UNIVERSIDAD DE VALLADOLID
ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

GRADO EN INGENIERÍA DE ORGANIZACIÓN INDUSTRIAL

ESTUDIO Y ANÁLISIS DE UNA INSTALACIÓN AUTOMÁTICA MEDIANTE WITNESS

Autor:
Sánchez González, Jorge

Tutor: Sanz Angulo, Pedro

Departamento de Organización de Empresas y C. e I.M.

Valladolid, Febrero 2016

ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Agradecimientos

A mi familia por su apoyo y ayuda durante toda la carrera.

A toda la DTV de Soldadura de la factoría de Carrocería-Montaje de Renault en Valladolid por su inestimable colaboración y la oportunidad que me brindaron al poder realizar este trabajo en sus instalaciones.

A mi tutor Pedro Sanz Angulo por su disposición y constantes consejos a lo largo de la elaboración del TFG.

ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Resumen

Las empresas automovilísticas atienden un mercado con una demanda muy inestable; si ésta aumenta, habitualmente responden dedicando más recursos y tiempo. Sin embargo, se puede lograr un aumento de la productividad que no implique un mayor uso de recursos utilizando herramientas como la simulación. En el presente Trabajo Fin de Grado se desarrolla un estudio sobre una isla robotizada del Taller de Soldadura de la factoría de Carrocería-Montaje de Renault España en Valladolid basado en la simulación mediante el software Witness. El objetivo es mejorar la eficiencia y conocer si la instalación puede hacer frente a incrementos de demanda. En el proyecto se ha construido un modelo de la isla, a partir de la información suministrada por la empresa, y se ha validado, a fin de asegurar que dicho modelo se comporta como el sistema objeto de estudio. Por último, a través de la experimentación se han evaluado modificaciones que pueden lograr mejoras de su productividad que permitan atender a posibles incrementos de demanda.

Palabras clave: *Witness*, simulación, eficiencia, productividad, soldadura.

Automotive companies serve a market with a highly unstable demand; if it increases, they usually respond by expending more resources and time. However, it is possible to achieve an increase in productivity without using more resources thanks to tools such as simulation. In this Final Project, a study about a robotic welding workshop at the factory that Renault owns in Valladolid (Spain) has been developed using the Witness simulation software. The aim is to improve its efficiency and to know whether this facility can cope with increases in demand. In the project, and using the information provided by the company, a model of the welding workshop has been built; next, the model has been validated to ensure it behaves as the system under study. Finally, some modifications have been evaluated through an experimentation process looking for productivity improvements which address potential increases in demand.

Key words: *Witness*, simulation, efficiency, productivity, welding.

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN 1

1.1. Antecedentes 1

1.2. Motivación 2

1.3. Objetivos del TFG 2

1.4. Estructura 3

CAPÍTULO 2. ENTORNO INDUSTRIAL 7

2.1. Introducción 7

2.2. Renault: Un grupo internacional 7

2.3. Fuerte presencia en España 7

2.4. Factoría de Carrocería Montaje 9

2.5. DTV Castilla y León - DTV Soldadura Valladolid 11

2.6. Proceso Productivo 13

CAPÍTULO 3. PROCESO DE SOLDADURA 17

3.1. Introducción 17

3.2. Fundamentos de la Soldadura 17

3.2.1. Tipos de soldadura 18

3.2.2. Otros tipos de unión 25

3.3. Validación y verificación de una operación de soldadura 25

3.4. Estructura y funcionamiento de un equipo de soldadura por resistencia por puntos 27

3.4.1. Equipo de soldadura 27

3.4.2. Funcionamiento de un proceso de soldadura robotizado a puntos 33

3.5. Comprobación de la calidad de los puntos de soldadura 35

CAPÍTULO 4. LA SIMULACIÓN 37

4.1. Introducción 37

4.1.1. Definición y beneficio de la simulación 37

4.1.2. Usos de la simulación 39

4.1.3. Ventajas e inconvenientes de la simulación 41

4.1.4. Aplicaciones de la simulación 43

4.2. Análisis y modelado de sistemas 44

4.2.1. Sistemas 44

4.2.2. Modelos 47

4.3. Metodologías de formulación/formalización de modelos 51

4.3.1. Sistemas de eventos discretos: elementos principales 51

4.3.2. Formalización de modelos discretos 52

4.4. Proceso de simulación 53
4.4.1. Formulación del problema 54
4.4.2. Recogida y procesamiento de datos 55
4.4.3. Formulación del modelo 57
4.4.4. Estimación de los parámetros 57
4.4.5. Cualificación del modelo 58
4.4.6. Formulación del programa de la computadora 58
4.4.7. Verificación del programa de simulación 59
4.4.8. Validación de la simulación 60
4.4.9. Diseño de experimentos de simulación 61
4.4.10. Análisis e informe de resultados 61
4.5. Funciones de distribución 61

CAPÍTULO 5. SIMULADORES 65
5.1. Introducción 65
5.2. Flexsim 65
5.3. ProModel 66
5.4. SimProcess 67
5.5. Simul8 68
5.6. Witness 69
5.6.1. Introducción 69
5.6.2. Descripción. 69
5.6.3. Características 70
5.6.4. Construcción de modelos con *Witness* 71

CAPÍTULO 6. FORMULACIÓN E IMPLANTACIÓN DEL MODELO 87
6.1. Introducción 87
6.2. Definición del sistema 87
6.2.1. Robots 89
6.2.2. Manutenciones 93
6.2.3. Maquetas 95
6.2.4. Piezas 96
6.3. Recopilación y procesamiento de los datos de partida. 97
6.4. Hipótesis o estimaciones realizadas 103
6.5. Implantación del modelo 104
6.5.1. Productos o piezas 104
6.5.2. Robots o máquinas 106
6.5.3. Manutenciones, Transportadores o conveyor. 108
6.5.4. Mantenimiento o *labor.* 110
6.5.5. Variables. 110
6.5.6. Turnos. 112

CAPÍTULO 7. VALIDACIÓN Y EXPERIMENTACIÓN DEL MODELO. 115
7.1. Introducción. 115
7.2. Validación del modelo. 115

7.3. Realización de Experimentos. 119
7.3.1. Primer experimento. Simulación con 9 robots. 119
7.3.2. Segundo experimento. Simulación con 9 robots hasta agosto de 2016. 122
7.3.3. Tercer experimento. Equilibrado de robots. 128
7.3.4. Cuarto experimento. Incorporación de un décimo robot. 133
7.3.5. Quinto experimento. Reducción de los TEP. 136

CAPÍTULO 8. ESTUDIO ECONÓMICO. 139

8.1. Introducción. 139

8.2. Costes de elaboración del Proyecto. Estudio económico. 140
8.2.1. Cálculo de horas efectivas anuales y de las tasas por hora de los salarios. 141
8.2.2. Cálculo de horas dedicadas a cada fase del proyecto. 142
8.2.3. Cálculo de amortización de los equipos de desarrollo. 142
8.2.4. Cálculo del coste de material consumible. 143
8.2.5. Cálculo de los costes indirectos. 144

8.3. Costes asociados a cada fase del proyecto. 144

8.4. Coste total y estimación del precio de venta. 146

CAPÍTULO 9. CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE FUTURO. 149

9.1. Objetivos alcanzados 149

9.2. Líneas de futuro. 152

BIBLIOGRAFÍA. 155

REFERENCIAS WEB 156

ANEXOS 159

Datos de partida. 159

Tiempos entre paradas, duración de las averías y tiempos de llegada. 159
Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - TEP A3 159
Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - DUR A3 161
Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - TEP A2 162
Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - DUR A2 164
Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - TEP A0 165
Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - DUR A0 167
Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - TEP B0 169
Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - DUR B0 170
Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - TEP C0 172
Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - DUR C0 173
Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - TEP D1 175
Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - DUR D1 177
Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - TEP D2 179
Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - DUR D2 180
Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - TEP D0 182
Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - DUR D0 183

Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - TEP E1 185
Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - DUR E1 187
Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - TEP F1 188
Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - DUR F1 190
Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - TEP F3 192
Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - DUR F3 193
Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - TEP E2 195
Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - DUR E2 196
Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - TEP F2 198
Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - DUR F2 200
Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - TEP G2 201
Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - DUR G2 203
Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - TEP G0 204
Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - DUR G0 206
Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - TEP G1 208
Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - DUR G1 209
Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - TEP H0 211
Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - DUR H0 212
Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - TdLL C 214
Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - TdLL D 216
Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - TdLL AB 217

Capítulo 1. Introducción

El Trabajo de Fin de Grado (TFG) comienza con un análisis de la situación actual, observando el contexto en el que se va a trabajar y explicando las causas que han llevado a su planteamiento.

Para finalizar el capítulo, se expondrán brevemente los objetivos que se persiguen y la estructura que va a seguir el documento para proporcionar una noción global del mismo.

1.1. Antecedentes

La evolución de la demanda de vehículos basada en el JIT (*Just In Time*) ha provocado un aumento de la cadencia de vehículos a fabricar en menos tiempo, dentro del plazo establecido y optimizando los recursos, es decir, se necesita ser más productivo y eficiente, asegurando calidad, plazos y costos.

Todo ello está ligado a mantener la competitividad de la empresa frente a las marcas de la competencia. Podemos definir la competitividad empresarial como un concepto relativo, que muestra la posición de los sistemas utilizando la misma medida de referencia. El mantenimiento de la competitividad empresarial es crítico para la supervivencia de la empresa.

Por tanto, la realización de este TFG surge con el fin de responder a dicha necesidad, dentro de la empresa Renault España S.A., con el estudio, simulación y experimentación para la búsqueda de mejoras con el fin de reducir el tiempo de ciclo de la isla y optimización de los recursos del Taller de Soldadura (Chapa II).

La simulación es una técnica muy desarrollada hoy en día que ayuda a la toma de decisiones cuando se plantean problemas complejos y permite conseguir un mayor control de la producción. El control de la producción proporciona una visión estratégica a largo plazo que permite a la empresa responder a las fluctuaciones que experimenta la demanda y mantener la competitividad con respecto al resto de marcas del sector.

1.2. Motivación

La organización de los flujos de producción es una tarea compleja, sobre todo si hablamos de unas instalaciones como las dispone Renault España S.A. en Valladolid.

Realizar una simulación del taller de soldadura ha supuesto un gran reto, que me ha permitido adquirir conocimientos y competencias muy valiosas para mi vida profesional.

Para ser competitiva, una empresa debe seguir una estrategia que le permita reducir costos y maximizar capacidades, mejorar los procesos, innovar, desarrollar nuevos productos, expandirse a nuevos mercados e incrementar la satisfacción de los clientes. Este TFG se centrará en aumentar al máximo las capacidades y mejorar los procesos, ya que es una tarea muy compleja que requiere de la realización de muchos estudios y constantes pruebas y simulaciones.

El Taller de Soldadura de Valladolid se encarga de ensamblar la estructura del modelo de vehículo *Captur* y es una oportunidad muy importante, a la par que interesante, poder desarrollar una simulación de los flujos de producción del Taller, con el fin de mejorar las distribuciones implantadas para que la empresa obtenga el máximo beneficio a medio y corto plazo.

1.3. Objetivos del TFG

Lo que se persigue con la realización de este TFG es la construcción de un modelo en el simulador *Witness*, de la empresa Lanner S.A., que se ajuste de la forma más realista posible a la producción de una isla robotizada del Taller, para observar el comportamiento en dicha zona y valorar la posibilidad de mejora a través de la variación de los diferentes recursos y parámetros productivos.

La realización de la simulación permite observar problemas que surjan en el sistema real. Una vez localizados dichos problemas, se realizarán cambios o modificaciones en el sistema modelado con el objetivo de resolverlos, obteniendo resultados que optimicen el proceso.

Cuando se realizan modificaciones en el sistema se obtienen una serie de alternativas, las cuales llevan incorporados unos costes que suponen una inversión para la empresa. El objetivo, por tanto, es conseguir que la isla robotizada imite el comportamiento real para poder anticiparse a posibles problemas de producción, como pueden ser los cuellos de botella, y desarrollar una modificación de la zona a estudiar que sea capaz de mejorar la situación actual, dando además una estimación económica del trabajo realizado.

Es necesario saber utilizar y estar familiarizado con el programa de simulación, ya que es una herramienta muy potente desarrollada para procesos industriales, en la cual hay que definir correctamente todos y cada uno de los elementos de los que consta la instalación, para conseguir desarrollar un modelo útil y capaz de obtener resultados significativos y óptimos para el proceso productivo.

Para la realización del modelo hay que comprender perfectamente el proceso de producción de la zona a estudiar. Hay que conocer los tiempos de ciclo de todos y cada uno de los robots instalados en la zona de estudio, su distribución, el tiempo medio de espera durante las averías, los tiempos de *setup*, las operaciones que realizan, etcétera. Gracias a los datos aportados por Renault España S.A. y a la simulación, se aspira a obtener una solución óptima y realizable con el objetivo de ser implantada y hacerla real a corto plazo.

Para finalizar, también se persigue dar a conocer la simulación como una herramienta de análisis, que permite observar y analizar el comportamiento, tanto de sistemas reales como de alternativas, en cortos periodos de tiempo. Asimismo, se pretende analizar el software Witness como una herramienta útil para la representación y simulación de los procesos productivos.

1.4. Estructura

En este apartado se describe brevemente los capítulos en los que está dividido este TFG.

En el segundo capítulo se describe el entorno industrial donde, durante cuatro meses, se ha realizado el estudio y llevado a cabo este trabajo. Además, se puede encontrar también un breve resumen de la

historia de Renault desde su creación en 1898 hasta la actualidad, la función que desempeña el departamento para el que se ha desarrollado el trabajo y un breve resumen del complejo proceso productivo que se lleva a cabo en toda la factoría, centrado en el Área de Soldadura.

El tercer capítulo tratará sobre el taller de soldadura, donde se detallan los diferentes métodos de soldadura, los distintos robots y útiles con los que se realizan las soldaduras además de las operaciones de mantenimiento necesarias para que la producción sea continua. También se contempla los documentos necesarios para que una operación sea validada y la norma por la que se gestiona la calidad de la soldadura.

Una vez definido el proceso, en el cuarto capítulo se introduce el concepto de simulación. Contiene una pequeña introducción donde se define qué es un sistema y un modelo, la necesidad de la simulación en la actualidad y las fases en las que se divide un proceso de simulación. También se habla de cómo identificar una distribución de probabilidad y de las alternativas que dispone un programador para implementar el modelo que permita la simulación.

El quinto capítulo trata sobre el *Sofware* de simulación *Witness Power With Ease* 3.0 de la empresa Lanner S.A. En él se describen sus características, se compara con otros simuladores, se describen brevemente los elementos que cuenta para llevar a cabo la simulación y se explican las razones por las cuales se ha seleccionado dicho *Software*.

Una vez estudiado el proceso, comprendido su funcionamiento y presentada la herramienta de simulación, en el sexto capítulo se procede a la formulación del sistema, al proceso de recopilación y análisis de los datos obtenidos, los cuales son imprescindibles para que la simulación sea válida, y finalmente a la construcción del modelo. En este capítulo también se explican detenidamente todos los elementos creados en el modelo y cómo se ha llevado a cabo la implantación del mísmo.

Tras haber realizado el modelo, se debe comprobar si es adecuado mediante la verificación y validación, es decir, si éste es adecuado para asegurar y confirmar que su comportamiento se asemeja al comportamiento real. Una vez validado, se proponen diferentes alternativas para mejorar el sistema que deberán ser analizadas. Sobre toda esta documentación versa el capítulo séptimo.

El estudio económico se encuentra en el capítulo octavo, donde se detalla el coste que conllevaría la realización de todo el proyecto, teniendo en cuenta las etapas de las que se compone, las personas implicadas, las horas de trabajo invertidas, los materiales, etc.

Por último, en el capítulo noveno se encuentran las conclusiones que se han extraído del proyecto, los objetivos alcanzados, las competencias adquiridas y las líneas de futuro.

Capítulo 2. Entorno Industrial

2.1. Introducción

El presente capítulo describe la evolución de Renault desde la implantación de la primera fábrica de vehículos en España, así como la influencia de su actividad industrial en el desarrollo de nuestra ciudad.

Posteriormente se presenta detalladamente la estructura y funciones de la factoría de Carrocería Montaje de Valladolid y del departamento de la DTV de Soldadura donde se ha desarrollado este TFG.

2.2. Renault: Un grupo internacional

Fabricante desde 1898, Renault ha adquirido una dimensión global gracias a su Alianza con Nissan en 1999, a la compra del constructor rumano Dacia, del coreano Samsung Motors, a su participación en la empresa Avtovaz y al acuerdo de cooperación con Daimler.

Con 36 factorías, 2,7 millones de vehículos vendidos en 2014 en 124 países y en torno a los 117.000 trabajadores, el Grupo ofrece una amplia gama de vehículos que se caracterizan por su diseño e innovación, ya que ofrecen numerosos servicios de conectividad al más alto nivel. La calidad de fabricación y de servicio en las factorías es otra de las máximas de la marca, que destaca dentro del sector por fabricar vehículos respetuosos con el Medio Ambiente.

La estrategia de Renault es doble: por una parte, sus vehículos térmicos montan motores de nueva generación con la mejor relación consumo-emisiones del mercado y, por otra parte, con la puesta en marcha de una gama completa de vehículos eléctricos a precios accesibles.

2.3. Fuerte presencia en España

A continuación, se hace un recorrido por su historia, cuyos orígenes están asociados a la evolución de la ciudad de Valladolid.

A finales del año 1951 FASA, Fabricación de Automóviles SA, obtiene la primera licencia privada de fabricación de automóviles de nuestro país. Su fundador fue D. Manuel Jiménez Alfaro implantándose en Valladolid, dada su óptima situación geográfica, así como su importante tejido industrial.

La primera fábrica fue una Nave de Montaje y el primer vehículo el Renault 4CV (véase Figura 1) que ya en 1953 tuvo una producción de 707 unidades, 10 vehículos al día. En total, salieron de aquella fábrica 26.000 unidades

Figura 1. Renault 4CV.

