los procesos de los que menos información se poseía se ha optado por representarlos mediante una distribución triangular. Se ha podido estimar correctamente sus duraciones típicas, y sus limites superiores e inferiores.

Finalmente para los procesos cuya información era extensa, se han tratado de representar mediante distribuciones normales, debido a la sencillez y versatilidad

Cuadro 6: Características del proceso de ensayos endurance.

Proceso	Prioridad	Distribución (min)
Tiempo entre llegadas	-	Exponencial $\lambda = 120$
Enllantado	0	Triangular $a = 12, m = 15, b = 20$
Montaje	-1	Normal $\mu = 45, \sigma = 10$
Acondicionamiento	-3	Constante $c = 180$
Ajuste de presión	-4	Constante $c = 5$
Ensayo	-	Normal $\mu = 4320, \sigma = 360$

Cuadro 7: Características del proceso de ensayos rolling.

Proceso	Prioridad	Distribución (min)
Tiempo entre llegadas	-	Exponencial (min) $\lambda = 48$
Enllantado	0	Triangular $a = 12, m = 15, b = 20$
Acondicionamiento	-2	Constante $c = 360$
Montaje	-2	Normal $\mu = 45, \sigma = 10$
Ensayo	-	Normal $\mu = 180, \sigma = 20$

de las mismas.

3.4. TRADUCCIÓN DEL MODELO

El modelo traducido, que se encuentra en el Anexo B, puede dividirse en 3 procesos generales:

La generación de entidades se encarga de crear instancias de las cubiertas que son alimentadas a los procesos maestros de cada ensayo. Son 2 los generadores que posee la simulación, uno para los ensayos Endurance, y otro para los ensayos Rolling.

Los procesos maestros son los responsables de ejecutar los subprocesos en el orden correspondiente mientras demandan los recursos necesarios durante su transcurso. Al igual que los generadores, hay 2 procesos maestros, uno para cada tipo de ensayo.

Los subprocesos son las subrutinas llamadas por los procesos maestros. Crear módulos para cada tarea mejora la legibilidad del código.

La obstrucción del técnico es el proceso que simula el inicio y el fin de una jornada laboral, y hace transcurrir el tiempo, incluyendo los fines de semana.

3.5. VERIFICACIÓN Y VALIDACIÓN

El proceso de verificación se ha realizado a lo largo de la simulación. Se ha comprobado que los pasos se ejecutan en el orden esperado, y se ha revisado la lógica de los algoritmos propuestos.

Respecto al proceso de validación, se ha tomado como referencia el recuento ensayos realizados durante un año, y el tiempo de funcionamiento de maquina, y se ha comprobado que fueran similares.

Cuadro 8: Capacidad máxima de ensayos por maquina.

Ensayo	Capacidad maxima (unds.)
Endurance	934
Rolling	2502

4. RESULTADOS

Una vez simulados los distintos escenarios, se ha procedido a analizar las tablas de datos obtenidos por la simulación.

En la Figura 13 se han graficado las distribuciones de el numero de ensayos realizados, en un año simulado, para cada escenario. Cada escenario ha sido ejecutado 100 veces, y se ha trazado la frecuencia con la que ocurría un determinado numero de ensayos en el histograma. La figura consta de 2 gráficas, correspondiendo el histograma (A) a los ensayos Endurance y el histograma (B) a los ensayos Rolling. De izquierda a derecha se pueden observar 4 distribuciones de distintos colores. Cada uno de ellos corresponde a una configuración de turnos del técnico encargado de estas maquinas. Los turnos en los cuales el operario esta disponible como recurso van desde 1 a tiempo completo, incluidos los fines de semana.

En el histograma superior puede observarse la distinción que ocurre entre las distintas configuraciones. Cada configuración tiene un amplio rango de ensayos, mostrando el comportamiento estocástico de este tipo de ensayos. Exceptuando la configuración a tiempo completo, la cantidad de ensayos, parece variar dentro de un rango común de 100 ensayos. Esta tendencia cambia al disponer a tiempo completo de un operario que monte la maquina. Al eliminarse la posibilidad de que el ensayo finalice fuera del horario laboral, la desviación estándar de ensayos realizados se reduce al mismo tiempo que la media de ensayos se aproxima a la capacidad ideal.

En el histograma inferior, las 3 primeras configuraciones expuestas, muestran un comportamiento similar observado en la configuración a tiempo completo, observada en el anterior gráfico. Esto se debe, a que el técnico solamente puede llegar a lanzar un determinado numero de ensayos por turno trabajado. Esta cantidad se mantiene uniforme a lo largo de las ejecuciones debido a que la duración de este ensayo es inferior a la duración del turno del técnico. Mientras el horario de trabajo sea limitado la tendencia de ensayos corresponderá a la ecuación 8. En el escenario en el que el técnico esta disponible durante 3 turnos al día, la acumulación de eventos aleatorios se vuelve notable en la desviación de ensayos observada

Cuadro 9: Media y desviación estándar de ensayos realizados por cada escenario y tipo de ensayo.

Escenario	Ensayos endurance (unds.)		Ensayos rolling (unds.)	
	μ	σ	μ	σ
1 Turno	293.35	17.27	739.35	5.51
2 Turnos	516.83	26.38	1293.40	5.00
3 Turnos	701.07	27.25	1782.26	11.15
Tiempo completo	855.06	5.70	2202.28	73.18

respecto a los anteriores 2 escenarios. Finalmente, a tiempo completo, la desviación estándar aumenta considerablemente, ya que no hay un descanso que regule la aleatoriedad de los ensayos.

$$TestRealizados = 365 \cdot 8 \cdot \underbrace{\left(\frac{N_{turnos}}{\mu_{test}} + 1 \right)}_{\text{Entero truncado}} \quad (8)$$

Una representación mas significativa ocurre cuando se normaliza la cantidad de ensayos respecto a la capacidad máxima de trabajo. De esta manera, se obtiene la fracción de tiempo de utilización de maquina representado en la Figura 14. Esta conversión logra asentar la base necesaria para comparar el grado de utilización de maquinas de manera directa.

Si se grafica la fracción de tiempo de utilización de maquina, respecto a la fracción del tiempo trabajado, con los escenarios expuestos hasta ahora, se obtiene la Figura 15. La dispersión de los datos se ajusta perfectamente a una regresión lineal a partir de la fracción de tiempo trabajado de 0.25 en adelante. Para ambas maquinas, la relación entre ensayos realizados y tiempo trabajado es directamente proporcional. La obtención de esta relación, junto con las capacidades máximas de las maquinas expuestas en la tabla 8 permite anticipar si la capacidad del LCP será suficiente para saciar la demanda de ensayos.

Teniendo en cuenta los datos obtenidos a través de la regresión lineal, la ecuación 9 modela la cantidad de ensayos endurance realizados en función a la fracción de horas trabajadas en un año. Siendo la fracción de horas trabajadas descrita como la ecuación 11. A su vez, la ecuación 10 aplica la misma función pero para los ensayos rolling. Para un determinado objetivo de test realizados, las ecuaciones mencionadas pueden resolverse para obtener la cantidad de horas necesarias para

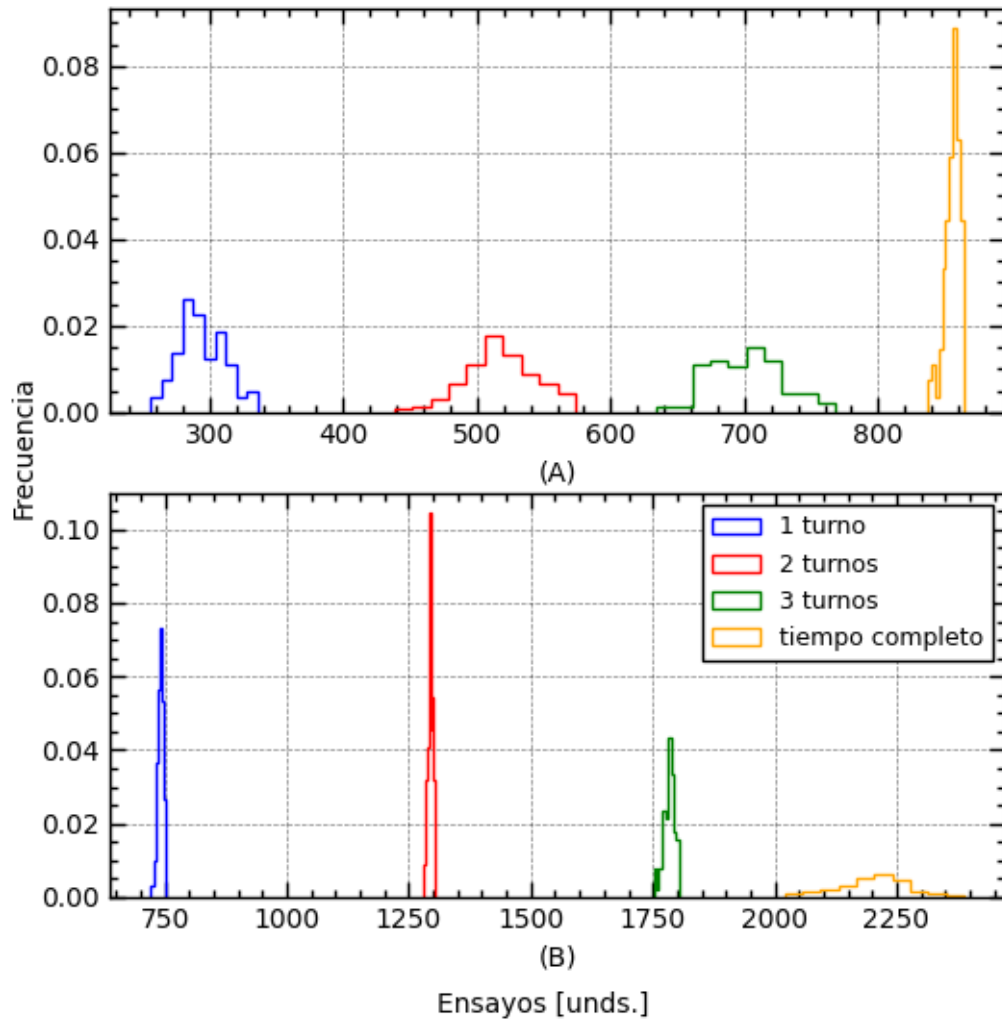


Figura 13: Distribución de ensayos realizados para los escenarios descritos en la leyenda. (A) Ensayos endurance. (B) Ensayos rolling.

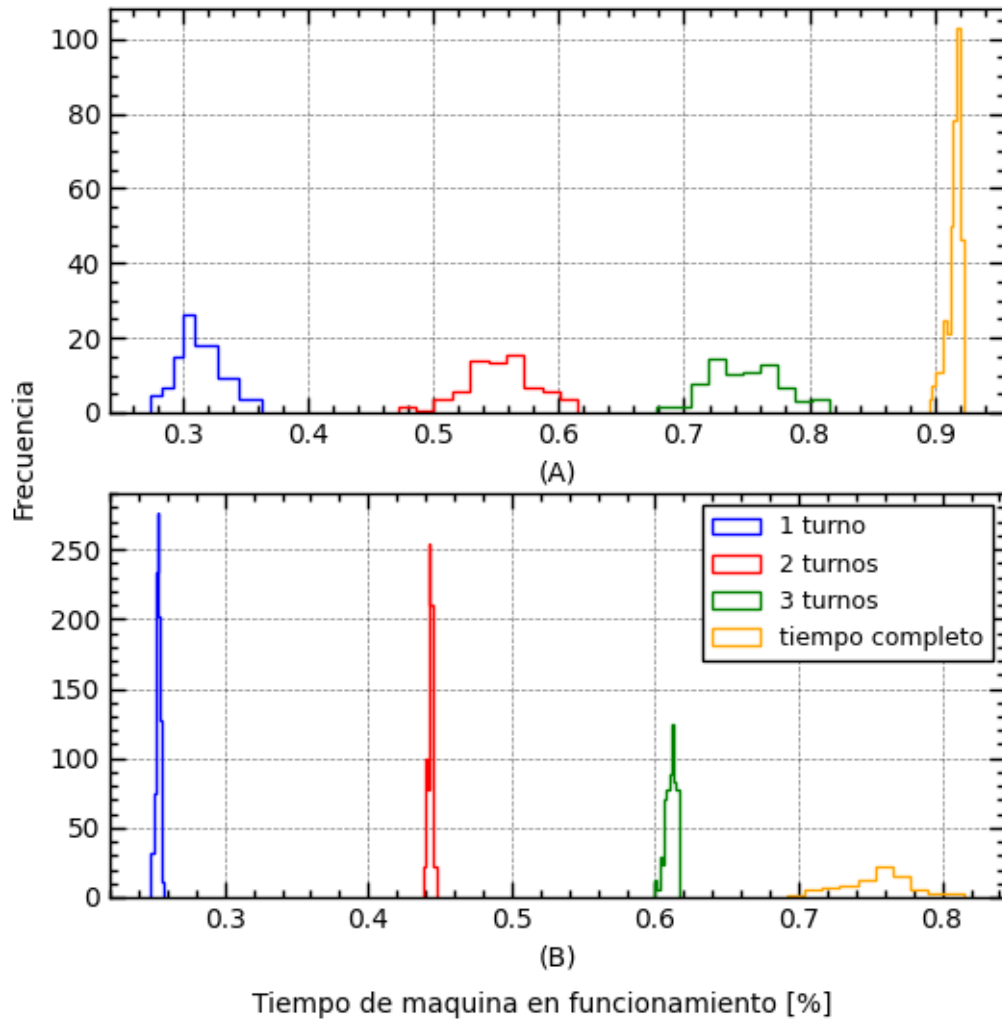


Figura 14: Distribución de el nivel de saturación en tiempo de lo escenarios descritos en la leyenda. (A) Ensayos endurance. (B) Ensayos rolling.

llegar al objetivo. En el caso de requerir más horas de las que una jornada laboral normal dispone, se propone completar dichas horas sobrantes reposicionando uno de los técnicos en un turno adicional durante un periodo. Dicho periodo se puede calcular mediante la ecuación 13, de esta manera se aprovechan al máximo los recursos humanos disponibles. Para ello primeramente se calcula el máximo de turnos anuales mediante la ecuación 12.

$$TestRealizados = 934 \cdot 0,79 \cdot f_{ttrabajo} + 0,15 \quad (9)$$

$$TestRealizados = 2502 \cdot 0,66 \cdot f_{ttrabajo} + 0,12 \quad (10)$$

$$f_{ttrabajo} = \frac{t_{trabajo}}{365 \frac{\text{días}}{\text{año}} \cdot 24 \frac{\text{horas}}{\text{días}}} \quad (11)$$

$$G(f_{ttrabajo}) = f_{ttrabajo} \frac{365 \frac{\text{días}}{\text{año}} \cdot 24 \frac{\text{horas}}{\text{días}}}{8 \frac{\text{horas}}{\text{días}} \cdot 5 \frac{\text{días}}{\text{semanas}} \cdot 52 \frac{\text{semanas}}{\text{año}}}$$

$$Turnos = \begin{cases} 1 & G(f_{ttrabajo}) \leq 1 \\ 2 & 1 < G(f_{ttrabajo}) \leq 2 \\ 3 & 2 < G(f_{ttrabajo}) \leq 3 \\ 4 & G(f_{ttrabajo}) > 3 \end{cases} \quad (12)$$

$$Periodo = 12 \text{ meses} \cdot (G(f_{ttrabajo}) - Turnos - 1) \quad (13)$$

Con el fin de descartar otro tipo de configuraciones, como múltiples técnicos trabajando simultáneamente, se ha graficado la Figura 17. La diferencia en ambos ensayos parece mínima, pero con la intención de descartar la idea de que 2 técnicos trabajando simultáneamente incrementa el numero de ensayos realizados, se desarrolla el siguiente test de hipótesis.