En 1965 se inauguraron dos fábricas, FACSA (Carrocerías) y FAMESA (Motores), surgiendo así FASA-Renault, que producía, distribuía y comercializaba íntegramente los vehículos. Además, adquirió las Industrias Subsidiarias de Aviación ISA, fabricantes desde 1958 de las cajas de velocidades de Renault, dando origen a la actual Factoría de Sevilla.

A partir de 1972, por el conocido “decreto Ford”, el constructor americano implanta en Valencia su primera fábrica en España, abriéndose así las puertas del mercado a la competencia extranjera. Esto supuso que Renault, a partir de entonces ya no sólo tuvo que competir con SEAT.

En 1972, se inauguró la Factoría de Montaje 2 con la fabricación del Renault 5. También en ese año, se inicia el proyecto de una tercera fábrica, la de Palencia.

En la década de los ochenta, tanto la reconversión industrial como apertura a la competencia internacional tras el ingreso en la Unión Europea en 1986, influyeron en los procesos que sufrieron una gran

transformación tecnológica en todas las factorías, e hicieron que las exportaciones de vehículos fabricados por Renault en España superaran por primera vez a las ventas del mercado interior.

Dentro de esa transformación tecnológica, la Factoría de Sevilla comenzó a fabricar las primeras cajas de cambio transversales de serie y ya en 2005 la caja de velocidades TL4, primer órgano mecánico de la Alianza Renault-Nissan, constituida en 1999.

Asimismo, también en Valladolid, la Factoría de Motores exporta también entorno al 80% de su producción. La filosofía del Motor E, que buscaba reducir el consumo y adelantarse a las nuevas normas antipolución manteniendo las prestaciones, hoy sigue revolucionando el mercado.

La innovación está implícita en la identidad de la marca, por ello se ha convertido en líder mundial de la tecnología eléctrica. La Dirección de Ingeniería española ha contribuido decisivamente en ese liderazgo, concibiendo los procesos y los sistemas industriales de los productos que se fabrican en nuestro país (mecánica y vehículo).

Actualmente Renault cuenta con factorías en las ciudades de Palencia, Valladolid y Sevilla. También posee en Madrid el centro Corporativo. (Véase Figura 2)

Figura 2. Factorías Renault España 2015.

2.4. Factoría de Carrocería Montaje

Actualmente, la Factoría Carrocería-Montaje de Valladolid (heredera de Montaje 1, primera factoría de Renault en España) la forman dos

Unidades de producción: la Unidad de Carrocerías (1964) y la de Montaje (1972).

Actualmente su actividad productiva es la fabricación en exclusiva a nivel mundial del vehículo *Captur,* dirigido al mercado del segmento de los vehículos de clase B. Además, de esta Factoría sale el primer vehículo 100% eléctrico *Twizy*, fabricado por Renault en España (véase Figura 3).

Figura 3. Renault Captur y Renault Twizy.

La ubicación de la factoría está en el sureste de la ciudad, entre las salidas hacia Segovia y Madrid y ocupa una superficie total de 108 hectáreas, de las que 44 están construidas.

Su adecuado emplazamiento, a 200 km. de Madrid y en el eje de comunicación París-Lisboa, facilita un tráfico fluido de mercancías, tanto por ferrocarril como por carretera.

La Factoría es un gran complejo tecnológico que ha experimentado una constante evolución técnica en las diferentes fases del proceso productivo: Embutición, Chasis, Chapa, Pintura y Montaje (véase Figura 4).

Figura 4. Vista aérea de las factorías de Valladolid 2015.

Los procesos de fabricación de la Unidad de Carrocerías son la embutición de piezas de chapa, la soldadura de subconjuntos de chapa y la pintura de piezas de plástico. En cuanto de la Unidad de Montaje, sus procesos son la inyección de piezas de plástico, la soldadura y pintura de carrocerías, así como el montaje del resto de componentes.

En el marco de sus políticas de gestión, cuenta con las Certificaciones /Auditorías: ISO 9001 en Calidad, ISO 14001 Medio Ambiente, y en cuanto a Seguridad y Prevención: Auditoría Legal del Sistema de Gestión de Prevención de Riesgos Laborales, Label SMR en Salud, Seguridad y Condiciones de Trabajo, RHP Riesgo Altamente Protegido Riesgos Industriales.

2.5. DTV Castilla y León - DTV Soldadura Valladolid

La Dirección Técnica de Vehículo de Valladolid (DTV) tiene como misión industrializar las modificaciones de los vehículos en fase "vida Serie" (versiones nuevas y evoluciones asociadas la economía, calidad, reglamentación…) y contribuir a la mejora de la rentabilidad de la fábrica reduciendo el "valor no añadido", los gastos de producción, de logística,…, además de participar en los proyectos de nuevos vehículos, desde su primera fase hasta el arranque.

Concretamente, la DTV de soldadura (véase Figura 5) de la factoría de Valladolid se encarga de ensamblar la carrocería del vehículo. Las piezas las recibe embutidas desde la Unidad de Carrocerías, las cuales son ensambladas con alrededor de 3.700 puntos de soldadura por vehículo, en un proceso automatizado al 99%.

Figura 5. Taller Soldadura Valladolid 2015.

La estructura organizativa de la DTV Soldadura (véase Figura 6) está formada por un Jefe de Servicio responsable de dos equipos denominados Unidades Elementales de Trabajo (UETs), "Técnicas de Base /Escapes" y "Procesos Caja". Cada UET la compone un Jefe de Unidad (JU) y las personas a su cargo, todos ellos con la misión de asegurar la gestión de la vida del producto (vehículo) así como la de contribuir a la mejora de las prestaciones industriales y a la industrialización de los nuevos proyectos.

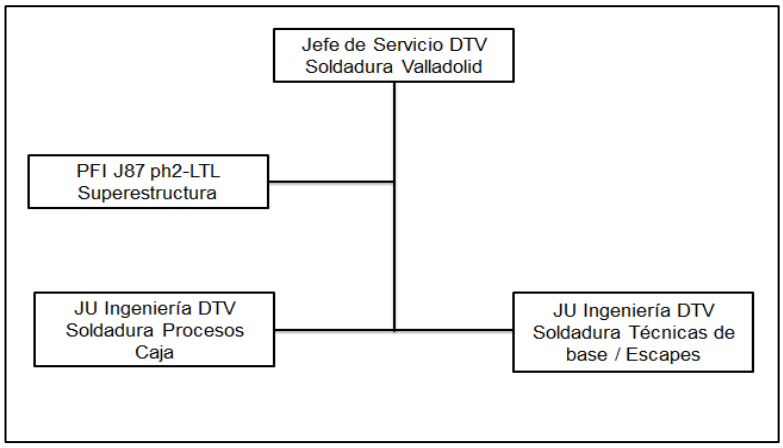

Figura 6. Organigrama DTV Soldadura.

Para llevar a cabo su función, la DTV mantiene una relación con los distintos departamentos de fabricación como Logística, Calidad Fabricación, Calidad Proveedores, Mantenimiento, además los departamentos transversales de la DTV.

El Área de soldadura se compone de tres talleres en los que se desarrollan diferentes operaciones de montaje y soldadura (véase Figura 7):

- **Carrocerías:** este taller se encuentra separado de la Factoría de Montaje y se encarga de la soldadura de pequeños conjuntos de piezas de menor tamaño de diferentes modelos de la marca. Una vez soldadas, las piezas son transportadas a los diferentes talleres de ensamblaje de piezas de mayor tamaño.
- **Chapa II:** recibe este nombre debido a que fue construido posteriormente al taller de Ferrajes en el cual se fabricaba y ensamblaba la estructura del vehículo en su totalidad. Su función es soldar y ensamblar la estructura principal del vehículo. Una vez ensamblada la caja rodante del vehículo, se envía a Ferrajes a través de una estructura aérea que une ambos talleres.
- **Chapa I:** también denominado "Ferrajes" consta de dos plantas. En la planta de arriba (cota 6.76) llega la línea de vehículos de Chapa II y en ella se sueldan y ensamblan las puertas, el capó, el portón trasero y las aletas formando la "carrocería en blanco", es decir, la carrocería ya ensamblada, pero sin pintar. En el piso de abajo (cota 0.00) se dan forma (cintrado) a los tubos de escape fuera de la línea de producción y se envían mediante AGV`s (*Automatic Guided Vehicle*) a la nave de Montaje donde se incorporan de nuevo al proceso.

Figura 7. Localización de los tres talleres con respecto a la carretera Madrid.

2.6. Proceso Productivo

El proceso de fabricación comienza en las zonas de embutición (situada en Carrocerías) donde se cortan las placas de chapa que llegan

enrolladas en forma de bobinas, en las llamadas líneas de corte dando lugar a los llamados flanes, que son las chapas cortadas de la forma necesaria para ser posteriormente embutidas. Tras las líneas de corte se encuentran las líneas de embutición, las cuales dan la forma definitiva a las distintas piezas o referencias mediante prensas de gran tamaño,

El taller de embutición está altamente automatizado; incluso las líneas más antiguas trabajan automáticamente, fabricando gran cantidad de piezas. Las líneas más modernas constan de varias prensas de una gran potencia y un elevado tonelaje, las cuales son cargadas y descargadas mediante un encadenamiento de robots.

De dichas piezas, las grandes se envían a Chapa II y las pequeñas a la zona de soldadura en Carrocerías para el montaje de pequeños conjuntos, como cunas, escapes, etc. Las áreas de soldadura están dotadas de medios automáticos de fijación y sistemas robotizados de soldadura que dan forma a la carrocería, completando así la estructura del vehículo.

El taller de Chapa II consta de dos líneas principales abastecidas por siete líneas de manutención. La primera línea principal se denomina P1BR, en ella se ensambla la estructura de la Base Rodante, y es abastecida por cinco líneas de manutención que incorporan a la P1BR los conjuntos soldados de la carrocería inferior del vehículo (véase Figura 8).

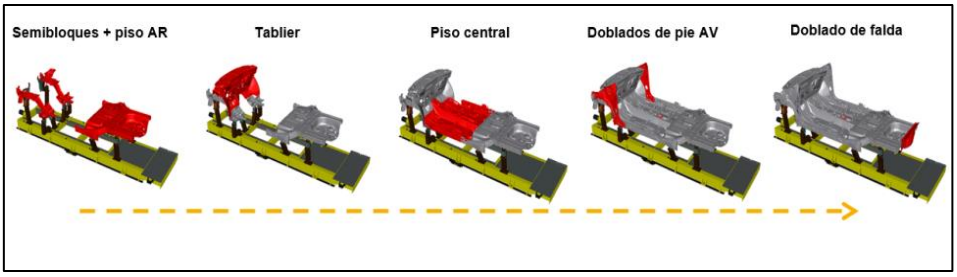

Figura 8. Flujo de producción de la línea P1BR.

La segunda línea principal se denomina P1CS (Estructura Caja) y es abastecida por dos líneas de manutención que suministran principalmente los lados de caja, el techo y las traviesas superiores para ser ensambladas en la mísma (véase Figura 9).

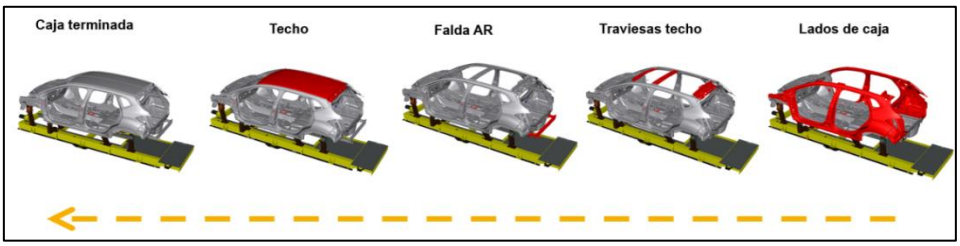

Figura 9. Flujo de producción de la línea P1CS.

Una vez terminada la Estructura de la Caja, se hace pasar la línea de producción a través de un puente totalmente cubierto hacia Chapa I donde, como ya se ha explicado antes, se ensamblarán a la carrocería las ya mencionadas puertas, capó, portón trasero y las aletas. Tras haber pasado por Chapa I, obtenemos la denominada "carrocería blanca que se envía al taller de pintura.

En el Área de Pintura, todas las aplicaciones de pintura y masillas se realizan mediante robots y máquinas de pintado automático. Hay dos líneas que proporcionan a la carrocería una inmejorable protección contra la corrosión y preparan la superficie para la posterior aplicación del color correspondiente. Posteriormente se aplica una pintura selladora (aprestos) para facilitar el agarre entre la cataforesis y las pinturas de acabado, mediante máquinas automáticas que consiguen un espesor uniforme. A continuación, se hace pasar el coche por una estufa a una temperatura elevada. Finalmente, el vehículo recibe una protección definitiva y final, que consiste en la base coloreada según las características de cada vehículo y el barniz que aporta un aspecto brillante.

El vehículo ya pintado llega al Área de Montaje donde se lleva a cabo la última fase de producción del coche. El taller está formado por dos plantas. La planta superior consta de dos líneas de Guarnecidos e intercalada entre ellas se encuentra línea de T.M.A. (línea de Mecánica Automatizada). Por último, una línea de Carrusel. Todas las líneas de montaje constan de una longitud de 1.100 m aproximadamente, exceptuando las líneas auxiliares.

Al Taller de Montaje llega la carrocería pintada. Un lápiz óptico lee el código de barras e identifica el modelo, motorización, equipamiento y accesorios. En las líneas de guarnecidos, T.M.A. y terminación incorporan

al coche los diferentes elementos, como guarnecidos de techo, conjunto de pedales, lunas, grupo motopropulsor, asientos, ruedas, fluidos, etc.

Capítulo 3. Proceso de Soldadura

3.1. Introducción

Si en el capítulo anterior se ha hecho una breve introducción del proceso de producción del vehículo, este capítulo se centrará en el proceso de soldadura que se lleva a cabo en el Área de Chapa. Se expondrán los métodos de soldadura que se utilizan en el taller para conseguir ensamblar la carrocería del vehículo, la estructura y componentes de un equipo de soldadura y las operaciones de mantenimiento que requieren.

Además de todo lo anterior, también se describirán los documentos que son necesarios para validar una operación y poder ponerla en marcha, y las pruebas de calidad que se realizan sobre muestras aleatorias de la producción para ver si cumplen con la norma interna de calidad Renault.

En el presente capítulo se quiere introducir los conceptos o nociones principales para poder comprender el proceso que se lleva a cabo en el Taller y, más concretamente, en la isla robotizada que será objeto de estudio en el proceso de simulación.

3.2. Fundamentos de la Soldadura

La soldadura es una operación que consiste en unir dos o más piezas metálicas, llevándolas a una temperatura determinada, con o sin aporte de material de aportación y con o sin aplicación de presión, con el fin de realizar una unión molecular íntima, total y estanca en una zona determinada.

Es necesario suministrar calor hasta que el material de aportación, si le hay, funda y una ambas superficies, o bien lo haga el propio metal de las piezas. Los efectos de la soldadura resultan determinantes para la utilidad del material soldado.

3.2.1. Tipos de soldadura

Se pueden distinguir dos tipos principales de soldadura que son:

-**Soldadura heterogénea:** es aquella que se realiza interponiendo entre las superficies a ensamblar, una aleación de aportación cuya naturaleza y composición son totalmente diferentes de las que presentan los materiales base.

En este tipo de soldadura, el material se caracteriza por tener una temperatura de fusión netamente inferior a la de los materiales a unir y se pueden distinguir:

- *Soldaduras blandas*, normalmente a base de estaño, con un punto de fusión muy bajo, unos 200ºC y resistencia mecánica reducida.
- *Brasajes blandos*, con materiales de aportación que tienen un punto de fusión comprendido entre los 250 y los 330ºC, normalmente suelen ser soldaduras a base de plata, cobre, cinc, etc.
- *Brasajes fuertes*, caracterizados por un punto de fusión en el material de aportación comprendido entre los 600 y los 900ºC. Corresponden al bronce y a las aleaciones de plata, cobre, cinc, etc.

-**Soldadura homogénea:** Los materiales que se sueldan y el metal de aportación, si lo hay, son de la misma naturaleza. Puede ser oxiacetilénica, eléctrica (arco voltaico o por resistencia), etc. Si no hay metal de aportación, las soldaduras homogéneas se denominan autógenas.

Por soldadura autógena se entiende aquella que se realiza sin metal de aportación, de manera que se unen cuerpos de igual naturaleza por medio de la fusión de los mismos, así al enfriarse, forman un todo único.

Dentro de la soldadura homogénea existen tres métodos de unión, por presión, por fusión y por presión y fusión. En este trabajo nos centraremos en las dos últimas.

Por fusión: un 15% aproximadamente es el porcentaje de las uniones por soldadura que se realizan en el Taller de Soldadura son mediante éste método.

Dentro de este tipo de soldadura podemos distinguir la **soldadura eléctrica por arco**. Este tipo de soldadura es un procedimiento que consiste en hacer pasar la corriente eléctrica entre dos conductores, el electrodo y las piezas a soldar. Las temperaturas que se alcanzan pueden superar los 3.500 ºC, fundiéndose el metal del electrodo y depositándose sobre las piezas y los bordes de las piezas a unir. Se obtiene de esta forma un baño de metal fundido que al solidificar proporciona la unión entre las piezas.

Los diferentes procedimientos utilizados vienen determinados por:

- Tipo de corriente (continua o alterna) y aparato que la produce (generador o convertidor).
- Tipo electrodo (de grafito o metálico).
- Revestimiento del electrodo (con o sin revestimiento).
- Atmósfera que rodea al electrodo (CO2, argón, helio, o mezclas de gases).

La soldadura presenta ciertas ventajas frente a otros métodos. Es más rápida debido a la alta concentración de calor que se genera y por lo tanto produce menos distorsión en la unión.

Los tipos de soldadura son:

- Electrodo de carbono.
- Arco doble de carbono.
- Electrodo de carbono en atmósfera inerte.
- Hidrógeno atómico.
- Electrodo metálico desnudo.
- Electrodo metálico revestido.
- Arco sumergido.
- TIG.
- MIG.
- MAG.
- Soldadura de espárragos.
- Plasma.

Con presión y fusión: este tipo de soldadura es el más utilizado en la factoría. En este caso las zonas a soldar se calientan hasta una temperatura inferior al punto de fusión y después se aplica sobre las superficies así calentadas la presión de forja.

Dentro de la soldadura por presión con fusión, el método de soldadura utilizado es la **soldadura por resistencia** (un 94,5% de utilización aproximadamente). Es la unión obtenida entre dos o más piezas motivada por la elevación de temperatura que se logra mediante el paso de una corriente eléctrica combinada con dos esfuerzos mecánicos (véase Figura 10).

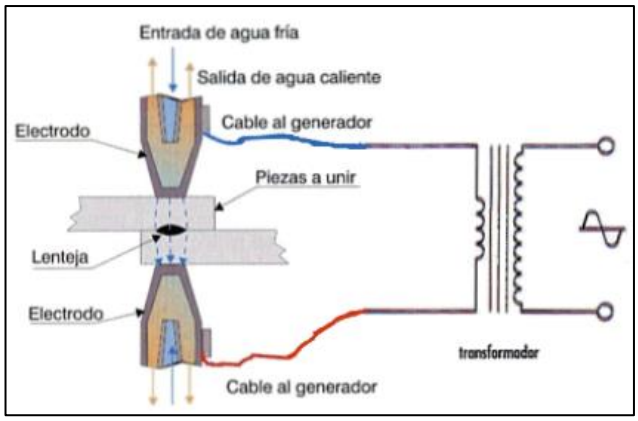

Figura 10. Esquema de soldadura por resistencia.

En la soldadura por resistencia, son las piezas a soldar las que forman esta resistencia eléctrica, y es pues en éstas donde se desarrolla el calor necesario para la obtención de una fusión local y, por consiguiente, de una soldadura.

El calor se genera debido al "Efecto Joule". Paso de la corriente eléctrica a través de la resistencia del propio material a soldar.

La ecuación fundamental del calor empleado en ejecutar un punto de soldadura:

$$Q = I^2 * R * T * K$$

En donde:

- I= Intensidad de corriente circulando a través del material a soldar.
- T=Tiempo que está circulando la corriente eléctrica.
- R=Resistencia al paso de la corriente desde el área de contacto de un electrodo hasta el área de contacto del otro.
- K=Factor representando las pérdidas por conducción, convección y radiación, disipada por los electrodos, pieza a soldar o entorno (0,24).

Según la forma en que se comunique a las piezas el paso de corriente y el esfuerzo mecánico, tendremos los tres grandes métodos de soldadura por resistencia:

Primero se introduce la *soldadura por puntos* que es el método de soldadura más utilizado en el taller. Su funcionamiento consiste en que la corriente es conducida y localizada por dos electrodos. El tiempo de paso de la corriente y su valor es controlado por un secuenciador. Una cantidad de material se funde al mismo tiempo que los electrodos ejercen el esfuerzo de forjado necesario para la obtención de una buena soldadura.

Se distinguen dos tipos de puntos:

- *Puntos de Geometría*: son puntos de soldadura cuya modificación puede afectar a la geometría de la pieza a soldar. Deben realizarse de forma precisa debido a que son los más críticos de la estructura.
- *Puntos de Terminación*: son los puntos realizados para reforzar las uniones entre las piezas a soldar.

Existe un procedimiento derivado de la soldadura por puntos denominado soldadura por protuberancias, en el que el paso de la corriente se obtiene practicando unos resaltes o protuberancias en las piezas a soldar (véase Figura 11).

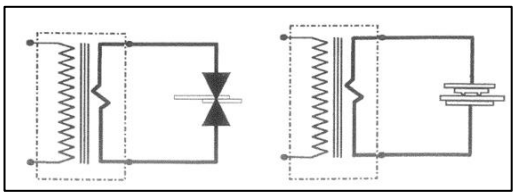

Figura 11. A la izq. se observa el esquema eléctrico de una soldadura por puntos. A la drch. el esquema eléctrico de una soldadura por protuberancias.

Tanbié se encuentra la *soldadura por roldanas* que se diferencia de la anterior en que la forma de los electrodos en este tipo de soldadura son rodillos a los cuales se les imprime un movimiento de rotación (véase Figura 12).

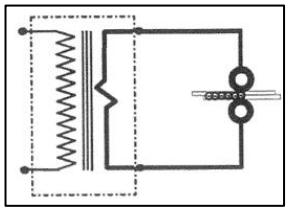

Figura 12. Esquema eléctrico de una soldadura por roldanas.

Por último, se encuentra la *soldadura a tope*. Dentro de este tipo de soldadura, el más utilizado es la soldadura por chisporroteo y consiste en acercar muy lentamente dos piezas bajo tensión. En un momento determinado se establece entre ellas un arco eléctrico acompañado por la combustión de una cantidad de material. Cuando una cierta parte de material ha sido quemada, las piezas alcanzan la temperatura adecuada y, en ese momento, se juntan rápidamente y con fuerza una contra la otra, realizando así el forjado (véase Figura 13).

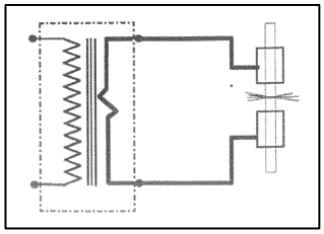

Figura 13. Esquema eléctrico de una soldadura por chisporroteo.

En la siguiente ilustración podemos observar una clasificación de los distintos tipos de soldadura que existen, y en azul, los tipos de soldadura

que se utilizan en los talleres de Chapa y que se detallarán a continuación (véase Figura 14).

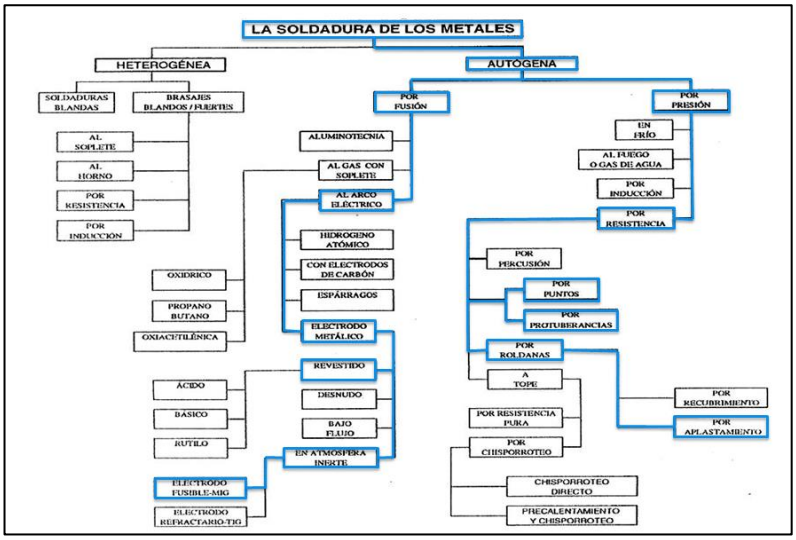

Figura 14. Clasificación de los distintos tipos de soldadura de los metales con aporte de material.

-**Soldadura por Goujones:** es un tipo de soldadura con aporte de material en el que se produce la fijación de dos piezas mediante la incorporación de un Goujon (perno con cabeza soldable) como podemos ver en la siguiente ilustración (véase Figura 15). Es condición para el procedimiento de soldadura que el perno y la superficie de la pieza entren en contacto, de manera que con la activación del comando de inicio la corriente previa fluya a través del perno y de la pieza en cortocircuito.

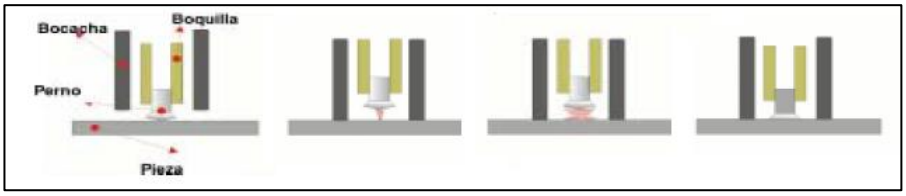

Figura 15. Proceso de soldadura por goujones.

Una vez estabilizada la corriente previa, el motor linear que lleva el cabezal de soldadura retira el perno de la pieza, según una curva predefinida y programada, y se enciende el arco de corriente previa.

Cuando el perno de soldar ha alcanzado su altura de elevación, se activa la corriente principal de soldadura, que intensifica la tensión del

arco de tal manera que tiene lugar una fusión, tanto del extremo frontal del perno como de la superficie de la pieza.

Mientras el arco de corriente produce un baño de metal líquido en la pieza y en el extremo frontal del perno, se invierte el motor linear. Por medio de un movimiento mecánico controlado, el perno es apretado hacia el baño de fusión. El motor linear permanece en esta posición durante el tiempo de espera programado.

El arco voltaico se apaga al introducirse el perno en el baño de soldadura, de manera que la soldadura homogénea se solidifica y la cabeza de soldadura puede ser retirada otra vez del perno, después de desconectarse la corriente para la soldadura.

El procedimiento de soldadura está finalizado al ser retirada la cabeza de soldadura del perno, y puede ser repetido después de haberse efectuado la recarga de los pernos.

-**Soldadura láser.** Cada vez más, el láser se impone progresivamente en los procesos de la soldadura. Aquí distinguiremos entre tres variantes diferentes: soldadura de conducción calorífica, soldadura profunda, soldadura de láser.

Aunque la soldadura láser se puede realizar con o sin material de aportación y posibilita que se suelden metales y aleaciones desiguales, como por ejemplo aluminio/acero o acero negro/blanco, la hemos clasificado en sin aporte de material debido a que es la que se lleva a cabo en la factoría de Valladolid.

Los tipos de soldadura láser existentes son:

- ***Soldadura de conducción calorífica:*** la soldadura de conducción calorífica necesita poca potencia. La energía del láser se transforma en calor en la superficie del elemento, así que se forma un baño de fusión que transmite la energía calorífica por convección. Los gases de protección de soldadura pueden influir en la convección. El perfil de penetración se puede ajustar a los requerimientos de la soldadura como en la soldadura de arco.
- ***Soldadura profunda:*** la soldadura profunda necesita potencias más altas, ya que el metal no solamente es fundido sino también evaporado. Así el láser se introduce profundamente en el material

y se forma el llamado *keyhole* (ojo de cerradura). En este *keyhole* se produce una columna de plasma, que absorbe la energía del láser y la transmite al material. El resultado es un proceso continuo de soldadura. La nube de plasma que sale del canal de vapor tiene que evaluarse mediante un gas de protección, para evitar que absorba la energía del láser sin transmitirla al proceso de soldadura.

- ***Soldadura láser:*** la soldadura de láser se parece a la soldadura de conducción calorífica. Hay que tener en cuenta la energía necesaria del perpendículo. Especialmente en la industria del automóvil, se ha impuesto la soldadura de láser. Además de ventajas, como la baja aportación de calor y la poca deformación metálica, la resistencia a la corrosión del perpendículo y la fácil elaboración juegan aquí un papel importante. También la seguridad de la unión y la alta durabilidad convierten a la soldadura del láser en una buena alternativa.

3.2.2. Otros tipos de unión

Aunque no sea un tipo de soldadura, en este apartado vamos a mencionar otros dos tipos de unión que se producen en el Taller de Soldadura sin incurrir en detalles debido a que estos tipos de unión no se efectúan en la Isla a simular.

- ***Unión por mástico:*** masilla o pegamento que dependiendo del tipo pueden utilizarse como elemento estructural o aislante frente a ruidos y vibraciones. Su principal aplicación es facilitar uniones y estanqueidad.
- ***Unión por engastado:*** introducción de piezas (tornillos, rótulas, ...) en chapas, mediante presión.

3.3. Validación y verificación de una operación de soldadura

Toda operación debe ser validada y verificada antes de llevarse a cabo. Para ello existen las Fichas de Operación en las cuales se garantiza:

- Que una operación se realice siempre de la misma forma y en el tiempo requerido.

- Una mayor calidad en un menor ciclo y en el tiempo predeterminado, garantizando la seguridad.

Una ficha de operación identifica fácilmente las principales fases y puntos clave de una operación. Nos ayuda al aprendizaje de la misma ya que nos facilita las instrucciones, nos permite encontrar puntos de mejora y la observación de las habilidades.

Podemos distinguir entre Fichas de Operación Standard (F.O.S.) y Fichas de Operación Proceso (F.O.P.).

F.O.S.: detallan una operación realizada por un operario. Se pueden distinguir:

- *F.O.S. de análisis*: son los documentos que reflejan cualquier operación que implique el mismo movimiento en la misma cantidad de tiempo en un ciclo determinado.
    - Nombre de la operación.
    - Herramientas y componentes.
    - Fecha de revisión.
    - Puntos revisados.
    - Conformidad del Jefe de Departamento, Jefe de Taller y Jefe de Unidad de los tres turnos.
    - Análisis de la operación: se analiza la secuencia detallada de una operación.
    - Tiempo: es el requerido para que un trabajador formado realice correctamente las operaciones que tiene asignadas asegurando la calidad y seguridad.
    - Etapa Principal: define lo que haces, dónde lo haces y con qué lo haces.
    - Punto Clave: son las instrucciones que ayudan a conseguir la calidad, la seguridad y facilitan la operación.
    - Dibujo explicativo: se refleja gráficamente las piezas a montar, así como los esquemas de ensamble, etc.

- *F.O.S. de procedimiento*: aquellas que reflejan el resto de las operaciones “no cíclicas”. Ejemplo: cambio de cápsulas, cambio de carrete de CO2, etc.

La F.O.S. de procedimiento está constituida por los mismos apartados que la F.O.S de análisis exceptuando el apartado de análisis de la operación.

F.O.P.: detallan una operación realizada por una máquina. Consta también de los mismos apartados que una F.O.S. de análisis.

3.4. Estructura y funcionamiento de un equipo de soldadura por resistencia por puntos

Una vez introducidos los diferentes tipos de soldaduras existentes, y los utilizados en el Área de Soldadura, comentaremos la estructura y componentes de un equipo de soldadura. También describiremos las etapas en las que se divide un proceso de soldadura y las operaciones de mantenimiento que se deben llevar a cabo.

3.4.1. Equipo de soldadura

Dentro de la soldadura por puntos podemos encontrar que ésta se realice de forma manual o robotizada. En este trabajo nos centraremos en la robotizada, ya que en el taller de Chapa II la automatización es del 99% y no hay apenas operaciones de soldadura manual.

La soldadura robotizada se lleva a cabo gracias a robots industriales, que son máquinas de manipulación automática, reprogramables y multifuncionales con tres o más ejes, cuyo objetivo es la ejecución de diversas operaciones, como por ejemplo el posicionado de piezas, soldadura de piezas y un largo etcétera.

La soldadura realizada mediante robots puede ser de dos tipos:

- *Embarcada*: se entiende por soldadura Embarcada aquella en la cual el robot tiene incorporada la pinza de soldar o una pistola de *Goujones*. Realiza puntos de soldadura o perforaciones y uniones mediante *Goujones* directamente sobre las chapas apoyadas sobre unos aprietes (véase Figura 16).

Figura 16. Robot de soldadura por resistencia embarcada.

- *Con pinza al suelo*: este tipo de soldadura robotizada consiste en que el robot, en vez de tener un útil de soldadura, consta de un útil de manipulación y se encarga de recoger una pieza de una maqueta con el fin de trasladarla a una pinza de soldar fijada al suelo. Mediante movimientos precisos procede a realizar el proceso de soldadura. Una vez realizado los puntos programados en un ciclo, el robot depositará la pieza en el siguiente apriete y volverá a su posición inicial para comenzar un nuevo ciclo (véase Figura 17).

Figura 17. Robot de soldadura por resistencia con pinza al suelo.

Un equipo de soldadura robotizado está formado por:

- *Manipulador:* el manipulador es un mecanismo formado por elementos dispuestos en serie y que están articulados entre sí (véase

Figura 18). Consta de accionamientos, transmisores, frenos, sistemas de medida, etc.

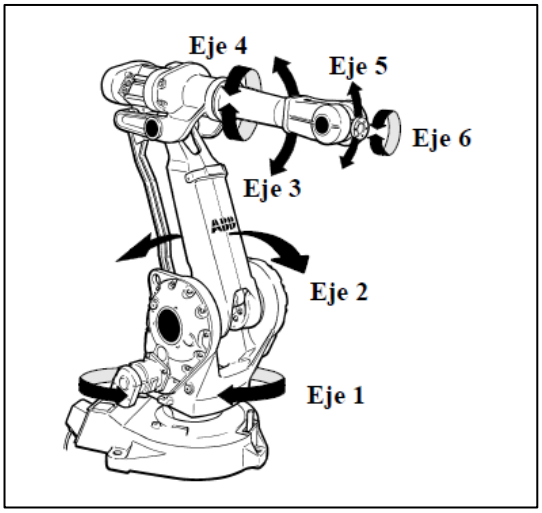

Figura 18. Estructura del robot reflejando la ubicación de sus seis ejes.

El manipulador es básicamente la estructura del robot industrial a los cuales se les puede incorporar diferentes útiles. Un robot industrial en el taller de soldadura puede ser:

- *Robot de Soldadura Embarcado*: si realiza operaciones de soldadura y tiene como útil instalado la pinza de soldar.
- *Robot de Soldadura con pinza al suelo*: si realiza operaciones de soldadura, pero tiene como útil instalado una herramienta de manipulación que utiliza para aproximar la pieza una pinza instalada en el suelo.
- *Robot de Manipulación*: si tiene instalado un útil de manipulación y exclusivamente es destinado a funciones de manipulación de piezas, es decir, en su ciclo no se realiza ninguna operación de soldadura.
- *Robot de Goujones Embarcado*: es un tipo de robot que tiene instalado una pistola de *Goujones*. Realiza operaciones de fijación de los mismos, los cuales sirven como unión de chapas y además sirven como apoyo para grapas, una vez llegue la carrocería a las líneas de montaje del vehículo.
- *Robot de Mástico*: robot que tiene como útil una pistola de mástico realizando operaciones de adhesión de chapas u operaciones de estanqueidad.

En la isla que se va a simular sólo hay robots de los tres primeros tipos por lo que más adelante se detallarán los componentes de los mismos.