- $H_1: \mu_1 \neq \mu_2$
- $H_0: \mu_1 = \mu_2$

Se ha tratado de descartar la hipótesis nula mediante la prueba de valor-p, y test t-student. Los resultados de la prueba, han sido recogidos en la tabla 10. El bajo

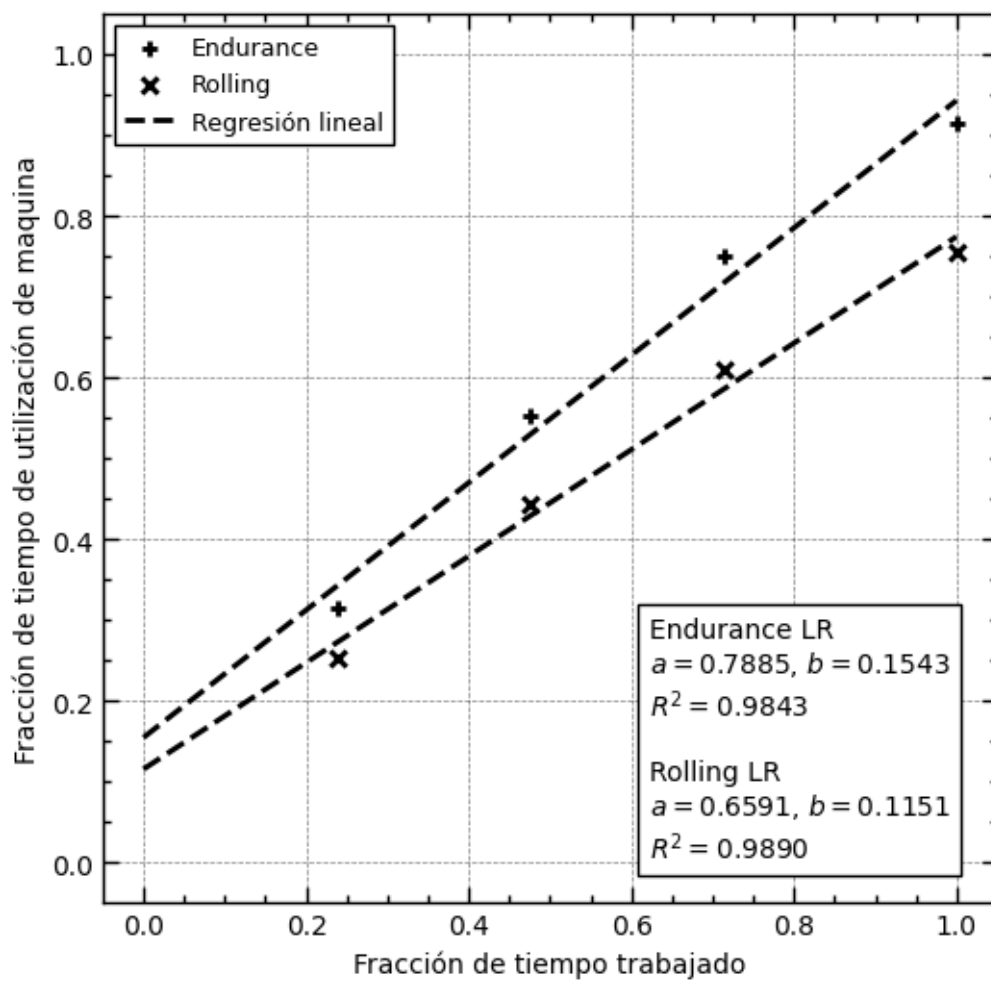


Figura 15: Tendencia proporcional del aumento del numero de ensayos al añadir turnos de trabajo.

Cuadro 10: Resultados del test estadístico formulado a partir de los resultados de la Figura 17

Resultados	Endurance	Rolling
valor-t	-2.279	-5.179
valor-p	0.023	0.000

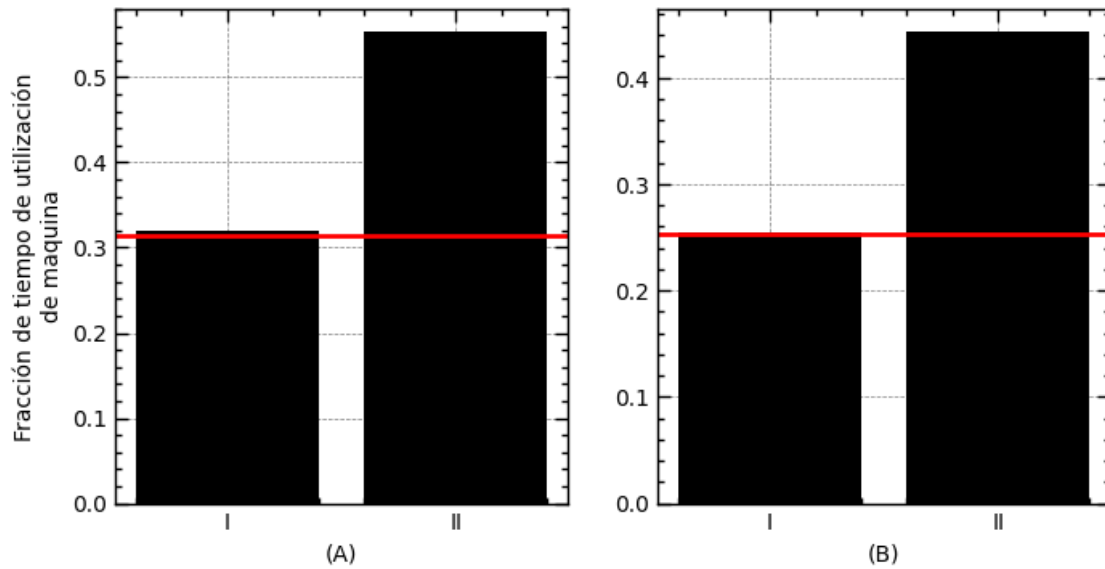


Figura 16: Comparación de el nivel de saturación en tiempo entre: [I] 2 técnicos trabajando simultáneamente, [II] 2 técnicos en distintos turnos. (A) Ensayos endurance. (B) Ensayos rolling.

valor-p obtenido en ambos tipos de ensayo descarta la hipótesis nula formulada anteriormente. Esto significa que las distribuciones tienen una diferencia estadísticamente significativa. A un siendo este el caso, el escenario en el que se trabaja a 2 turnos, es definitivamente superior, como se puede observar en la Figura 17. Al consumir ambos la misma cantidad de recursos, esto descarta la configuración en la que 2 técnicos trabajan simultáneamente.

Por ultimo, se ha tratado de observar la en el rendimiento de ensayos que aportaría la instalación de nuevas maquinas para el ensayo endurance. En la Figura 18, se observa como añadir maquinas no aumenta de manera significativa la cantidad de ensayos realizados, ya que el técnico queda saturado de trabajo con la configuración actual.

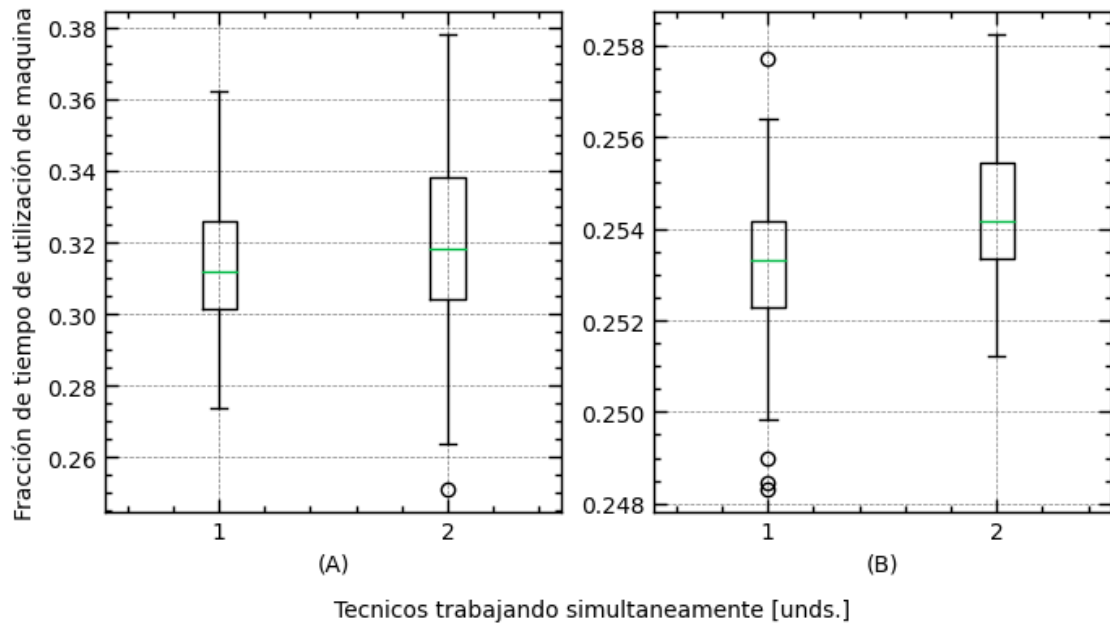


Figura 17: Comparación de el nivel de saturación en tiempo entre 1 técnico y 2 técnicos trabajando simultáneamente. (A) Ensayos endurance. (B) Ensayos rolling.

Este análisis concluye, que en caso de necesitar capacidad adicional, se opte por reposicionar a uno de los técnicos en un turno adicional durante el periodo que sea necesario. Ya que, es con diferencia la opción mas optima.

5. CONCLUSIONES

A modo de cierre de este trabajo, se puede señalar que se llegó a lograr el objetivo planteado al comienzo del proyecto. Dentro de las posibilidades tomadas en cuenta, el escenario mas óptimo ha sido hallado. Mantener un enfoque hacia los hitos marcados al principio, ha ayudado en el extenso proceso de la elaboración de la simulación.

Entre los resultados más relevantes obtenidos, se encuentran la gran capacidad de mejora que posee el laboratorio en su estado actual. El descubrimiento de una tendencia proporcional entre la cantidad de horas trabajadas y el numero de ensayos realizados, ha sido particularmente útil. Mediante los resultados de la regresión obtenida, se podrá facilitar la futura organización de los turnos de

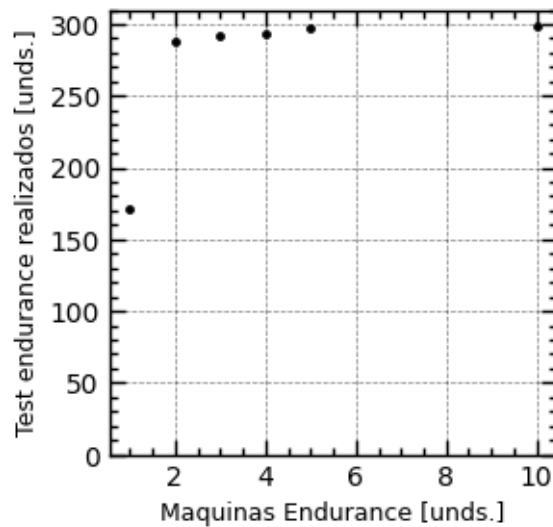


Figura 18: Aumento de los ensayos realizados en función de las maquinas endurance instaladas.

trabajo, y anticipar las desviaciones respecto a los objetivos de manera más precisa. El descarte de la ampliación de la maquinaria del laboratorio, supondrá un ahorro tanto en espacio como en inversión de la fabrica.

Respecto al proceso, se han encontrado numerosas dificultades. Primeramente, la familiarización con las DES, ha requerido un extenso trabajo de investigación acerca de sus métodos e implementaciones. Se ha requerido ajustar este método de simulación a los objetivos del trabajo, lo que ha supuesto un periodo previo al desarrollo, en el que se han valorado múltiples enfoques. La tarea más complicada, ha resultado ser el proceso de traducción del modelo desde los diagramas, a el código fuente. Este periodo, ha durado semanas, en las cuales se ha aprendido cero a usar la librería Simpy. El proyecto, al involucrar tantas lineas de código, ha supuesto un proceso complicado de detección y corrección de errores de funcionamiento, que ha limitado lo que podría haber sido el análisis final. Aún así, el análisis de los resultados ha resultado satisfactorio, para un Trabajo de Fin de Grado.

Este trabajo ha causado, de manera transversal, un entendimiento aún mas detallado del proceso de lo que se tenía en un inicio. Además, los conocimientos obtenidos en este TFG, podrán ser útiles en futuros procesos de optimización en producción.

A. ANEXO I: CÓDIGO FUENTE

```
# *****  
#  
#  
#          :::::::::::  :::::::::::  #  
#  lep_sim_rewrited.py          :+:      :+:      :+:  #  
#          +:~+          +:~+      +:~+  #  
#  By: andoitzcp <andoitzcp@gmail.com>  +#+          +#+~+~+~+~+  #  
#          +#+          +#+  #  
#  Created: 2023/02/01 01:09:17 by andoitzcp  +#+      +#+  +#+  #  
#  Updated: 2023/02/01 01:09:31 by acampo-p  ###      #####.fr  #  
#  
# *****  
  
import simpy  
import pandas as pd  
from numpy import random as nprng  
from functools import reduce  
  
rng = nprng.default_rng()  
  
class G:  
    SIM_DET = {  
        'SIM_DUR': 365 * 24 * 60,  
        'SHIFT_DUR': 8 * 60,  
        'SHIFT_N': 1,  
        'RUN_EXEC': 100,  
    }  
    P_QCED = {  
        'INTR_RVAL': 20 * 60 / 10,  
        'R_PRIO': 0,  
        'M_MEAN': 45,  
        'M_SDEV': 10,  
        'M_PRIO': -1,  
        'C_DUR': 3 * 60,  
        'C_PRIO': -3,  
        'P_DUR': 5,  
        'P_PRIO': -4,  
        'T_MEAN': 72 * 60,
```

```

        'T_SDEV': 6 * 60,
    }
P_RR = {
    'INTR_RVAL': 8 * 60 / 10,
    'R_PRIO': -1,
    'M_MEAN': 30,
    'M_SDEV': 5,
    'M_PRIO': -2,
    'C_DUR': 6 * 60,
    'C_PRIO': -2,
    'T_POS': [150, 170, 200],
    'T_PROB': [0.1, 0.7, 0.2],
}
RSRCS = {
    'INDOOR': 4,
    'RRM': 1,
    'BUTLR': 1,
    'TECHN': 1,
    'MANT': 1,
    'OPR': 1,
    'Q_RIMS': 14,
    'R_RIMS': 20,
}
P_RIM = {
    'PRIO': 0,
    'A': 12,
    'M': 15,
    'B': 20,
}