La simulación se podría exportar a otras islas que sí tuviesen robots de *Goujones* o de mástico ya que realizan ciclos iguales que los anteriores.

- *Pinza de soldadura:* útil que se incorpora a la estructura del robot, mediante una placa interface, y permite que éste realice las operaciones de soldadura que tenga programadas. Existen pinzas para robots (embarcadas), pinzas al suelo (también para robots como se ha explicado anteriormente), pinzas automáticas (para montaje) y pinzas manuales.
  Su estructura puede ser muy diversa, están diseñadas según la situación donde se tenga que aplicar el punto de soldadura (véase Figura 19). Constan básicamente de un cuerpo de pinza, un brazo, un porta electrodo, un sistema de refrigeración por agua y un elemento (cilindro) que proporciona la presión requerida en punta. Pueden ser neumático (aire) o hidráulico (aceite), este último para las pinzas manuales.

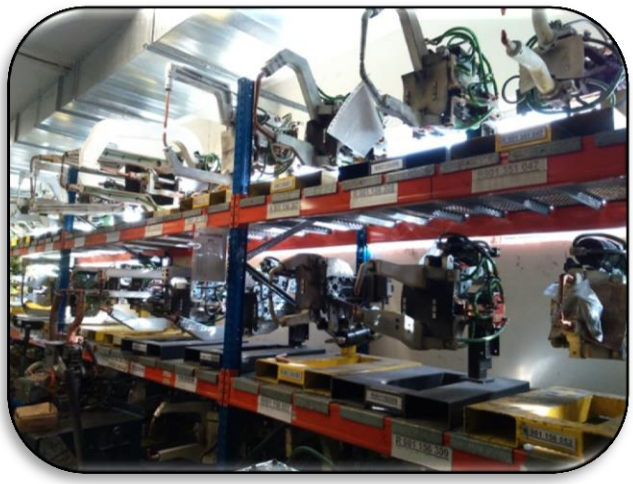

Figura 19. Imagen del taller mecánico en la que se puede observar los distintos tipos de pinzas existentes.

Básicamente existen dos tipos de pinzas, las denominadas “X” y las denominadas “J”, en ambos casos uno de los brazos es fijo y el otro móvil, que se desplaza por medio del cilindro hasta acostarse sobre el

brazo fijo, dando la presión requerida para efectuar una soldadura correcta (véase Figura 20).

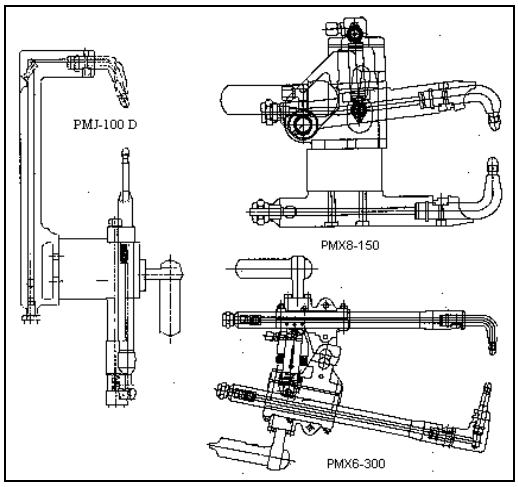

Figura 20. Tipos de pinzas en función de su estructura. (Izq.: pinza "J". Drcha.: pinza en "X").

Los elementos más importantes son:

- *Electrodos y Porta cápsulas*: se encuentran en la parte final de los brazos de una pieza y concentran la corriente y el esfuerzo de presión. Tienen diversas formas y medidas, según donde tengan que soldar el punto, adaptándose a la geometría de la pieza. Se fabrican con un material de gran conductividad eléctrica y gran dureza para ejercer la mínima resistencia posible (véase Figura 21).

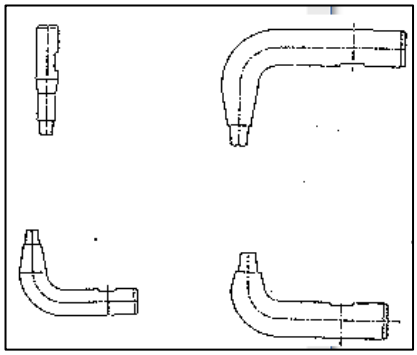

Figura 21. Tipos de electrodos en función de su forma.

- *Cápsulas*: las cápsulas son fundas en forma de capuchón fabricadas del mismo material que los electrodos y/o porta cápsulas y su función principal es conducir la corriente y resistir las altas temperaturas. Existen gran variedad de formas y tamaños, son fácilmente

recambiables y se montan sobre los porta-cápsulas. Cada cierto número de puntos realizados se deben fresar para evitar que se degraden demasiado (véase Figura 22).

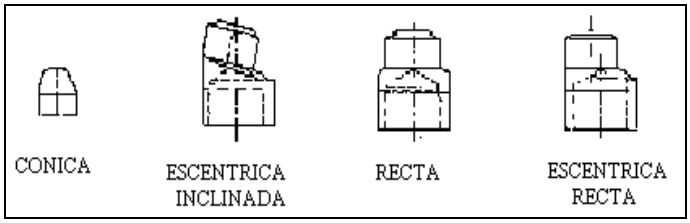

Figura 22. Tipos de cápsulas en función de su forma.

- *Refrigeración*: la refrigeración es imprescindible para realizar una soldadura de calidad, ya que si ésta es deficiente puede provocar un deterioro prematuro de las cápsulas, lo que conlleva una soldadura de baja calidad o deficiente.
- *Armario de control (BAIE):* controlador del Robot compuesto por una serie de rutinas que integran las coordenadas de las trayectorias y puntos de soldadura que lleva a cabo el robot. Es el elemento que contiene toda la electrónica y software necesario para controlar el funcionamiento del manipulador (véase Figura 23).

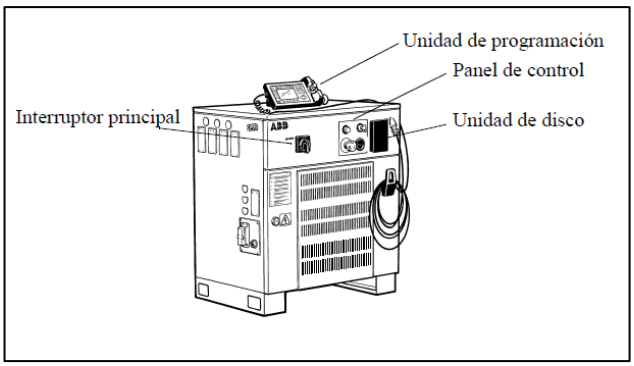

Figura 23. Ilustración de un controlador BAIE.

Está constituido por:

- Panel de control.
- Unidad de programación.
- CPU principal.
- Variadores de frecuencia.
- Cartas E/S.
- Carta SMB.

- *Armario de Soldadura*: en su interior se encuentra el secuenciador. Controla la soldadura, acostaje, forja, cadencia y desfase mediante una secuencia programada. Está situado en un Cuadro de Mando con pulsadores y llaves de selección para facilitar el empleo de las funciones más habituales, a la vez que mediante lámparas permite la visualización de las señales más importantes.

3.4.2. Funcionamiento de un proceso de soldadura robotizado a puntos

Una vez validada y verificada la operación, se detallarán las fases de una operación de soldadura en la que se pueden distinguir distintas etapas:

- *Aproximación:* el robot sitúa la pinza, en caso de ser soldadura con pinza embarcada, en la posición exacta con las chapas a soldar entre sus electrodos. En caso de que fuese robot de soldadura con pinza al suelo, antes de aproximar la pieza al punto exacto de soldadura, debe coger la pieza o piezas del apoyo pertinente.
- *Apriete:* tiempo en el que los electrodos bajan y se ejerce una presión a cada lado de la chapa.
- *Soldadura:* consisten el tiempo de paso de la corriente eléctrica entre los dos electrodos.
- *Forja:* comprende el tiempo que transcurre desde que cesa la corriente hasta que se elevan los electrodos a la posición inicial.
- *Retroceso:* una vez soldada la pieza, el robot, si es embarcado, vuelve a su posición inicial para comenzar un nuevo ciclo. Si el robot es de soldadura con pinza al suelo, antes de volver a su posición inicial, debe posicionar la pieza soldada en el siguiente apoyo para que siga el proceso.

Una de las operaciones fundamentales para conseguir una buena soldadura a puntos por resistencia, es que los componentes principales se encuentren en óptimo estado. Todo robot que realiza operaciones de soldadura necesita llevar a cabo dos operaciones de mantenimiento

programadas, el fresado y el cambio de cápsulas, para asegurar la calidad de los puntos de soldadura:

El **fresado** de cápsulas se efectúa, al igual que el cambio de cápsulas, cuando el sistema lo demanda, es decir, cuando las cápsulas llevan un determinado número de puntos de soldadura realizados. Suele llevarse a cabo cuando la pinza ha realizado entre 200 o 250 puntos de soldadura.

Al soldar, las cápsulas alcanzan una temperatura muy elevada que provoca que se descompongan los elementos químicos que sirven de protección de la chapa (galvanizado, etc.). Este proceso provoca la creación de una capa sobre las superficies de contacto que actúa como resistencia, dificultando el paso de la corriente y reduciendo la calidad de la soldadura. Por tanto, se debe limpiar la zona de contacto de las cápsulas.

Al cumplirse el número de puntos de soldadura secuenciados, la pinza deja de soldar y la fresadora se pone en marcha.

El fresado consta de las siguientes etapas:

- La pinza, cuyo detector de presencia debe estar activado, coloca el brazo fijo sobre la fresa teniendo precaución de que quede perpendicular a la fresa.
- Se pulsa la pinza para que cierre y se mantiene hasta que cesa el fresado, completando el ciclo de fresado.
- La pinza retorna a su posición inicial y se renueva la operación de soldadura

El **cambio de cápsulas** *es* uno de los elementos más importantes en un proceso de soldadura ya que las cápsulas sufren un desgaste al finalizar su ciclo de vida (10.000 puntos de soldadura) por lo que deben sen reemplazadas.

El cambio de cápsulas viene determinado por una secuencia programable que se encuentra integrada en el equipo de soldadura que determina cuántos puntos de soldadura se deben realizar para fresar primero y cuántos para sustituir las cápsulas.

Si se produce el estallido de un punto en una soldadura, también se debe realizar el cambio de cápsulas debido a que la zona se deteriora y

los siguientes puntos serían defectuosos. Cuando sucede este tipo de anomalía se deben analizar las causas y comprobar si las piezas tienen un buen acostaje, si tienen suciedad u otros elementos extraños y en el caso de pinzas manuales, se debe comprobar el nivel de aceite en el vaso. En todo caso se deben retirar las pinzas para su recuperación y avisar al J.U. detallando la anomalía en la ficha de control.

El cambio de cápsulas se divide en diferentes fases:

- Corte de la entrada de agua y más tarde el del retorno (donde está el control de caudalímentro).
- Extracción de las cápsulas por medio del extractor y montaje de las nuevas mediante un golpe de martillo para el buen encaje en el porta-cápsulas.
- Apertura primero del retorno y posteriormente del agua.
- Verificación de la alineación de los electrodos.

Las cápsulas deterioradas se depositan en el contenedor de chatarra y el secuenciador se programa a cero de nuevo, prosiguiendo la operación.

3.5. Comprobación de la calidad de los puntos de soldadura

La norma de calidad para los puntos de soldadura por resistencia, está recogido en el pliego de condiciones interno de Renault S.A. que regula todo lo referente a soldadura por resistencia.

El aspecto mecánico de un punto S.R. está garantizado por la presencia de un núcleo fundido de diámetro suficiente. Las causas de **no-conformidad** de un punto son las siguientes:

- Punto omitido
- Punto fuera de zona
- Punto aspecto (estallado, perforado, deformado, etc.)
- Punto suelto o pegado
- Punto con diámetro insuficiente

Las pruebas de calidad se llevan a cabo en la sala de destructivo. Este tipo de ensayos pueden ser de tres tipos:

- **Semi-destructivo** (martillo y buril o cortafríos): no genera chatarras, pero es agresivo con los ensambles.
  Requiere un asentamiento posterior de las chapas, causando a veces otros defectos no deseados. Con este sistema, no podemos comprobar los puntos SR en grandes espesores. Su empleo, por tanto, es actualmente muy limitado
- **Destructivo** (desbotonadora): genera la chatarra total de la pieza u órgano comprobado. Es muy efectivo, ya que nos permite conocer no sólo su posición con respecto a los ensambles a soldar, sino también su diámetro en relación al espesor de las chapas soldadas.
- **Ultrasonidos** (ondas sonoras cuya frecuencia está comprendida entre 0,5 y 25 MHz., usando en nuestro caso la frecuencia de 20 MHz.): no genera chatarra alguna, al ser un sistema "*no destructivo*". Permite controlar los puntos SR de aspecto en zonas delicadas como la unión techo, los puntos de soldadura por resistencia (PSR) tapados en la operación siguiente, los PSR inaccesibles que por estar alejados del borde, no se pueden comprobar con el sistema clásico y por supuesto, aquellos puntos en ensambles de gran espesor (≤ 6 mm.). No elimina a los anteriores sistemas, aunque si reduce su aplicación.

Estos métodos se utilizan para observar la resistencia, su presencia o ausencia y su posición y distancia en base a la citada normativa.

La aceptación de puntos una vez desabotonado, en función del diámetro, varía dependiendo de los espesores de la chapa (véase Tabla 1).

Diámetro mínimo del punto	Espesor chapa
3 mm	0.57 mm < e < 0.77 mm
>4 mm	0.82 mm < e < 1.2 mm
>6 mm	1.2 mm < e < 2.0 mm
>8 mm	2.0 mm < e < 3.0 mm

Tabla 1 Relación entre el diámetro del punto y el espesor que debe poseer la chapa para asegurar una soldadura de calidad.

Capítulo 4. La simulación

4.1. Introducción

Este capítulo se ocupa de las etapas que hay que realizar para desarrollar un estudio de simulación. Se presentan los conceptos fundamentales sobre esta técnica para la resolución de problemas.

Históricamente la simulación ha sido empleada en el área la producción: planificación corporativa, control de inventarios, líneas de producción, manejo de materiales, planificación de órdenes de trabajo, etc. No obstante, en la actualidad, es un hecho contrastable su extensión a otras áreas de la empresa y a otros campos de la vida social.

En primer lugar, se describe qué es la simulación, su beneficio y se justifica la necesidad de recurrir a la simulación para estudiar determinados problemas. A continuación, se presentan las ventajas e inconvenientes de la simulación y las aplicaciones para las que está destinada.

4.1.1. Definición y beneficio de la simulación

Hoy en día existen diversas definiciones de simulación, éstas son bastante genéricas y no reflejan correctamente el significado que se quiere dar de la palabra simulación. Para concretar nuestra idea se deben buscar definiciones más extensas y hacer referencia a algunos elementos que hoy en día son claves en su definición.

"La simulación es un eficaz instrumento para el análisis y diseño de sistemas; permite la construcción de modelos que son una representación exacta del mundo real"

"La simulación es una técnica numérica que sirve para conducir experimentos a lo largo del tiempo mediante la ayuda de una computadora digital, entendiendo por tal la realización de pruebas sobre algún modelo (lógico o matemático) que mimetice las respuestas de un sistema frente a ciertas circunstancias, con la finalidad de analizar su comportamiento y evaluar las posibles estrategias a seguir".

Por tanto, cada vez que queramos concretar más la definición de simulación, más larga y compleja será la mísma. Nosotros trabajaremos con la siguiente definición:

"Simular es diseñar un modelo de un sistema o proceso real y realizar con él experimentos que de otro modo no se llevarían a cabo por imposibilidad técnica o por no ser rentables económicamente; y ello con el objeto de observar el comportamiento del sistema o evaluar diferentes estrategias a seguir".

Es conveniente aclarar los conceptos de sistema y modelo. Un sistema es una colección de entidades que actúan e interactúan conjuntamente para la obtención de un fin lógico y un modelo será la pieza clave en todo proyecto de simulación. Se entiende por modelo la representación idealizada de un sistema, teniendo en cuenta que esta representación puede ser matemática, física, mixta...

La simulación se ha vuelto un instrumento necesario para cualquier área de trabajo; por ello, se exponen sus principales beneficios:

- Facilita la toma de decisiones: la simulación al permitir analizar diferentes casos sin tener que llevar a cabo la implantación de los cambios que se requieran, permite decantarse por una opción sin comprometer los recursos que en general son escasos y costosos. Esto tiene una gran importancia ya que una vez tomada una decisión, las correcciones y cambios suelen suponer grandes costes.
- Proporciona control sobre el tiempo, es decir, gracias a la simulación se puede acelerar o ralentizar los fenómenos expandiendo o comprimiendo el tiempo en el simulador. De esta forma, un problema de horas se puede resolver en unos minutos, o se puede examinar con exactitud durante grandes periodos de tiempo un problema que en realidad sucedió durante unos segundos.
- Permite comprender el funcionamiento del sistema. Los usuarios del sistema podrán, aparte de obtener los diferentes resultados variando las entradas, reconstruir las situaciones existentes en el mísmo.

- Análisis de alternativas. Una vez modelado el sistema, se puede analizar nuevos métodos, nuevas estrategias, etc., sin incurrir en pérdidas de dinero y tiempo.
- Permite descubrir errores de diseño en el modelo en lugar de hacerlo en el sistema real. Se analiza el modelo en situaciones extremas para extraer conclusiones de los elementos que causan limitaciones o propician comportamientos deficientes en el sistema.
- Formación de personal. Los modelos de simulación proporcionan un método óptimo para entrenar el personal.

Desde cualquier punto de vista, el incluir métodos y técnicas de simulación en un proceso, sistema, procedimiento, etc., asegura un análisis mucho más conveniente, tanto en consumo de recursos físicos como de logística, además de que se consiguen resultados confiables con un margen de error mínimo.

4.1.2. Usos de la simulación

La utilización de modelos ayuda al estudio de muchos sistemas, ya que intenta predecir o prever lo que va a suceder. Realizar modificaciones sobre un modelo que representa un sistema real, planteando diferentes alternativas, resulta menos costoso que construir un modelo real, observando su comportamiento *in situ* y menos arriesgado que llevar a cabo decisiones erróneas.