```

```

class data:
    df = pd.DataFrame()

    def calc_intervals(df):
        df['Q_GEN'] = df['RIM1'] - df['GEN']
        df['Q_RIM'] = df['RIM2'] - df['RIM1']
        df['D_RIM'] = df['RIM3'] - df['RIM2']
        df['Q_MOUNT'] = df['MOUNT1'] - df['RIM3']
        df['T_MOUNT'] = df['MOUNT2'] - df['MOUNT1']

```



```

df['D_MOUNT'] = df['MOUNT3'] - df['MOUNT2']
df['Q_COND'] = df['COND1'] - df['MOUNT3']
df['T_COND'] = df['COND2'] - df['COND1']
df['D_COND'] = df['COND3'] - df['COND2']
df['Q_PMEAS'] = df['PMEAS1'] - df['COND3']
df['T_PMEAS'] = df['PMEAS2'] - df['PMEAS1']
df['D_PMEAS'] = df['PMEAS3'] - df['PMEAS2']
df['Q_QCED'] = df['QCED1'] - df['PMEAS3']
df['D_QCED'] = df['QCED2'] - df['QCED1']

df['Q_GEN_h'] = df['Q_GEN'] / 60
df['Q_RIM_h'] = df['Q_RIM'] / 60
df['D_RIM_h'] = df['D_RIM'] / 60
df['Q_MOUNT_h'] = df['Q_MOUNT'] / 60
df['T_MOUNT_h'] = df['T_MOUNT'] / 60
df['D_MOUNT_h'] = df['D_MOUNT'] / 60
df['Q_COND_h'] = df['Q_COND'] / 60
df['T_COND_h'] = df['T_COND'] / 60
df['D_COND_h'] = df['D_COND'] / 60
df['Q_PMEAS_h'] = df['Q_PMEAS'] / 60
df['T_PMEAS_h'] = df['T_PMEAS'] / 60
df['D_PMEAS_h'] = df['D_PMEAS'] / 60
df['Q_QCED_h'] = df['Q_QCED'] / 60
df['D_QCED_h'] = df['D_QCED'] / 60

def stat_calc(df):
    filtered_df = df.loc[df['D_QCED_h'] > 0]
    df2 = filtered_df.groupby(['TEST'])['TEST'].count()
    print(df2)

class tire:

    def __init__(self, t_id, t_test, t_client):
        self.id = t_id
        self.test = t_test
        self.client = t_client

class lab_model:

```

```

def __init__(self, run_nbr):
    self.env = simpy.Environment()
    self.run_nbr = run_nbr
    self.tire_cntr = 0
    self.tire_bufrr_indoor = []
    self.tire_bufrr_rr = []

    # Resources
    self.rsrc_indoor = \
        simpy.Resource(self.env, capacity=G.RSRCS['INDOOR'])
    self.rsrc_rrm = \
        simpy.Resource(self.env, capacity=G.RSRCS['RRM'])
    self.rsrc_butlr = \
        simpy.Resource(self.env, capacity=G.RSRCS['BUTLR'])
    self.rsrc_techn = \
        simpy.PreemptiveResource(self.env, capacity=G.RSRCS['TECHN'])
    self.rsrc_mant = \
        simpy.Resource(self.env, capacity=G.RSRCS['MANT'])
    self.rsrc_opr = \
        simpy.Resource(self.env, capacity=G.RSRCS['OPR'])
    self.rsrc_qrims = \
        simpy.Resource(self.env, capacity=G.RSRCS['Q_RIMS'])
    self.rsrc_rrims = \
        simpy.Resource(self.env, capacity=G.RSRCS['R_RIMS'])

    # Temporal storage for data
    self.tmp_lst_gen = []
    self.tmp_lst_rim = []
    self.tmp_lst_mount = []
    self.tmp_lst_cond = []
    self.tmp_lst_pmeasure = []
    self.tmp_lst_test = []

def gen_qced_rp(self):
    self.env.timeout(32.59)
    while True:
        tmp_dict = {'RUN': self.run_nbr,
                    'TEST': 'QCED',
                    'CLIENT': 'RP',
                    }

```

```

        self.tire_cntr += 1
        obj = tire(self.tire_cntr, "QCED", "RP")
        self.tire_buf indoor.append(obj)
        intr_rval = rng.exponential(G.P_QCED['INTR_RVAL'])

        tmp_dict['ID'] = self.tire_cntr
        tmp_dict['GEN'] = self.env.now
        self.tmp_lst_gen.append(tmp_dict)
        self.env.process(self.proc_master_indoor())
        yield self.env.timeout(intr_rval)

def gen_rr_rp(self):
    while True:
        tmp_dict = {'RUN': self.run_nbr,
                    'TEST': 'RR',
                    'CLIENT': 'RP',
                    }

        self.tire_cntr += 1
        obj = tire(self.tire_cntr, "RR", "RP")
        self.tire_buf rr.append(obj)
        intr_rval = rng.exponential(G.P_RR['INTR_RVAL'])

        tmp_dict['ID'] = self.tire_cntr
        tmp_dict['GEN'] = self.env.now
        self.tmp_lst_gen.append(tmp_dict)
        self.env.process(self.proc_master_rr())
        yield self.env.timeout(intr_rval)

def obstruct_techn(self):
    day = 0
    week = ['M', 'T', 'X', 'R', 'F', 'S', 'U']
    t_up = G.SIM_DET['SHIFT_N'] * G.SIM_DET['SHIFT_DUR']
    while True:
        t_down = (24 * 60) - t_up
        if week[day % 7] == 'F':
            day += 3
            t_down += 48 * 60
        else:

```

```

        day += 1
    yield self.env.timeout(t_up)
    with self.rsrc_techn.request(priority=-10, preempt=True) \
        as req_techn_A:
        yield req_techn_A
    yield self.env.timeout(t_down)

def obstruct_indoor(self):
    while True:
        t_tofailure = rng.exponential(G.F_DET['INTR'])
        yield self.env.timeout(t_tofailure)
        if not self.broken:
            self.proc_qced_A.interruptp()

def t_conditioning(self, t_left):
    t_toshiftend = (G.SIM_DET['SHIFT_DUR'] * G.SIM_DET['SHIFT_N']) - self.env.1
    if G.SIM_DET['SHIFT_N'] == 3:
        return t_left
    elif t_left > t_toshiftend:
        t_left = G.SIM_DET['SHIFT_DUR'] * (3 - G.SIM_DET['SHIFT_N'])
        t_left += t_toshiftend
    return t_left

def proc_master_indoor(self):
    yield (self.env.timeout(2*24*60))
    if len(self.tire_buf indoor) < 2:
        pass
    else:
        qced_sample_A = self.tire_buf indoor.pop(0)
        qced_sample_B = self.tire_buf indoor.pop(0)
        with self.rsrc_qgrims.request() as req_qgrims:
            yield req_qgrims
            yield self.env.process(self.proc_rim(qced_sample_A))
            yield self.env.process(self.proc_rim(qced_sample_B))
        with self.rsrc_indoor.request() as req_indoor:
            yield req_indoor
            yield self.env.process(self.proc_mount(qced_sample_A))
            yield self.env.process(self.proc_mount(qced_sample_B))
            yield self.env.process(self.proc_cond_qced(qced_sample_A,
                                                         qced_sample_B))