Por tanto, las principales razones por las que se realiza una simulación son:

- El elevado coste, e incluso imposibilidad, de observar determinados procesos del mundo real.
- La imposibilidad de realizar la formulación matemática de algunos sistemas.
- El hecho de realizar la formulación del problema, pero no disponer de técnicas analíticas para su resolución.
- La dificultad (moral, social y/o económica) de poder realizar el experimento con el sistema real y poder comprobar la validez de los resultados del modelo matemático utilizado.

Antes de toda simulación, se ha de llevar a cabo un estudio de las diferentes alternativas de simulación de las que se dispone y justificar por qué la que se va a utilizar es la más adecuada para llevar a cabo el trabajo. Más adelante se ha de llevar a cabo una recogida y procesamiento de datos y un análisis y extracción de conclusiones de los resultados obtenidos.

La utilización de la simulación debe basarse en un proyecto de inversión en el que se expongan las especificaciones del software de simulación a utilizar, el presupuesto destinado a consultoría y formación (caso de requerirse), así como las necesidades de hardware.

Para poder detallar una estimación del ahorro en el proceso que se va a derivar de la simulación, hay que definir las áreas y tareas sobre las que influirá y la calidad de la resolución del problema.

Las áreas de estudio más importantes, de cara a analizar la rentabilidad de la simulación, tienden a agruparse en uno de los siguientes ítems:

- Tareas que suponen una mejora de la productividad.
- Tareas que serán eliminadas al emplear la simulación.
- Tareas nuevas y/o adicionales o costes asociados a la simulación.

Los problemas de simulación que se plantean en Ingeniería de Organización consisten, con carácter muy general, en obtener un buen (y si se puede, el mejor) funcionamiento de un sistema que opera con recursos limitados y sujeto a diferentes restricciones. Por ejemplo, la Ingeniería de Organización se ocupa de la asignación de recursos a tareas, del rediseño de instalaciones, de la programación de actividades, etc.

Estos problemas se pueden abordar mediante modelos exactos. La Programación Lineal, la Teoría de Colas, la Programación Dinámica son ejemplos de modelos para cuyo tratamiento existen técnicas exactas. Los modelos de este tipo permiten representar en términos analíticos, tanto el problema como el objetivo que se persigue con su estudio.

Es importante señalar que los modelos de simulación son de carácter descriptivo. Esto significa que permiten reproducir el comportamiento del

sistema, pero, por sí solos no ofrecen soluciones buenas u óptimas con respecto a algún criterio. Los modelos normativos, como la Programación Lineal, permiten describir el comportamiento del sistema y sí guían el proceso de búsqueda de soluciones. Por ello, es importante la intervención del analista para la explotación de un modelo de simulación.

4.1.3. Ventajas e inconvenientes de la simulación

A continuación, se va a exponer las ventajas e inconvenientes más aceptados, debido a que pueden ser subjetivas por estar sujetas a la experiencia.

Las principales ventajas de la simulación son:

- La primera ventaja es que permite el análisis de sistemas que plantean dificultades matemáticas para su estudio. Esto puede deberse a que no exista formulación matemática para la resolución del problema, que no se dispongan de métodos analíticos o que los métodos analíticos sean demasiado caros.
- En segundo lugar, podemos decir que proporciona un conocimiento en profundidad del problema y de su funcionamiento y además permite observar cómo se va a comportar el sistema con las mejoras incorporadas sin haberlas implantado. Con esto conseguimos predecir el proceso, de forma más exacta cuanto más complejo sea el modelo, y anticiparnos a los posibles errores de distribución de recursos, *layout*, etc.
- Existen sistemas reales en los que no se puede experimentar debido a imposibilidad técnica, a que no es posible económicamente o simplemente por motivos éticos. Por tanto, la tercera ventaja es clara, con la realización de una simulación podemos realizar todo tipo de modelos y llevar a cabo sobre ellos multitud de experimentos.
- Es una ventaja importante también la posibilidad de simular los sistemas dinámicos en tres tiempos: tiempo real, tiempo comprimido y tiempo expandido. Esto significa que para sistemas en los cuales el periodo de tiempo es muy corto, como, por ejemplo, el tiempo que tarda en realizar un punto de soldadura una pinza de un robot. Este tiempo se puede expandir para que se aprecie detenidamente. Lo mismo

sucede con los procesos que se requieren grandes periodos de tiempo para que ocurran cambios, como los procesos geológicos. Estos procesos al contrario que los anteriores se pueden comprimir para poder observar cómo se modifica el sistema.

- Para finalizar también podemos destacar que la simulación puede utilizarse para formación del personal, para que adquieran experiencia sin suponer un coste excesivo a la empresa en recursos y tiempo.

A continuación, se exponen los inconvenientes:

- El principal inconveniente es que, si el modelo es muy complejo, la simulación puede consumir multitud de recursos, tanto en tiempo como en capital.
- Como segundo inconveniente podemos destacar el problema de la confianza de la simulación, es decir, hasta qué punto los resultados obtenidos son fiables y representativos. Para aumentar la confianza hay ciertas etapas como son las de validación y verificación que se explicarán más adelante.
- Es conveniente saber que es necesario un conocimiento exhaustivo del sistema, para poder realizar un modelo lo más realista posible, lo que implica en general un proceso largo y costoso.
- El grado de exactitud no se conoce hasta que no se llevan a cabo pruebas sobre un sistema real, ya que durante el proceso de modelado se han podido haber despreciado variables importantes del sistema.
- Es un sistema de prueba y error que produce diferentes soluciones al realizarse repetidamente, ante unas mismas entradas. No es, por tanto, una técnica de optimización, aunque sí se puede mejorar la solución inicial mediante tanteo.
- El coste de un proyecto de inversión en simulación puede considerarse muchas veces un inconveniente. Aunque si tenemos en cuenta los costes en que se incurría si se realizasen sobre el sistema las diferentes modificaciones propuestas, más que una desventaja es claramente una ventaja.

- Cada modelo es único. Sus soluciones y esquemas de funcionamiento no son normalmente transferibles a otros problemas, aunque sí pueden serlos sus elementos de forma independiente, sobre todo si se utilizan simuladores, lenguajes específicos de simulación e incluso programación modular.

4.1.4. Aplicaciones de la simulación

Las áreas de aplicación de la simulación son muy amplias debido a su gran flexibilidad y potencia. Prácticamente no quedan campos en los cuales la simulación no se haya empleado con más o menos profusión y se pueden presentar una serie de ejemplos como son:

- Análisis del impacto ambiental causado por diversas fuentes.
- Análisis y diseño de sistemas de manufactura.
- Análisis y diseño de sistemas de comunicaciones.
- Evaluación del diseño de organismos prestadores de servicios públicos (por ejemplo: hospitales, oficinas de correos, telégrafos, o casas de cambio, etc.).
- Análisis de sistemas de transporte terrestre, marítimo o por aire.
- Análisis de grandes equipos de cómputo.
- Análisis del departamento de producción de una fábrica.
- Adiestramiento de operadores industriales.
- Planificación para la producción en industrias alimenticias.
- Análisis financiero de sistemas económicos.
- Evaluación de sistemas tácticos o de defensa militar.

Aunque cualquier actividad dentro del campo de la producción ha sido objeto de proyectos de simulación, no implica que sea un campo sobre-explotado, debido a que la propia evolución de los sistemas productivos ha hecho necesario continuas mejoras en los análisis. Por otro lado, la diversidad de los propios sistemas hace que un proyecto concreto sea necesario para cada caso.

Por tanto, dentro de las aplicaciones de la simulación, cabe destacar el amplio abanico de problemas que las técnicas de simulación permiten analizar. Cabe esperar que en el futuro la simulación sea más interactiva,

permitiendo al usuario modificar el entorno en función de los resultados que se vayan produciendo.

4.2. Análisis y modelado de sistemas

Los objetivos de este apartado son:

- Discutir los conceptos de “sistema”,” modelo”,” simulación” y” marco experimental”.
- Conocer las características principales de los sistemas.
- Estudiar los elementos principales de los modelos.
- Analizar el proceso de construcción de modelos.
- Comparar y reconocer los distintos tipos de modelos.

4.2.1. Sistemas

Un sistema es un conjunto de entidades, las relaciones entre las mismas y el correspondiente funcionamiento objeto de estudio para el simulador; es decir, es un conjunto de elementos unidos por relaciones de interacción o interdependencia que forman un conjunto común. Algunos ejemplos de sistemas son:

- Una planta de fabricación con máquinas, personal, dispositivos de transporte y almacén.
- El servicio de emergencias de un hospital, incluyendo al personal, las salas, el equipamiento y el transporte de los pacientes.
- Una red de ordenadores con servidores, clientes, dispositivos de disco y de cinta, impresoras, etc.
- Un supermercado con control de inventario, cajeros y atención al cliente.
- Un parque temático con atracciones, tiendas, restaurantes, trabajadores, clientes y aparcamientos.

Las características más destacadas de los sistemas son:

- *Sinergia:* es la integración de elementos que da como resultado algo más grande que la simple suma de éstos, es decir, cuando dos o más elementos se unen sinérgicamente

crean un resultado que aprovecha y maximiza las cualidades de cada uno de los elementos.

- *Recursividad:* se puede entender por recursividad el hecho de que un sistema esté compuesto a su vez de objetos que también son sistemas (que un sistema sea sub-sistema de otro más grande).
- *Realimentación:* también llamada retroalimentación o por su traducción en inglés *feedback*. Son los procesos mediantes los cuales un sistema abierto recoge información sobre los efectos de sus decisiones internas en el medio, información que actúa sobre las decisiones (acciones) sucesivas.
- *Equifinalidad:* este principio significa que idénticos resultados puede tener orígenes distintos.
- *Homeóstasis:* es el equilibrio dinámico entre partes del sistema, por medio del flujo continuo de materiales, energía e información. El sistema tiene una tendencia a adaptarse con el fin de alcanzar un equilibrio interno frente a los cambios externos del medio ambiente.
- *Entropía:* es la tendencia que los sistemas tienen al desgaste, a la desintegración. La entropía aumenta con el paso del tiempo. En una organización la falta de comunicación o información, el abandono de estándares, funciones o jerarquías trae el aumento de entropía. A medida que la entropía aumenta, los sistemas se descomponen en estados más simples. Si aumenta la información, disminuye la entropía, pues la información es la base de la configuración y el orden.
- *Complejidad:* por un lado, indica la cantidad de elementos de un sistema (complejidad cuantitativa) y, por otro, sus potenciales interacciones (conectividad) y el número de estados posibles que producen a través de éstos (variedad, variabilidad). La complejidad sistemática está en directa proporción con su variedad y variabilidad, por lo tanto, es siempre una medida comparativa. Los sistemas son entes muy complejos, por lo que será necesario establecer hipótesis simplificadoras que permitan abordar su estudio sin perder rigurosidad.

4.2.1.1. Límites de un sistema

Un sistema posee unos límites en el espacio en el que está incluido que le separan del exterior. Se deben seleccionar de tal forma que se incluyan en su interior sólo aquellos necesarios para generar el comportamiento que muestra el sistema.

La selección de elementos pasa por estimar cuáles son los que interactúan para producir el comportamiento a investigar (elementos interiores), excluyendo los que son irrelevantes (elementos exteriores).

Existe una regla que determina el límite de un sistema, planteando que "la relación causa-efecto entre el medio y el sistema son unidireccionales, mientras que los elementos en el interior del sistema están relacionados por medio de bucles de realimentación que determinan una fuerte interacción entre ellos".

Gracias al concepto de límite, se puede hacer una clasificación de los elementos que forman un sistema, en:

- Elementos exógenos, susceptibles de ser modificados desde el exterior.
- Elementos endógenos, cuyo comportamiento viene determinado por la estructura del sistema.

4.2.1.2. Estudio de sistemas

El procedimiento ancestral para observar el comportamiento de los sistemas ha sido la experimentación, de hecho, ha sido el conocimiento que nos ha servido para avanzar en el conocimiento. Cuando es posible realizar experimentos sobre un sistema real, se tiene sin duda, enormes ventajas frente a la simulación ya que ésta depende de su grado de exactitud. Sin embargo, la experimentación tiene sus limitaciones, debido a que en ocasiones es inviable o desaconsejable experimentar con un sistema real.

Algunas de las razones por las cuales la experimentación con el sistema real puede resultar inviable son:

- Que el sistema no exista aún físicamente.
- Elevado coste económico del experimento.

- Que el experimento produzca perjuicio o incomodidad.
- Tiempo del experimento demasiado largo, o por defecto, demasiado corto.
- Experimentos peligrosos.
- En ocasiones el experimento requiere modificar variables que en el sistema real o bien no están accesibles o no pueden ser modificadas en el rango requerido.

Por estas razones la simulación de sistemas se ha convertido en el método más utilizado en la actualidad para la observación de comportamientos de sistemas reales.

4.2.2. Modelos

Un modelo es la representación de un sistema de forma física, matemática o de manera mixta que tiene en cuenta una gran multitud de factores (matemáticos, lógicos, físicos, químicos,...) para la comprensión del funcionamiento del sistema.

Todo el mundo emplea instintivamente modelos cuando toma decisiones sobre determinados aspectos de la realidad. En el proceso de toma de decisión se elige una entre varias acciones posibles, teniendo en cuenta el efecto que cada acción vaya a producir. La relación que liga las posibles acciones con sus efectos es el modelo del sistema. Por tanto, en el proceso de toma de decisiones se está empleando un modelo del sistema.

Las principales características de un modelo son el realismo y la simplicidad; tan importantes como, a su vez, tan difíciles de unir. El modelo debe tener la mayor cantidad de aspectos del sistema que se pretende imitar y ser, a la vez, una aproximación razonable; cuanto más realismo queramos introducir en el modelo mayor es su complicación, por lo que hay que buscar una solución que disponga de un equilibrio entre ambas.

4.2.2.1. Construcción de modelos

El proceso de construcción de un modelo cuenta con las siguientes etapas:

- *Conceptualización:* en esta etapa se adquiere una perspectiva y una comprensión mental del fenómeno que pretendemos estudiar. Hay que familiarizarse con el problema teniendo en cuenta la bibliografía existente, opiniones de expertos, experiencia propia, etc.
- *Formulación del modelo:* consiste en representar los elementos intuitivos manejados en la fase de conceptualización por medio de un lenguaje más o menos formal. Se suelen utilizar los diagramas de bloques para su representación. Una vez obtenido el diagrama de relaciones se estiman los parámetros necesarios para formular el modelo. Esta fase finaliza cuando se tiene modelado el sistema que se está estudiando, en forma de ecuaciones susceptibles de ser programadas en ordenador, procediendo a la elección del lenguaje de programación que se va a emplear, bien específico o bien de uso general.
- *Evaluación del modelo:* se trata de llevar a cabo un análisis del mismo, así como de su sometimiento a varios criterios de aceptabilidad para validar su comportamiento.

La construcción de un modelo no es lineal, sino un proceso de mejora progresiva de los modelos que representan el sistema atendiendo a los criterios de aceptabilidad (contrastar y/o validar).

A partir de la construcción del modelo se puede desarrollar tres tipos de modelos:

- *Modelo Mental:* está basado en el conocimiento que se tiene sobre un aspecto de la realidad adquirido a través de la experiencia e intuición, del cual se extraen aquellas características esenciales que sirven para representar el aspecto considerado.
- *Modelo Formal:* a partir de las hipótesis conformadas o empleadas en los modelos mentales, se establecen las relaciones formales o de funcionamiento que definen el comportamiento de aquellos aspectos de la realidad que se quiere modelar.
- *Modelo Computarizado:* resulta de la implementación del modelo formal mediante un lenguaje. El objetivo es poder utilizar la capacidad de cálculo del computador para hacer

evolucionar al modelo a lo largo de la dimensión tiempo, según las interacciones dinámicas establecidas en el modelo y que representan al sistema bajo estudio.

4.2.2.2. Clasificación de modelos

Atendiendo a las características del modelo, podemos distinguir:

- *Prescriptivos y descriptivos:* se emplean para obtener una solución óptima de un problema concreto mientras que los descriptivos, se emplean para descubrir el funcionamiento de un sistema.
- *Discretos y continuos:* esta clasificación está relacionada con las variables del modelo. Las variables de las continuas pueden tomar cualquier valor real mientras que las discretas, sólo pueden tomar un determinado rango de valores. Si nos centramos en la variable tiempo, si las variaciones de las variables de estado del modelo se producen de forma continua a medida que el tiempo varía, el modelo es continuo, pero si esas variaciones se producen en instantes determinados, el modelo es discreto.
- *Estocásticos y deterministas:* también está relacionada con las variables del modelo. Si alguna de las variables del modelo es aleatoria, éste es estocástico; si todas las variables son matemáticas, el modelo es determinista. Cuando el sistema es determinista, el comportamiento del sistema depende de las condiciones iniciales definidas y las relaciones entre sus componentes. Si el sistema es no determinista o estocástico su comportamiento no depende y su estudio solo podrá realizarse en términos probabilísticos, intentando conocer sus posibles respuestas atendiendo a sus probabilidades asociadas.
- *Estáticos y dinámicos:* es un modelo estático si sus variables no cambian a lo largo del tiempo, es decir, cuando el tiempo no es una variable a tener en cuenta. En contra, si alguna o todas las variables del modelo cambian de valor, es dinámico.
- *Lazo abierto y lazo cerrado:* depende de la estructura del modelo; los modelos de lazo abierto no utilizan la salida como retroalimentación de la entrada para modificar los resultados

posteriores; en los modelos de lazo cerrado, las salidas se vuelven a introducir con las entradas del modelo.

Las clasificaciones enumeradas no son excluyentes, sino complementarias; por todo ello, los modelos más apropiados para la simulación serán los de tipo discreto, descriptivo, estocástico, dinámico y de lazo abierto.

4.2.2.3. Partes de un modelo de simulación

- *Estado del sistema:* conjunto de variables y parámetros que permiten describir el estado de los diferentes elementos del sistema.
- *Reloj de simulación*: contador que registra el instante en el que se encuentra en cada momento la simulación.
- *Lista de eventos:* en ella se almacenan cuando y donde deben ocurrir lo diferentes eventos.
- *Procedimiento de inicialización:* programa para que el estado del modelo en el instante cero sea el requerido.
- *Procedimiento de actualización del reloj* que gobernará el modo de avance del reloj de la simulación.
- *Procedimiento para generación de eventos*: genera eventos a partir de ejecutados anteriormente y del cambio de estado de los elementos del modelo.
- *Procedimientos de generación de valores aleatorios*.
- *Un generador de informe*s que registra información sobre el comportamiento del sistema.
- *El programa principal*: el lenguaje o simulador que gobierna la ejecución de todo el modelo.

Atendiendo al primer punto de la lista anterior, las variables se pueden dividir en variables de entrada y de salida. Las variables de entrada son datos sobre los cuales el dispositivo de simulación no tiene control (frecuencia de sucesos, tiempo entre averías de una máquina, etc.). Las variables de salida nos permiten conocer el ajuste del modelo al sistema real (beneficio de una instalación, productividad de una línea, etc.). Por último, los parámetros son aquellos datos de entrada de los que se posee control.

4.3. Metodologías de formulación/formalización de modelos

En este sub-apartado se presentará los principales elementos que aparecen en los sistemas de eventos discretos, los conceptos de "orientación a los eventos" y "orientación de procesos" y los principales tipos de metodologías de formalización.

4.3.1. Sistemas de eventos discretos: elementos principales

Los modelos discretos son modelos dinámicos, estocásticos y discretos en los que las variables de estado cambian de valor en instantes no periódicos de tiempo. Estos instantes de tiempo se corresponden con la ocurrencia de un evento. Un evento es una acción que puede cambiar el estado del modelo.

Para un modelo de simulación de eventos discreto, los elementos más significativos son:

- *Variables de estado:* son el conjunto mínimo de variables que describen todos los aspectos de interés del sistema. Cada conjunto de valores que toman estas variables definen cada estado del sistema. Los parámetros son variables exógenas con un valor prefijado por el entorno o el simulador y son conocidos en el momento de construir el modelo.
- *Eventos:* son acciones instantáneas que pueden cambiar el estado del modelo. No consumen tiempo y podemos clasificarlas como:
    - *Eventos Condicionados:* son aquellos que para que ocurran es necesario que se den ciertas condiciones.
    - *Eventos no condicionados:* son aquellos que están planificados de antemano y no necesitan de condición alguna para que ocurran.
- *Actividades:* son las acciones que tienen lugar entre dos eventos. Generalmente tienen duración temporal conocida, aunque esto no significa que sea constante. En procesos estocásticos su duración está determinado por una distribución estadística.

- *Entidades:* objetos que constituyen y se mueven a lo largo del sistema. Se pueden agrupar en:
    - *Entidades permanentes o recursos:* son los medios gracias a los cuales se pueden ejecutar las actividades. Definen quién o qué ejecuta la actividad, su número permanece constante a lo largo de la simulación y se suelen parametrizar por características como capacidad, velocidad o tiempo de ciclo.
    - *Entidades temporales:* son los objetos que llegan, se procesan y salen del sistema. Se crean y se destruyen con el paso de la simulación.
- *Atributos:* se utilizan para caracterizar las entidades, tanto a las permanentes como a las temporales. Cada atributo corresponde a una propiedad, así como toda aquella información que fluye en el sistema junto con las entidades temporales. El estado de una entidad viene definido por los atributos asociados a ella, cuyos valores cambian en función de los eventos del sistema.
- *Colas o unidades de almacenamiento:* estructuras que quedan determinadas por una colección de entidades temporales, ordenadas de una forma lógica. Las entidades que están en una cola sufren retardos de una duración indeterminada.
- *Relaciones Funcionales:* son las existentes entre las diferentes variables de un modelo y pueden ser de dos tipos:
    - *Identidades:* expresiones de tipo matemático.
    - *Características de operación:* hipótesis que se expresan matemáticamente y que relacionan todas las propiedades que forman parte de nuestro modelo.
- *Parámetros:* Son variables exógenas con un valor prefijado por el entorno o el simulador y son conocidos en el momento de construir el modelo.

4.3.2. Formalización de modelos discretos

En la etapa de formalización del modelo existen una gran variedad de metodologías que el analista puede utilizar. Éstas se clasifican en dos tipos en base a su orientación: orientación a eventos y orientación a procesos.

La orientación a los eventos se centra en torno a la descripción de los eventos. Presenta una gran desventaja ya que la creación de modelos de grandes dimensiones, con diferentes tipos de eventos, entidades y recursos, resulta excesivamente compleja. Los principales eventos que hay que tener en cuenta en este tipo de metodología son:

- Los eventos que pueden producirse.
- Las condiciones de activación de cada evento.
- El flujo de acciones asociadas a la activación de cada evento.

La orientación a los procesos es una forma alternativa, más natural y sencilla de describir el funcionamiento de los sistemas. Se toma el punto de vista de las entidades y se describe su circulación a través del sistema. Se centra en los procesos que llevan a cabo las entidades, por ello se llama modelado orientado a los procesos. Su uso es posible gracias al empleo de lenguajes de simulación, que traducen de manera automática la descripción orientada a los procesos a una descripción orientada a los eventos.

4.4. Proceso de simulación

Una vez presentadas las diferentes características de la simulación, abordaremos detalladamente todas y cada una de las etapas en las que se divide un proceso de simulación.

La planificación de experimentos de simulación es un proceso complejo, ya que necesariamente se tiene que recurrir a técnicas como la estadística matemática, el análisis numérico, la econometría, la programación de computadoras y el diseño de experimentos.

Aunque el proceso de simulación no es rígido, ni está perfectamente definido, la experiencia sugiere que el desarrollo de proyectos de simulación requiere un procedimiento que consta de las siguientes etapas (véase Figura 24).

- Formulación del problema.
- Recolección y procesamiento de datos.
- Formulación del modelo.
- Estimación de parámetros.
- Cualificación del modelo.

- Formulación del programa de la computadora.
- Verificación del programa de simulación.
- Validación de la simulación.
- Diseño de experimentos de simulación.
- Análisis e informe de resultados.

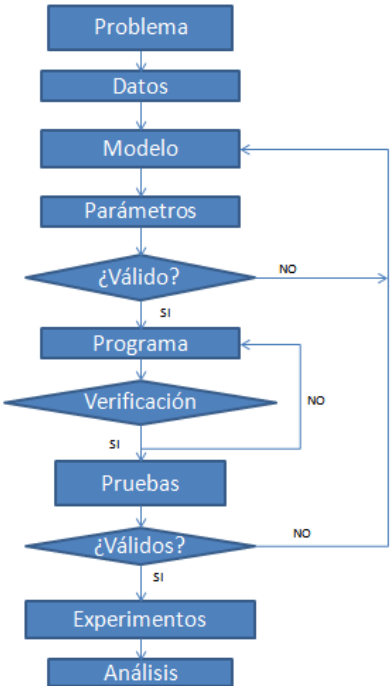

Figura 24. Etapas del proceso de simulación.

4.4.1. Formulación del problema

Es la primera etapa de la simulación y consiste en un proceso secuencial, que generalmente requiere un tratamiento continuo y progresivo y un refinamiento de los objetivos del experimento durante su realización.

Los objetivos de la investigación, tanto en la empresa y la economía, como también la mayoría de las ciencias sociales, toman generalmente la forma ya sea de: preguntas que deben contestarse, hipótesis que deben probarse y efectos por estimarse.

Si el objetivo del estudio es obtener respuestas a una serie de preguntas, es necesario que intentemos plantear éstas detalladamente

desde el principio del experimento, aun cuando sea posible modificar las preguntas en el curso del mismo.

Hay que tener en cuenta que especificar las preguntas que se deben contestar no es suficiente para realizar un experimento de simulación; se requiere también la especificación de criterios objetivos para evaluar las posibles respuestas. Se ha de dejar claro qué se quiere decir con expresiones como: óptimo, importante, etc.

Por otro lado, el objetivo de la investigación podría estar en probar una o más hipótesis relativas al comportamiento del sistema bajo estudio. En cada caso es necesario que las hipótesis que deban probarse se planteen explícitamente, así como los criterios para su aceptación o rechazo.

Finalmente, el objetivo podría consistir en estimar los efectos que ciertos cambios en los parámetros, en las características operacionales o en las variables exógenas, tengan sobre las variables endógenas del sistema. Sin embargo, antes de estimar los efectos sobre cualquier variable endógena en un sistema dado, es necesario que se especifique los requerimientos en términos de precisión estadística.

Por consiguiente, deben tomarse dos decisiones importantes antes de comenzar a trabajar con cualquier experimento de simulación. En primer lugar, hay que decidir los objetivos de la investigación y, en segundo lugar, es necesario definir el conjunto de criterios para evaluar el grado de satisfacción al que debe ajustarse el experimento a fin de que cumpla los objetivos.

4.4.2. Recogida y procesamiento de datos

En esta etapa surge la discusión clásica sobre el orden en que deben realizarse dos de los pasos del proceso. Inicialmente, parece lógico pensar que para iniciar la recogida de datos de forma ordenada y meticulosa es preciso haber realizado una formulación del problema, pero puede suceder que esa formulación resulte imposible sin el acceso previo a cierta información. En otras palabras, se necesitaría recoger y procesar una cierta cantidad de datos antes de que exista la posibilidad de definir algún problema.

Podemos clasificar los datos necesarios para construir un modelo de la siguiente manera:

- Disponibles: los datos están al servicio del estudio de simulación y en un formato adecuado.
- No disponibles pero accesibles: los datos no han sido registrado o bien se realiza sobre un sistema no existente.
- No disponibles y no accesibles: este tipo de datos se refiere a cuando el estudio se realiza sobre un sistema no existente.

Cuando los datos no están disponibles, pero es posible obtenerles, las fuentes habituales utilizadas para obtener información son: series temporales, opinión de expertos o estudios de campo (Estudio de Métodos y Tiempos).

El mayor problema se tiene cuando los datos no están disponibles ni somos capaces de conseguirles. En este caso, los datos deben ser estimados de dos maneras:

- Utilizando información facilitada por el fabricante.
- Análisis sensitivo: se trata de sustituir un parámetro desconocido por valores muy opuestos entre sí y comparar los resultados obtenidos. Si los resultados en ambos casos son muy parecidos, el parámetro no es crítico y no es necesario hacer una estimación aproximada de él. En caso contrario, se tendrá que hacer una estimación rigurosa del parámetro.

Una vez se posean los dos primeros tipos de datos, disponibles y no disponibles, pero recolectables, es necesario un sistema eficiente para tratar los datos y que permita tener como resultado de la simulación un éxito por los siguientes motivos:

- Un análisis de datos correcto puede llevarnos a establecer hipótesis que se utilizarán para la formulación de los modelos.
- En el desarrollo del modelo, los datos pueden sugerir mejoras o simplificaciones en los modelos matemáticos.
- Es necesario que los datos se utilicen para estimar parámetros de operación relativos a variables endógenas, exógenas o de estado del sistema.
- Sin los datos sería imposible probar la validez del modelo.

4.4.3. Formulación del modelo

En esta etapa se debe construir un modelo lógico o matemático que represente el sistema real de acuerdo con los objetivos marcados en el estudio. Es una fase complicada debido a las enormes dificultades que suele presentar. La construcción de modelos matemáticos adecuados depende en gran parte de la experiencia del analista, de los procedimientos de prueba y error empleados y de una gran dosis de suerte.

Dentro de la formulación del modelo podemos definir diferentes etapas que sirvan de guía para su realización:

- Conceptualización.
- Especificación de los componentes.
- Determinación de las variables y parámetros.
- Formulación de las relaciones funcionales.

Es necesario mencionar que para llevar a cabo estas fases se necesita un conocimiento exhaustivo del sistema objeto de estudio y de los procedimientos de modelización, por lo que algunos autores aconsejan comenzar construyendo un modelo relativamente sencillo a partir del cual elaborar modelos con complejidad creciente comprobando partes antes de pasar a construir el siguiente.

4.4.4. Estimación de los parámetros

Es necesario estimar los valores de los parámetros de los modelos y determinar su significación estadística. Para ello, es necesario tener un amplio conocimiento de las técnicas estadísticas como la estimación por puntos o la estimación de intervalos de confianza.

En el mercado existen muchos programas estadísticos que permiten realizar la estimación de los parámetros de las diferentes distribuciones estadísticas a partir de los datos de una serie. En la mayoría de los casos, la media o la mediana y la varianza son parámetros de las distribuciones elegidas.

4.4.5. Cualificación del modelo

En esta fase se determina el nivel de exactitud de modelo, es decir, se estudia si el modelo es una representación adecuada de la realidad. La cualificación de los modelos se realiza tanto del propio modelo como de los parámetros estimados.

El objetivo de validar un modelo es asegurar que el modelo desarrollado se utilice para tomar decisiones como si se tratara del sistema real. Para validar un modelo se debe establecer unos criterios para poder juzgar el modelo. Una vez marcados, se debe especificar cómo aplicarlos. En teoría todo esto debe ser un trabajo de equipo, aunque en muchos casos sea realizado por una única persona, que posteriormente debe convencer al resto.

Si las características operacionales toman la forma de distribuciones de probabilidad, será necesario realizar pruebas de bondad de ajuste que determinen como de bien se ajusta una distribución hipotética a los datos del mundo real.

4.4.6. Formulación del programa de la computadora

Una vez construido y validado el modelo, es el momento de seleccionar el lenguaje de programación. En función de las características y la finalidad del modelo se puede optar por; hojas de cálculo, lenguaje de propósito general (Fortran, Pascal o C), lenguaje específico de simulación (GPSS, Simscrip o Siam) o simuladores (*Witness*, Arena o Cinema).

El propósito de un programa de computadora es dirigir los experimentos de simulación sobre los modelos del sistema bajo estudio, es una labor compleja y consta de múltiples pasos:

- Seleccionar el software de simulación.
- Elaborar un diagrama de flujo.
- Buscar y corregir posibles errores de programación.
- Determinar los datos de entrada y condiciones iniciales.
- Por último, generar resultados que sirvan para verificar el programa.

4.4.7. Verificación del programa de simulación

La verificación hacer referencia a que el modelo funcione respondiendo a las instrucciones que en él se programaron, sin considerar si los resultados obtenidos son razonables. Por tanto, la verificación consiste en comprobar, sentencia a sentencia e instrucción a instrucción, que no existen errores de programación.

Algunos simuladores incluyen herramientas para realizar esta verificación. Dicha herramienta suele consistir en comprobar si la evolución de la variable que queremos analizar es la esperada. Si no se dispone de dichas herramientas de verificación, se pueden realizar simulaciones de prueba con datos conocidos y comprobar los resultados.

La mayoría de las técnicas de verificación se pueden resumir en seis:

- *Métodos de programación estructurada.* Sustentados en principios como top-down (se diseña de mayor nivel a menor los elementos), modularidad (cada submodelo es responsable de una función), refinado paso a paso…
- *Trazado de la simulación.* Consiste en obtener trazas de variables, parámetros, estados, es decir, en almacenar el valor de todos los elementos siempre que finalice una simulación y comprobar si ese es el valor que deberían tener.
- *Test de programa.* Realizar varias simulaciones con diferentes valores de entrada en diferentes situaciones y comprobar que los valores de salida son razonables en cada caso.
- *Comprobación con modelos analíticos.* Basado en leyes de conservación o estadísticas.
- *Comparación con modelos analíticos.* Aunque en la mayoría de las ocasiones la simulación se utiliza para sistemas que no pueden ser modelizados de forma analítica, pueden seleccionarse parámetros de entrada y del sistema que permitan la comparación con un modelo analítico específico.
- *Gráficos.* Suelen utilizarse simulaciones animadas en modelos relacionados con flujos facilitando la detección de irregularidades.

Se recomienda que la etapa de verificación se lleve a cabo por una persona diferente al programador.

4.4.8. Validación de la simulación

Validar la simulación consiste en determinar si los datos generados con el programa son un reflejo de la conducta del sistema real. Si el modelo es válido, todas las decisiones que puedan tomarse a partir de los resultados serán igualmente válidas que aquellas que podrían haberse obtenido si se hubieran experimentado con el sistema.

Las técnicas de validación varían en función del sistema real que se pretende simular. Los modelos se pueden clasificar en:

- *Modelo cuyo sistema real existe*: en este caso la validación se puede reducir a una comparación de los dos conjuntos de datos de salida, los datos del sistema real y del modelo de simulación. Otra manera, consiste en permitir que expertos en el sistema comprueben sin existen diferencias significativas a través del Test de Turing: este test consiste en proporcionar a los expertos los datos de ambos sistemas sin especificar cuál corresponde a cada uno y que éstos descubran sus procedencias.
- *Modelo de sistema real hipotético*: estos modelos son más difíciles de validar ya que no pueden compararse con un sistema real, pues no existe. De esta forma, en estos casos conviene recurrir a personas conocedoras del sistema o usuarios potenciales de forma que puedan determinar cuáles de las salidas son posibles. En el Método Delphi, unos conjuntos de expertos llegan a un consenso en función de preguntas planteadas de forma independiente.

La relación temporal y sucesión temporal entre la validación, verificación y credibilidad de un modelo se muestra en la siguiente figura (véase Figura 25). Los cuadrados representan las acciones que son necesarias para pasar de un estado a otro, mientras que las flechas discontinuas muestran el concepto empleado en dicha transición.