```

```

        yield self.env.process(
            self.proc_pmeasure(qced_sample_A,
                               qced_sample_B))
        yield self.env.process(
            self.proc_qced_A(qced_sample_A)) & \
            self.env.process(
                self.proc_qced_B(qced_sample_B))

def proc_master_rr(self):
    if len(self.tire_bufrr) > 0:
        rr_sample = self.tire_bufrr.pop(0)
        with self.rsrc_qgrims.request() as req_qgrims:
            yield req_qgrims
            yield self.env.process(self.proc_rim(rr_sample))
            yield self.env.process(self.proc_cond_rr(rr_sample))
        with self.rsrc_rrm.request() as req_rrm:
            yield req_rrm
            yield self.env.process(self.proc_mount(rr_sample))
            yield self.env.process(self.proc_rr(rr_sample))

def proc_rim(self, tire_ent):
    tmp_dict = {'ID': tire_ent.id}

    aux = [self.env.now]
    prio = G.P_RIM['PRIO']
    t_left = rng.triangular(G.P_RIM['A'], G.P_RIM['M'], G.P_RIM['B'])
    while t_left > 0:
        with self.rsrc_techn.request(priority=prio,
                                      preempt=False) as req_techn_rim, \
            self.rsrc_butlr.request() as req_butlr:
            try:
                yield req_techn_rim & req_butlr
                aux.append(self.env.now)
                yield self.env.timeout(t_left)
                t_left = 0
            except simpy.Interrupt as interrupt:
                usage = self.env.now - interrupt.cause.usage_since
                t_left -= usage
                prio -= 0.1

```

```

tmp_dict['RIM1'] = aux[0]
tmp_dict['RIM2'] = aux[1]
tmp_dict['RIM3'] = self.env.now
self.tmp_lst_rim.append(tmp_dict)

def proc_mount(self, tire_ent):
    tmp_dict = {'ID': tire_ent.id}

    start = [self.env.now]
    if tire_ent.test == 'QCED':
        t_left = rng.normal(G.P_QCED['M_MEAN'], G.P_QCED['M_SDEV'])
        prio = G.P_QCED['M_PRIO']
    elif tire_ent.test == 'RR':
        t_left = rng.normal(G.P_RR['M_MEAN'], G.P_RR['M_SDEV'])
        prio = G.P_RR['M_PRIO']
    while t_left > 0:
        with self.rsrc_techn.request(priority=prio, preempt=False) \
            as req_techn_mount:
            yield req_techn_mount
            start.append(self.env.now)
            try:
                yield self.env.timeout(t_left)
                t_left = 0
            except simpy.Interrupt as interrupt:
                usage = self.env.now - interrupt.cause.usage_since
                t_left -= usage
                prio -= 0.1

    tmp_dict['MOUNT1'] = start[0]
    tmp_dict['MOUNT2'] = start[1]
    tmp_dict['MOUNT3'] = self.env.now
    self.tmp_lst_mount.append(tmp_dict)

def proc_cond_qced(self, tire_ent_A, tire_ent_B):
    tmp_dict_A = {'ID': tire_ent_A.id}
    tmp_dict_B = {'ID': tire_ent_B.id}

    prio = G.P_QCED['C_PRIO']
    start = [self.env.now]
    with self.rsrc_techn.request(priority=prio, preempt=False) \

```

```

        as req_techn_cond_qced:
            yield req_techn_cond_qced
        start.append(self.env.now)
        t_left = self.t_conditioning(G.P_QCED['C_DUR'])
        yield self.env.timeout(t_left)

        tmp_dict_A['COND1'] = start[0]
        tmp_dict_B['COND1'] = start[0]
        tmp_dict_A['COND2'] = start[1]
        tmp_dict_B['COND2'] = start[1]
        tmp_dict_A['COND3'] = self.env.now
        tmp_dict_B['COND3'] = self.env.now
        self.tmp_lst_cond.append(tmp_dict_A)
        self.tmp_lst_cond.append(tmp_dict_B)

def proc_cond_rr(self, tire_ent):
    tmp_dict = {'ID': tire_ent.id}

    prio = G.P_RR['C_PRIO']
    aux = [self.env.now]
    with self.rsrc_techn.request(priority=prio, preempt=False) \
        as req_techn_cond_rr:
        yield req_techn_cond_rr
    aux.append(self.env.now)
    t_left = G.P_RR['C_DUR']
    yield self.env.timeout(t_left)

    tmp_dict['COND1'] = aux[0]
    tmp_dict['COND2'] = aux[1]
    tmp_dict['COND3'] = self.env.now
    self.tmp_lst_cond.append(tmp_dict)

def proc_pmeasure(self, tire_ent_A, tire_ent_B):
    tmp_dict_A = {'ID': tire_ent_A.id}
    tmp_dict_B = {'ID': tire_ent_B.id}

    start = [self.env.now]
    start.append(self.env.now)
    yield self.env.timeout(G.P_QCED['P_DUR'])

```

```

tmp_dict_A['PMEAS1'] = start[0]
tmp_dict_A['PMEAS2'] = start[1]
tmp_dict_A['PMEAS3'] = self.env.now
tmp_dict_B['PMEAS1'] = start[0]
tmp_dict_B['PMEAS2'] = start[1]
tmp_dict_B['PMEAS3'] = self.env.now
self.tmp_lst_pmeasure.append(tmp_dict_A)
self.tmp_lst_pmeasure.append(tmp_dict_B)

def proc_qced_A(self, tire_ent):
    tmp_dict = {'ID': tire_ent.id}
    tmp_dict['QCED1'] = self.env.now

    test_failure = False
    t_left = rng.normal(G.P_QCED['T_MEAN'], G.P_QCED['T_SDEV'])
    try:
        yield self.env.timeout(t_left)
    except simpy.Interrupt:
        test_failure = True

    tmp_dict['TEST_FAIL'] = test_failure
    tmp_dict['QCED2'] = self.env.now
    self.tmp_lst_test.append(tmp_dict)

def proc_qced_B(self, tire_ent):
    tmp_dict = {'ID': tire_ent.id}
    tmp_dict['QCED1'] = self.env.now

    test_failure = False
    t_left = rng.normal(G.P_QCED['T_MEAN'], G.P_QCED['T_SDEV'])
    try:
        yield self.env.timeout(t_left)
    except simpy.Interrupt:
        test_failure = True

    tmp_dict['TEST_FAIL'] = test_failure
    tmp_dict['QCED2'] = self.env.now
    self.tmp_lst_test.append(tmp_dict)

def proc_rr(self, tire_ent):

```



```

tmp_dict = {'ID': tire_ent.id}
tmp_dict['QCED1'] = self.env.now

test_failure = False
t_left = rng.normal(180, 20)
try:
    yield self.env.timeout(t_left)
except simpy.Interrupt:
    test_failure = True
tmp_dict['TEST_FAIL'] = test_failure
tmp_dict['QCED2'] = self.env.now
self.tmp_lst_test.append(tmp_dict)

def df_gen(self):
    df_tmp_gen = pd.DataFrame(self.tmp_lst_gen)
    df_tmp_rim = pd.DataFrame(self.tmp_lst_rim)
    df_tmp_mount = pd.DataFrame(self.tmp_lst_mount)
    df_tmp_cond = pd.DataFrame(self.tmp_lst_cond)
    df_tmp_pmeasure = pd.DataFrame(self.tmp_lst_pmeasure)
    df_tmp_test = pd.DataFrame(self.tmp_lst_test)
    print(df_tmp_gen)

    df_tmp_lst = [df_tmp_gen,
                  df_tmp_rim,
                  df_tmp_mount,
                  df_tmp_cond,
                  df_tmp_pmeasure,
                  df_tmp_test]
    df_tmp_master = reduce(lambda left, right:
                           pd.merge(left, right, on=['ID'], how='outer'),
                           df_tmp_lst)
    data.df = pd.concat([data.df, df_tmp_master], ignore_index=True)

def run(self):
    self.env.process(self.obstruct_techn())
    self.env.process(self.gen_qced_rp())
    self.env.process(self.gen_rr_rp())
    self.env.run(until=G.SIM_DET['SIM_DUR'])

self.df_gen()