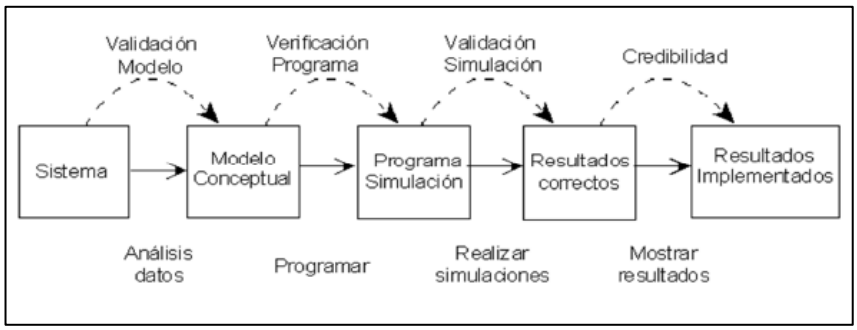

Figura 25. Relación entre verificación, validación y credibilidad

4.4.9. Diseño de experimentos de simulación

El diseño de experimentos es una forma de decidir, a priori, qué configuraciones deben ser simuladas para obtener la información objeto de interés con el menor número posible de ejecuciones.

4.4.10. Análisis e informe de resultados

En este apartado se trata de utilizar los resultados para sacar conclusiones y que éstas estén suficientemente claras y documentadas para que puedan ser utilizadas posteriormente.

4.5. Funciones de distribución

Para que exista la posibilidad de formular o definir algún problema, es necesario haber procesado y recolectado anteriormente cierta cantidad de datos. Los datos de entrada son básicos para la simulación de modelos. La etapa de identificación de las distribuciones estadísticas es la fase que más tiempo consume.

Para identificar una distribución de probabilidad se suelen utilizar histogramas. Para construirlos tendremos que:

- Dividir el rango de los datos en intervalos (normalmente de igual longitud).
- Etiquetar el eje horizontal según los intervalos seleccionados.
- Determinar la frecuencia de ocurrencias de cada intervalo.
- Etiquetar el eje vertical
- Dibujar las frecuencias.

El número de intervalo depende del número de observaciones y de la dispersión de los datos. Suele ser recomendable elegir un número de intervalos aproximadamente igual a la raíz cuadrada del número de datos.

Si los intervalos son demasiado anchos, el histograma será tosco y no se podrá identificar fácilmente su forma, mientras que, si son demasiado estrechos, la representación puede quedar distorsionada. Por ello, lo normal es combinar diferentes tamaños de intervalos hasta elegir aquel que mejor represente el histograma.

Para variables continuas, la línea que une los puntos centrales de los rectángulos del histograma representa la función de densidad de la distribución teórica. Mientras que, para variables discretas, lo normal es colocar en el eje horizontal, cada uno de los valores posibles, aunque si hay pocos datos, pueden agruparse datos contiguos para eliminar distorsiones en el histograma.

Las distribuciones exponenciales, normales y de Poisson son las que normalmente aparecen en los problemas de simulación, y, además, son fáciles de analizar. También aparecen, aunque en menor medida, las distribuciones Gamma y Weibull, pues al depender su forma de diferentes parámetros son fáciles de adaptar a diferentes problemas. En la siguiente tabla (véase Tabla 2) podemos distinguirlas distribuciones más utilizadas en la simulación.

Distribución	Descripción
Binomial	Modela el número de éxitos en n intentos independientes con probabilidad de éxito p.
Binomial negativa	Modela el número de intentos para obtener *k* éxitos.
Poisson	Modela el número de sucesos independientes que pueden ocurrir en un intervalo de tiempo o espacio.
Uniforme	Se utiliza cuando no se dispone de ningún tipo de datos.
Normal	Se usa para proceso que puede ser suma de varios procesos. El problema es que admite valores negativos y estos son imposibles para tiempos de proceso.
Lognormal	Se utiliza para procesos que pueden ser el producto de varios procesos.
Exponencial	Modela el tiempo entre eventos. Si el tiempo entre eventos sigue una exponencial, el número de eventos en un periodo de tiempo sigue una Poisson.
Gamma	Es muy flexible para modelar variables aleatorias no negativas.
Beta	Es muy flexible para modelar variables aleatorias limitadas.
Erlang	Se utiliza cuando existe una suma de procesos con distribuciones exponenciales. Es un caso especial de la gamma.
Weibull	Modela el tiempo de fallo de los componentes. La exponencial es un caso particular.
Triangular	Se utiliza cuando sólo se conocen mínimo, máximo y valor más probable.
Empírica	Se utiliza cuando ninguna distribución teórica parece apropiada. No es más que la representación de los datos actuales.

Tabla 2. Distribuciones estadísticas más utilizadas.

Capítulo 5. Simuladores

5.1. Introducción

En el presente capítulo se presentarán una serie de herramientas y aplicaciones informáticas de apoyo en los proyectos de simulación de procesos. Los medios y canales utilizados para encontrar éste tipo de aplicaciones han sido la búsqueda de referencias en revistas especializadas y en internet, y el contacto con proveedores de las mismas.

La demanda de este tipo de herramientas en las últimas décadas ha dado lugar al desarrollo de productos muy diversos para este campo. Se exponen los principales simuladores del mercado y se explica cuál se ha seleccionado y el porqué de dicha elección.

5.2. Flexsim

Flexim (véase Figura 26) es un poderoso programa de simulación que permite visualizar y probar cambios en las operaciones y los procesos de logística, manejo de materiales y manufactura de la manera más rápida y sencilla evitando los altos costos, riesgos y extensos tiempos que conllevan al experimentar con cambios en el mundo real y su análisis por prueba y error.

Figura 26. Logotipo del simulador Flexim.

Flexsim es un software de simulación verdaderamente orientado a objetos que sirve para construir modelos que te ayudan a visualizar el flujo de los procesos, optimizarlos y generar ahorros. Permite analizar diferentes escenarios y condiciones, encontrando la solución más conveniente, todo esto en un ambiente gráfico en tres dimensiones (3D),

con los últimos avances en tecnología que facilita la comunicación y comprensión de las ideas para una acertada toma de decisiones.

Presenta también un profundo análisis estadístico del desempeño del proceso, cuellos de botella, etc. Gráficas, reportes y estadísticas exponen los resultados del modelo de simulación de una manera clara y precisa.

5.3. ProModel

Es un Software de simulación y optimización para el proceso de manufactura, logística, ensamble, balanceo de líneas, justificación de inversión de capital, entre otras aplicaciones (véase Figura 27).

Figura 27. Logotipo del simulador ProModel.

Se trata de una herramienta sencilla de utilizar que permite diseñar en un ordenador una representación gráfica del sistema y probarlo en una variedad de escenarios mostrando la mejor solución que incremente valor a su organización.

La representación gráfica del modelo, la animación y los informes gráficos son herramientas potentes para ver, entender, comunicar y mejorar el sistema.

Entre las muchas aplicaciones típicas podemos destacar:

- Optimizar el proceso de producción.
- Reducir el tiempo de ciclo del sistema.
- Justificar decisiones de inversión en equipo.
- Identificar y minimizar cuellos de botella y restricciones.
- Analizar y mejorar la capacidad de producción.
- Optimizar la asignación de recursos.

El Software ProModel es usado con éxito por muchas empresas líderes en el Mundo, tales como: General Electric, DuPont, Ford, Michelin,

3M, Boeing, IBM, Coca Cola, Dell Computer, Siemens, Allied Signal, Nokia, Whirlpool, Motorola, Lockheed Martin y muchas más.

5.4. SimProcess

Es una herramienta de simulación de negocios orientada a procesos, que combina el mapeado de los flujos de trabajo de la planta de producción con la simulación de eventos discretos y el sistema de costes basado en actividades. El modelo se construye gráficamente y está diseñado para organizaciones que necesitan analizar una variedad de escenarios de operación. Utiliza tecnología Java y XML (véase Figura 28).

Figura 28. Logotipo del simulador SimProcess.

Los modelos de SimProcess contienen los siguientes componentes:

- Procesos y subprocesos alternativos.
- Actividades.
- Entidades.
- Recursos.
- Conectores.

La visión por procesos de la empresa representa las operaciones que en ella se ejecutan a un nivel muy alto, desde el que solamente se aprecia el contorno general del negocio. La descomposición de cada proceso en actividades permite llegar al máximo detalle en cada operación de la empresa. De esta forma, la visión de los procesos y actividades posibilitan el análisis de cada proceso por sucesivas capas que van desde lo más general hacia el máximo grado de detalle en cada actividad.

SimProcess permite representar el comportamiento del mundo real de actividades tales como corte, montaje, transformación, fabricación por lotes, etc. Estas actividades se pueden conectar o encajar en procesos más generales. Estos bloques incorporados de actividades son utilizados

para representar las características operacionales de los propios procesos del negocio.

5.5. Simul8

Es un paquete de simulación y optimización para realizar modelos de simulación flexibles y robustos. El producto Simul8 profesional (véase Figura 29) incluye, además, los módulos de análisis estadístico Stat:Fit y el módulo de optimización OptQuest.

Figura 29. Logotipo del simulador Simul8 Corporation.

Simul8 incluye, entre otras, las siguientes características:

- Realidad Virtual: representa el modelo de simulación en un ambiente realista 3D.
- Diversas herramientas de análisis como, por ejemplo, hojas de balance.
- Edición de propios eventos.
- Análisis ABC.
- Analizadores de velocidades.

Además, permite la comunicación con otro software a través del puerto COM, que se utiliza para comunicarse con otros sistemas como: VBA, VB, C++, Delphi y cualquier otro software de soporte ActiveX/COM.

Por otra parte, Simul8 SQL permite la conexión con cualquier fuente de datos que se apoye en SQL. De esta forma, contempla el enlace con la fuente de datos, lectura de la misma, escribir y preguntar.

5.6. Witness

5.6.1. Introducción

Una vez presentados algunos de los simuladores más utilizados en el mercado, entraremos en detalle en la simulación visual interactiva que presta el paquete *Witness*. Se expondrá tanto las características del simulador como el funcionamiento del software de simulación utilizado para el TFG, determinando el porqué de su selección y las ventajas de su uso.

Primeramente, se procederá a la descripción de las características y propiedades del simulador, más adelante se enumerará los elementos principales de los que dispone la herramienta para la construcción de modelos y las posibles interconexiones entre sí.

5.6.2. Descripción.

Witness es un paquete de software de simulación del Grupo Lanner (véase Figura 30). Es la culminación de más de 20 años de experiencia en el desarrollo de simulación por ordenador y es suministrado por la empresa británica AT&T Istel desde el año 1986. Esa experiencia ha llevado a desarrollar una aproximación visual, interactiva e interpretativa para la simulación sin necesidad de compilación.

Figura 30. Logotipo del Simulador Witness.

Algunas de las principales ventajas que presenta el Witnes son:

- Los modelos pueden ser creados y comprobados con pequeñas variaciones en los estados. Esto facilita la posibilidad de identificar errores lógicos y que el modelo sea más fiable.
- El modelo puede ser modificado mientras se está ejecutando. Los cambios son actualizados en la ejecución.

Este software se puede utilizar en multitud de sectores y entornos como pueden ser: alimentación, banca y finanzas, industria automovilística, industria química, etc.

Se ha seleccionado Witness como programa de simulación debido a que es el utilizado por la Universidad de Valladolid y porque es uno de los *software* más punteros de simulación de procesos dinámicos, cuya eficacia está avalada por varios centenares de compañías multinacionales y nacionales de gran prestigio.

5.6.3. Características

Las características que hacen que la simulación interactiva sea atractiva para el mundo industrial son:

- Crear modelos de sistemas en los que fluye algún elemento a través de distintos puestos de trabajo. Además, se puede modelizar: almacenes, transportadores, operarios, transportes, turnos de trabajo, etc., que ayudarán a definir el sistema a modelizar.
- Permite el empleo de gran cantidad de variables y atributos para, a través de su lenguaje de programación propio, poder modelizar correctamente el funcionamiento de nuestro sistema.
- Posibilita crear modelos gráficos con movimiento. De esta manera se dota a la simulación de claridad, entendimiento, rigurosidad e impacto visual.
- Ofrece gran cantidad de datos de entrada como de salida de un experimento de simulación para su posterior estudio, bien directamente, a través de los informes generados, o bien volcando los ficheros de datos generados a alguna aplicación informática que permita su tratamiento.
- Es fácil de comprender para una persona sin conocimientos previos, aunque el dominio de sus elementos y su lenguaje de programación es algo más complejo.
- Es fácil de utilizar gracias al entorno Windows con el que se trabaja: ventanas, cajas de diálogo y menús desplegables con el ratón.
- Dispone de un sistema de ayuda on-line (pulsando F1).

- Permite la utilización en un experimento de datos incluidos en ficheros realizados por otro programa y generar los resultados de la simulación en forma de un fichero manipulable desde otro programa informático.
- Puede editarse un modelo sin necesidad de correr *Witness* mediante un programa de edición de texto manipulando un archivo librería.
- Crea ficheros de arranque en formato ASCII para poder concatenar varios experimentos uno tras otro, de modo que se pueda dejar corriendo el ordenador hasta que finalice todas las simulaciones programadas. Después será posible examinar el modelo en aquel puente de la simulación al que ha llegado.
- Pueden crearse submodelos que puedan ser copiados, borrados, desplazados e interconectados, lo que permite un diseño modular.
- Posibilita realizar gráficas e histogramas de determinados parámetros del modelo que sea de interés estudiar, para facilitar su comprensión y ver su variación temporal.
- Pueden emplearse gran cantidad de distribuciones de probabilidad, tanto teóricas como empíricas, para proporcionar aleatoriedad al modelo.

5.6.4. Construcción de modelos con *Witness*

Cualquier actividad industrial está formada por un conjunto de piezas que fluyen a través de un conjunto de máquinas en las que se realizan diferentes operaciones. Dichas piezas pueden ser transportadas por diferentes medios de transporte como manutenciones o vehículos, pueden ser almacenadas, pueden requerir la actividad de un operario, etc.

Por otro lado, en un sistema productivo, las piezas han de llevar un orden lógico y sentido, pueden trasladarse individualmente o en lotes, se pueden ensamblar, los operarios harán una cosa u otra según determinados parámetros, etc. Por todas estas restricciones, en *Witness* los modelos se construyen de acuerdo a unos procedimientos concretos y utilizando unos elementos determinados y una programación mediante lógica de control adecuada. Cada elemento modelizará alguna parte del sistema real que se desea simular.

A continuación, se profundizará en los conceptos principales para la comprensión y utilización básica del programa.

5.6.4.1. Ventana de inicio

Una vez instalado el programa, se arranca un modelo por defecto denominado startup.mod. Podemos distinguir tres zonas bien diferenciadas (véase Figura 31):

- La lista de los elementos (izquierda): permite gestionar todos los elementos en uso en el modelo en curso.
- La ventana de simulación (arriba a la derecha): se utilizapara la construcción del modelo.
- La ventana e elementos predefinidos (abajo): constituye una biblioteca de elementos estándar.

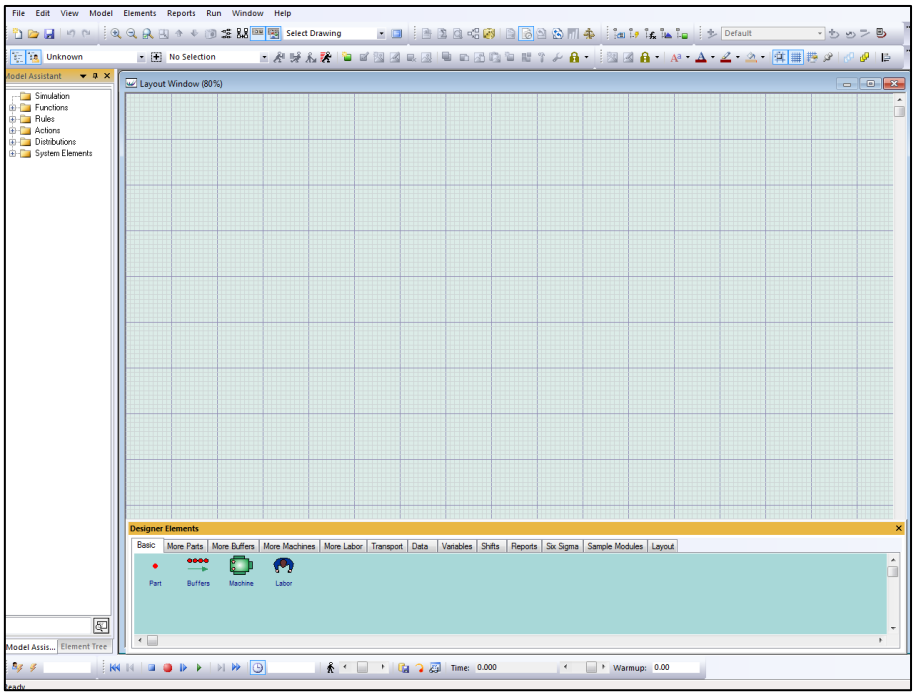

Figura 31. Entorno de simulación Witness.

Particularizando en la ventana de simulación, podemos observar la posibilidad de utilizar múltiples capas para crear visiones de fondo que pueden conectarse y desconectarse. Una capa puede contener un fondo concreto importándolo del programa CAD en formato (.dxf) o elementos gráficos creados con el editor de pantalla. Puede importarse un fichero

.dxf seleccionando la opción Open del menú del fichero y luego seleccionando "*Drawing files*" (*.dxf) de la caja *List files of type*. El dibujo inicialmente se situará en la capa 9 por defecto, pero esto puede ser cambiado. La capa (o capas) para los gráficos de pantalla es (o son) asignados por el editor de pantalla cuando los gráficos son dibujados en pantalla.

Una vez familiarizado con el entorno principal del *Witness*, el paso siguiente es la creación de elementos teniendo en cuenta que los elementos deben ser elegidos previamente. Para definirlos y representarlos existen tres etapas que no tienen por qué realizarse de forma secuencial.

- *Define*: se definen los elementos de los que consta el modelo, tanto físicos como lógicos, se los da un nombre. Esta etapa es necesaria para poder desarrollarse las siguientes. A la hora de declarar un elemento existen dos restricciones importantes:
    - El nombre no puede superar los 24 caracteres (mayúsculas y minúsculas).
    - El nombre debe comenzar necesariamente por una letra.

  El tipo de elemento se selecciona y se le otorga un nombre, una vez clicado en la opción "*Define*", en una ventana deslizante que se muestra a continuación (véase Figura 32).