```

```

for run in range(G.SIM_DET['RUN_EXEC']):
    print("Run ", run+1, "of ", G.SIM_DET['RUN_EXEC'], sep="")
    print(G.SIM_DET['RUN_EXEC'])
    my_test_model = lab_model(run)
    my_test_model.run()
    print()

data.calc_intervals(data.df)
data.df.to_csv('lep.csv', index=False)
df = data.df
print(df)
print(data.stat_calc(df))

```

B. ANEXO II: DIAGRAMAS DE FLUJO

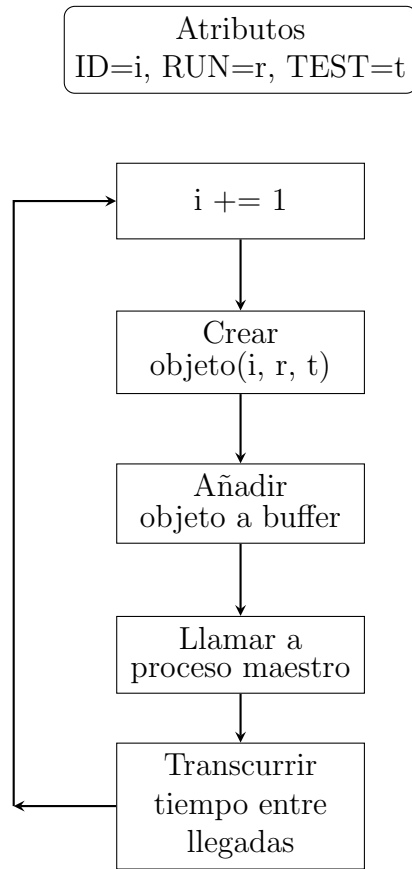


Figura 19: Modelo de generación de entidades

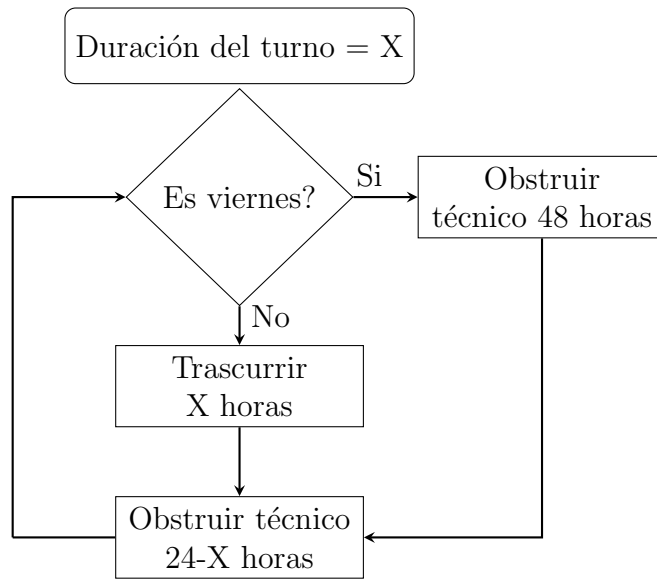
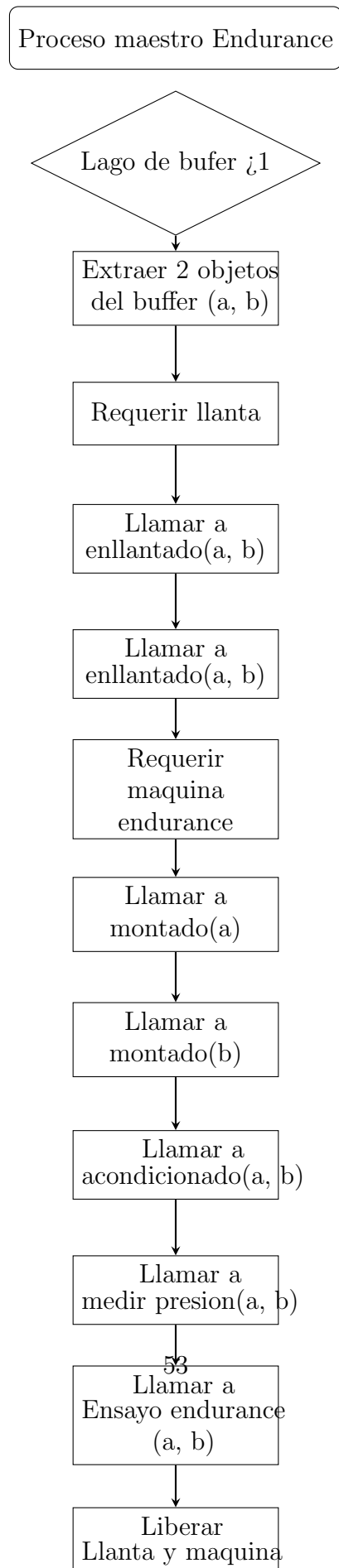


Figura 20: Modelo de obstrucción del técnico durante horas no activas



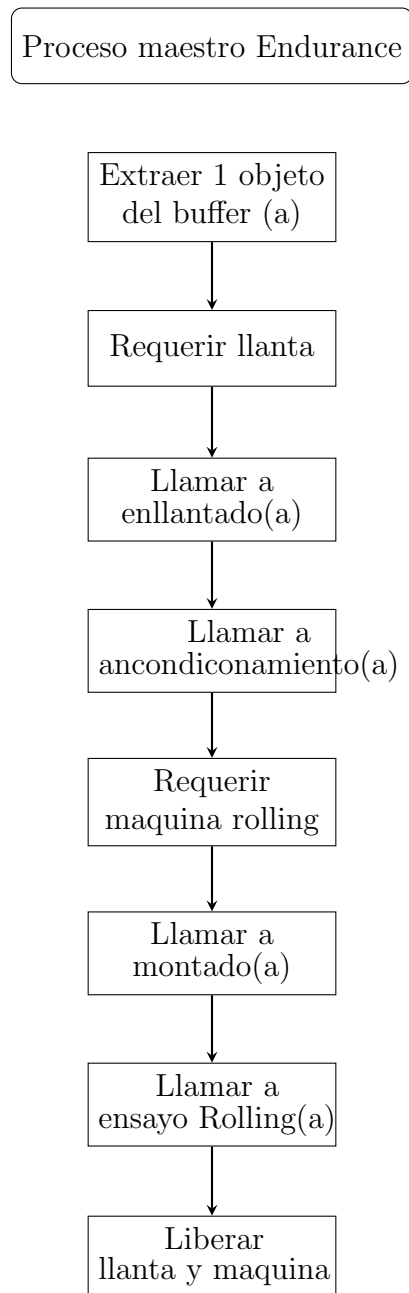


Figura 22: Modelo del proceso maestro de ensayos Endurance

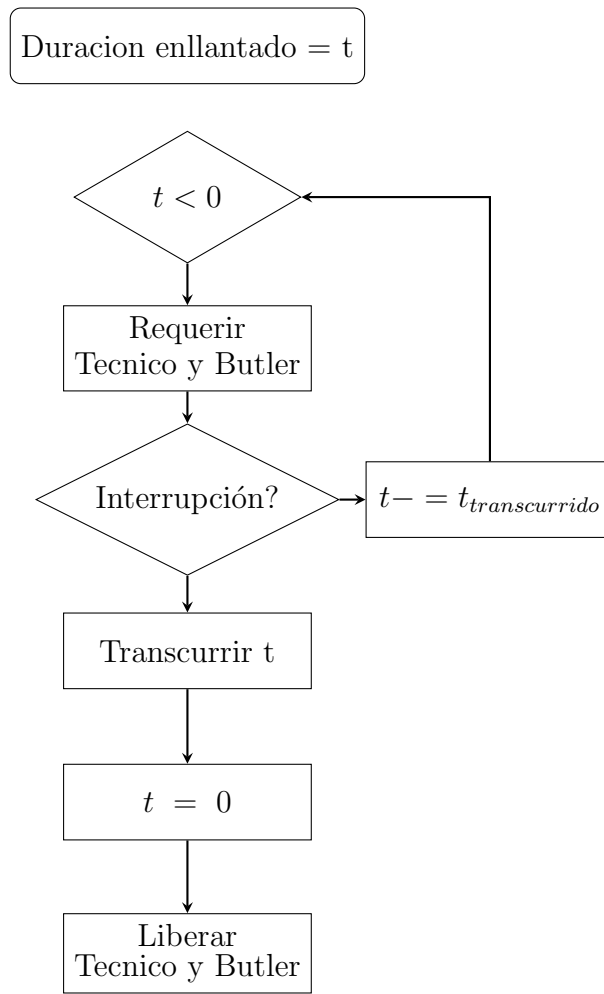


Figura 23: Modelo del subproceso de enlantado

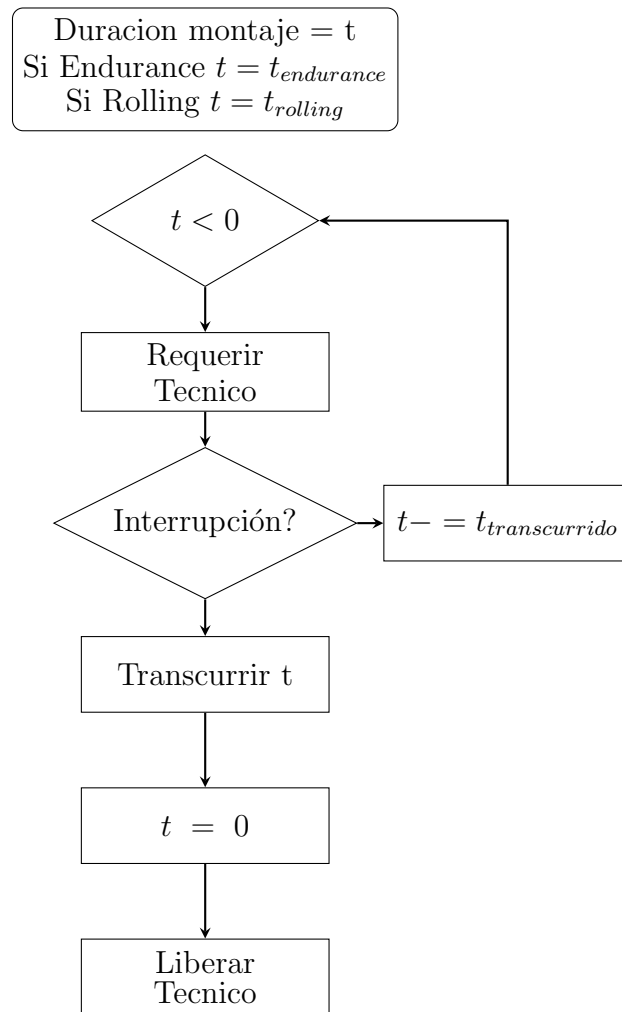


Figura 24: Modelo del subproceso de montaje de máquina

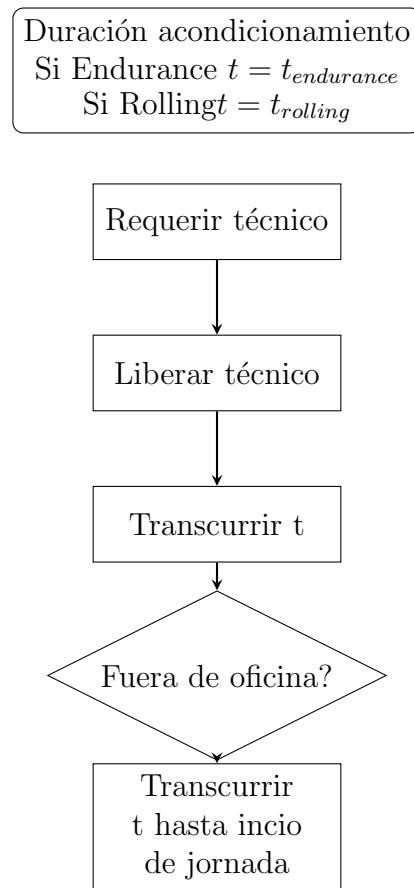


Figura 25: Modelo del subproceso de acondicionado de sala

Duración ajuste de presión = t

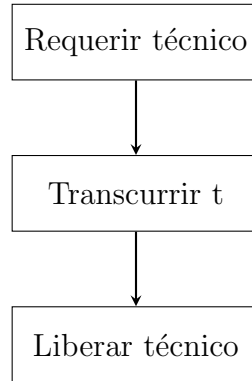


Figura 26: Modelo del subproceso de ajuste de presión de la cubierta

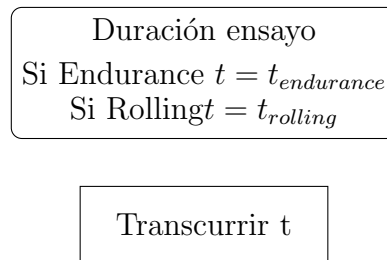


Figura 27: Modelo del subproceso de ensayo de la cubierta

Referencias

- Abu-Taieh, E.M., El Sheikh, A.A.R., Abu-Tayeh, J.M., Al Abdallat, H., 2009. History of simulation, in: Encyclopedia of Information Science and Technology, Second Edition. IGI Global, pp. 1769–1776.
- Allen, T.T., 2011. Introduction to discrete event simulation and agent-based modeling: voting systems, health care, military, and manufacturing. Springer Science & Business Media.
- Banks, J., 1998. Handbook of simulation: principles, methodology, advances, applications, and practice. John Wiley & Sons.
- Banks, J., 1999. Introduction to simulation, in: Proceedings of the 31st conference on Winter simulation: Simulation—a bridge to the future-Volume 1, pp. 7–13.
- Chicu, N., Prioteasa, A.L., Deaconu, A., 2020. Current trends and perspectives in tyre industry. Studia Universitatis Vasile Goldiş Arad, Seria Ştiinţe Economice 30, 36–56.
- Garzia, R.F., Garzia, M.R., Zeigler, B.P., 1986. Discrete-event simulation: When prototyping of large, complex systems is impossible, this technique, based on known behaviors of interacting elements, is useful. IEEE Spectrum 23, 32–36.
- Martin, A.J., 2022. Introduction to hypothesis testing .
- Meester, R., 2008. A natural introduction to probability theory. Springer Science & Business Media.
- Pritsker, A.A.B., 1974. The Gasp Iv Simulation Language [By] A. Alan B. Pritsker. Wiley.
- Rodgers, B., 2020. Tire Engineering: An Introduction. CRC Press.
- Shannon, R., Johannes, J.D., 1976. Systems simulation: the art and science. IEEE transactions on systems, man, and cybernetics , 723–724.
- Simon, M.K., 2002. Probability distributions involving Gaussian random variables: A handbook for engineers and scientists. Springer.
- Varga, A., 2001. Discrete event simulation system, in: Proc. of the European Simulation Multiconference (ESM'2001), pp. 1–7.