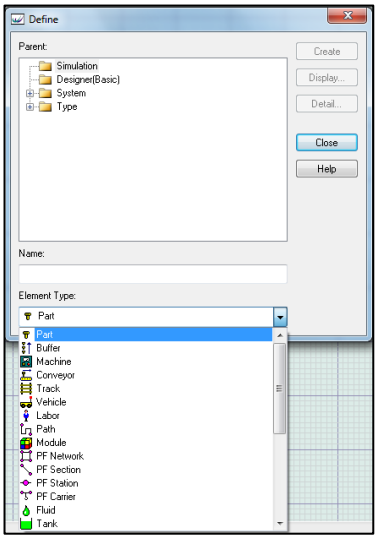

Figura 32. Ventana Define.

- *Display*: se crea la representación gráfica del elemento con la finalidad de hacer la simulación más intuitiva y más fácil de comprender. No es imprescindible la realización de esta fase pero si recomendable.

  Para representar un elemento clicaremos en la pestaña "*Dsiplay*" y se nos abrirá una ventana que mostraremos en la siguiente ilustración en la cual se puede observar dos listas desplegables. En la primera (véase Figura 33) podemos representar un elemento (*Draw*) o bien actualizar (*Update*) uno existente. En la segunda lista (véase Figura 34) encontramos un conjunto de opciones que nos muestran los diferentes elementos gráficos que es posible crear, o bien, los que ya están creados si hemos seleccionado anteriormente la opción "*update*".

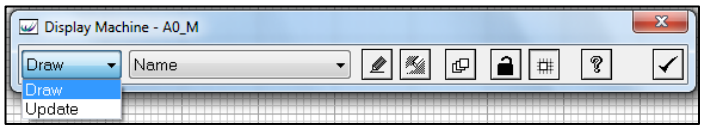

Figura 33. Primera lista desplegable de la ventana Display

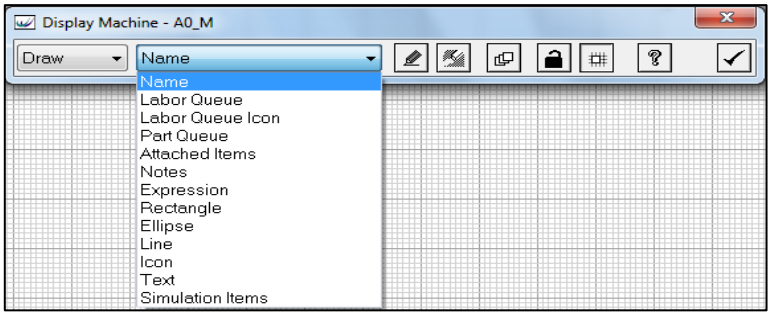

Figura 34. Segunda lista desplegable de la ventana Display.

Los demás botones presentes en la ventana se utilizan para:

- Botón *Draw*.
- Botón *Erase*: ordena los elementos por tipo y por orden de creación

- Botón *Layers*: define los planos ocultos y visibles.
- Botón *Unlock*: se utiliza para que los elementos queden agrupados y moverlos por la ventana de simulación como un conjunto o por el contrario por separado.
- Botón *Grid*: permite que los elementos queden alineados en una cuadrilla virtual.
- Botón *Help*.
- Botón *Validate*.

- ***Detail:*** se detalla cada una de las características del elemento, reglas de entrada y salida y acciones.
  Al seleccionar esta opción se abre un cuadro de diálogo que es diferente para cada uno de los tipos de elemento (*machine*, *part*, *conveyor*...). Los principales campos que se suelen rellenar son aquellos que están destinados a recibir un valor numérico, variable o función, el editor de leyes de conexión y el editor de acciones.

Estas tres opciones se ejecutan clicando con el botón derecho del ratón sobre el la ventana principal "*Layout Window*" (véase Figura 35).

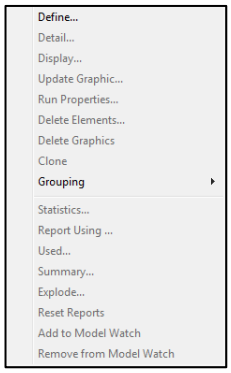

Figura 35. Desplegable de editor de elementos y gráficos.

5.6.4.2. Menús y barras de útiles

En el menú principal disponemos de los siguientes desplegables (véase Figura 36):

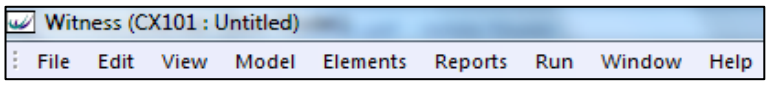

Figura 36. Barra de Menús.

- *File*: permite abrir, guardar, etc., los modelos.
- *Edit*: contiene las opciones para la edición de contenido (copiar, pegar, etc.).
- *View*: permite acceder a los dibujos, iconos y a las barras útiles del programa (*Tool Bars*).
- *Model*: permite gestionar el modelo y ejecutar las acciones especiales.
- *Elements*: permite construir el modelo.
- *Reports*: permite obtener los resultados de la simulación, así como informaciones sobre elementos modelados.
- *Run*: permite lanzar la simulación.
- *Windows*: permite nombrar las ventanas y situarlas en la pantalla virtual.
- *Help*: da acceso a la ayuda on-line de *Witness*.

A partir de la versión 2000 de *Witness*, existen barras de útiles. Haremos un breve resumen de las más utilizadas:

- *Standard*: se utiliza para crear un nuevo modelo, cargar uno ya existente o guardar el que se está utilizando (véase Figura 37):

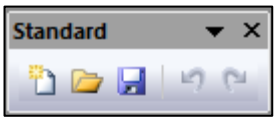

Figura 37. Menú Standard.

- *Reporting*: este menú se utiliza para obtener información (resumen, estadísticas, utilización, estado actual, costes, etc) de los elementos seleccionados (véase Figura 38).

Figura 38. Menú Reporting.

- ***Assistant***: permite un acceso directo *model asistent* el cual te permite insertar reglas de entrada y de salida, acciones, funciones, distribuciones y los nombres de los elementos (véase Figura 39).

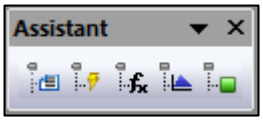

Figura 39. Menú Assistant.

- ***Views***: este menú es utilizado para gestionar la visualización del modelo (véase Figura 40).

Figura 40. Menú Views.

- ***Elements***: se utiliza para declarar. Describir y representar los elementos del modelo. Si no hay ningún elemento seleccionado esta barra aparece desactivada en color gris (véase Figura 41).

Figura 41. Menú Elements.

- ***Element Display***: esta barra permite representar elementos, así como actualizarlos, añadir texto, etc. También permite modificar el tipo de rejilla y la selección de una de las nueve capas que se pueden incorporar al modelo (véase Figura 42).

Figura 42. Menú Display.

- ***Model***: sirve para editar o ejecutar las acciones inmediatas y de usuario (véase Figura 43).

Figura 43. Menú Model.

- ***Run***: menú para controlar la ejecución de la simulación y para poner en marcha la misma (véase Figura 44). Se puede fijar un tiempo de simulación seleccionando el icono "*Stop Run Up*", modificar la velocidad de la simulación en "*Walk*", observar el tiempo que lleva la simulación en "Time", etc.

Figura 44. Menú Run.

5.6.4.3. Elementos de procesos discretos

Son elementos que son tangibles en la situación real que se está simulando y se suelen representan como iconos dinámicos:

- ***Parts o Entidades:*** son los elementos que circulan por el modelo. Pueden representar, por ejemplo:
  - Productos (coches, motores, ...)
  - Lotes de producción.
  - Un proyecto que avanza a lo largo de una gran empresa.
  - Llamadas a una centralita.
  - Pequeños componentes electrónicos u ordenadores personales.

  Las entidades se pueden representar de diferentes maneras: Con un símbolo o con un texto descriptivo. Se pueden caracterizar mediante atributos (peso, longitud, color) que pueden ser fijos (para todas las entidades del mismo tipo) o variables (para cada entidad de un mismo tipo).
- ***Machines o Actividades***: son elementos muy potentes y se utilizan para representar cualquier dispositivo que reciba entidades de algún lugar, las procese en un determinado tiempo de ciclo y las envíe a su destino siguiente.

  Son capaces de representar multitud de operaciones de las cuales podemos destacar:

- Una máquina-herramienta, un robot, un torno, una prensa, etc.
- Un taller entero o una caja en un supermercado.
- Una organización que gestiona un proyecto.
- Una planta completa o un puesto en particular.

Se puede representar su estado con un icono que cambia de color en función de los parámetros del sistema durante la simulación (véase Tabla 3).

Color		Estado
	Verde	Ocupada
	Amarillo	Esperando Piezas
	Magenta	Bloqueada
	Rojo	Averíada
	Azul	Esperando operario para funcionar
	Cian	Esperando operario para ser configurada
	Blanco	Fuera de turno

Tabla 3. Posibles estados de una máquina.

Dependiendo del número de piezas que procesen a la vez existen varios tipos de máquinas:

- *Single*: procesan una pieza cada vez.
- *Batch*: procesa un lote de piezas a la vez. En este tipo de máquinas, las piezas van entrando hasta completar el tamaño de lote. El tiempo de ciclo no comienza a contar hasta que no se dispone de todas las piezas en la máquina.
- *Assembly*: en este tipo de máquina, entran varias piezas a la vez y son ensambladas. El tiempo de ciclo no comienza hasta no disponer de todas las piezas en la máquina. Sale solo una pieza ya ensamblada.
- *Production*: entra una pieza y sale esa pieza más una cantidad fijada de otra pieza que se desea producir.
- *General*: entra una cantidad fijada de piezas y sale otra cantidad fijada de esas piezas. Sin entran dos piezas de tipo distinto y sale sólo una pieza, su tipo será el mismo que el de la primera pieza que entró.
- *Multi-station*: máquina con varias posiciones a las que van entrando secuencialmente las piezas una tras otra

- *Multi-ciclo:* máquina en la que se pueden introducir diferentes tiempos de ciclo.

- ***Buffers o Colas***: son elementos pasivos que representan lugares de almacenamiento de piezas o donde las piezas están a la espera. Sirven para representar un almacén, una cola, un conjunto de pedidos a procesar, etc.
  Puede especificarse la forma en que las piezas entran y salen del buffer, de diferentes maneras, mediantes reglas *FIFO* (F*irst In First Out*) o por defecto *LIFO* (*Last In First Out*). El número máximo de piezas que cabe en un buffer hay que definirlo en el apartado "*Capacity".* También una de las opciones importantes que se pueden introducir en este elemento es un tiempo máximo de espera o por el contrario tiempo mínimo en "*Dlay time".*
- ***Conveyors o transportadores:*** sirven para transportar las piezas de un elemento a otro del modelo. Un *conveyor* tiene un determinado número de posiciones y las piezas las van atravesando sucesivamente en un determinado tiempo de ciclo, hasta llegar a un punto fijado.
  Hay dos tipos de *conveyors*:
  - *Fixed*: Las piezas se mantienen siempre a la misma distancia.
  - *Queing*: Las piezas pueden estar a cualquier distancia dentro del transportador.
- ***Labour o mano de obra:*** es un elemento que es necesario para que otro funcione. Puede representar un operario o una herramienta que es necesaria para que la operación que realiza el elemento que lo requiere funcione, sea reparado, se lleve a cabo una puesta a punto, etc.
  Puede priorizarse su uso de modo que cuando un mismo *labour* sea requerido por dos o más elementos, éste irá a aquel que mayor prioridad tenga (*priority*).
- ***Vehicles y tracks o vehículos y pistas:*** son los elementos estrechamente vinculados (se utilizan de forma conjunta) que, debido a su complejidad sólo deben utilizarse cuando no sea posible modelizar algún elemento de otra forma
  Un *vehicle* es un elemento que transporta piezas de un *track* a otro. Los *tracks* actúan como las rutas que los vehículos siguen. La forma de funcionamiento es la siguiente: un *vehicle*

entra en un *track* por su parte trasera (*rear*) y se mueve hacia su parte delantera (*front*) a una velocidad determinada. Al llegar al final, puede realizar operaciones de carga, descarga y aparcamiento. Al terminar, pasará al siguiente *track* de su recorrido o indicado por una regla (*destination*).

- ***Recursos:*** este elemento se puede utilizar para modelar recursos tanto humanos como materiales (por ejemplo, herramientas, personas o equipamiento) que pueden ser requeridos por otros elementos durante un proceso, una preparación, una reparación, una limpieza, etc. El control de los recursos es, generalmente, muy importante en los modelos. Existen muchas opciones en *WITNESS*, por ejemplo, reglas complejas de asignación y la capacidad de retirar recursos de un elemento para realizar alguna tarea más importante en otro elemento (apropiación de recursos).

5.6.4.4. Elementos de procesos continuos

Los elementos de proceso continuo se utilizan para crear modelos en los que contienen flujo continuo.

- ***Fluids o fluidos:*** los fluidos representan líquidos y son productos que fluyen libremente. Se representan gráficamente como bloques de color que fluyen a través de tuberías, tanques y procesadores. Las mezclas de fluidos se muestran como franjas de diferentes colores (proporcionales a la cantidad de cada fluido que contiene la mezcla).
- ***Tanks o tanques:*** los *tanks* son elementos donde se almacenan o retienen los *fluids* (equivalen a los buffers para los *parts*). Su capacidad se mide por volumen de fluid que son capaces de almacenar. Pueden visualizarse como iconos que cambian de color según su estado. Son elementos pasivos en el sentido que no realizan ninguna acción con los *fluids*, sólo los almacenan. Sin embargo, sí disponen de reglas de entrada/salida para manipular la entrada y salida de los *fluids*. Así mismo, disponen de posibilidad de prioridad, *breakdowns*, *labours*, *actions*, etc.
- ***Proccesors o procesadores***: los *fluids* entran a los procesadores, se someten a algún tipo de operación y salen de los ellos (es decir, actúan como máquinas para fluidos). Un

ejemplo de procesador sería un recipiente en el que se mezclan varios fluidos o se calientan durante un tiempo determinado.

- ***Pipes o tuberías***: las tuberías transportan *fluids* entre *processors* y *tanks*, (en cierta medida son equivalentes a los *conveyors* para los *parts*). Pueden visualizarse de modo que cambien de color según su estado. Disponen de reglas de entrada/salida y posibilidad de *breakdowns*, *labours*, *actions*, etc.

5.6.4.5. Elementos lógicos

Representan los datos y los aspectos informativos del modelo. Estos capacitan al usuario para obtener datos fácilmente, personalizar informes y construir una lógica más completa dentro de los modelos *Witness*.

- ***Attributes o atributos***: son valores vinculados a un elemento *part*, es decir, son características de una *part* específica o unidad de trabajo. Cada atributo puede guardar un entero, un número real, una *string* o una referencia a otro elemento de modelado *Witness*.
  Hay dos tipos de atributos:
  - *Fiexed:* aquellos cuyo valor ha de ser el mismo para todos los *parts* del mismo nombre:
  - *Variable:* aquellos cuyo valor puede ser distinto para cada *part* individual.
- ***Variables***: son valores a los que se pueden acceder desde cualquier parte del modelo. Además de las variables que define uno mismo, *Witness* proporciona muchas variables de sistema (una de las cuales guarda el tiempo de reloj de la simulación actual). Una variable puede guardar un entero, un número real, una *string* o una referencia a otro elemento de modelado de *Witness*, puede ser un conjunto igual a una expresión que incluye atributos a un valor constante, a una muestra de una distribución o a otro variable y puede presentar su nombre y valor en pantalla.
- ***Distributions o distribuciones***: permiten construir con variabilidad dentro del modelo incluyendo datos que se han recogido de la situación real. Las distribuciones pueden ser

definidas por el usuario o pueden ser unas del amplio rango de distribuciones enteras y reales ya proporcionadas por *Witness*.

- ***Function o función***: *Witness* proporciona un gran número de funciones internas que se pueden utilizar para dotar de inteligencia al modelo. También se pueden crear funciones propias. Entre las funciones predefinidas están las funciones informativas y de estado, de muestreo aleatorias y aritméticas. Y las mismas pueden presentar sus nombres y valores devueltos más recientemente en la pantalla como parte del modelo y pueden ser creadas empleando las acciones de lenguaje *Witness* predefinidas y después ser utilizadas repetidamente en el modelo con la misma facilidad que las funciones predefinidas.
- ***Shifts o turnos***: son usados para simular un patrón de cambio (o una serie de patrones de cambio) que son, en efecto, una secuencia de periodos trabajados y no trabajados. Los patrones de cambio pueden aplicarse a recursos laborales y otros elementos para simular el funcionamiento del cambio.
- ***Part files o ficheros de piezas***: contienen una lista de *parts*. Para cada *part* en un fichero se puede especificar el tamaño de lote, atributos y el tiempo de llegada al modelo. También se puede sacar *parts* desde el modelo hasta ficheros. De este modo, es posible producir un *Part* file como una salida de un modelo que podrá ser utilizada como una entrada a otro.

5.6.4.6. Elementos gráficos

Representaciones gráficas de lo que está sucediendo en el modelo durante su ejecución.

- ***Time series o series temporales***: permiten almacenar datos que se obtienen de la ejecución de la simulación del modelo y crea un informe que contiene media, desviación típica, máximo, mínimo, etc. La representación se lleva a cabo en función del tiempo. Se suele utilizar para detectar las tendencias o los ciclos.
- ***Histograms o histogramas***: también registra y almacena información del sistema. Presenta los resultados en un diagrama de barras. Es habitual para determinar el rango de los valores observado por algún parámetro de la simulación.

- *Pie Charts*: gráficos circulares que muestran los resultados de la ejecución del modelo en formato de gráfico circular estándar en la pantalla. Existe la posibilidad de separar los segmentos para aumentar su impacto.

5.6.4.7. Reglas de entrada (Input Rule) y salida (Output Rule)

Es importante dedicar un apartado a la explicación de las reglas de entrada y salida de los *parts* que fluyen por el modelo. Como ya se ha explicado anteriormente, algunos elementos procesan los *parts* y para que la simulación siga una lógica es necesario definir una serie de reglas. Hay que tener en cuenta que no todas las reglas pueden ser utilizadas en todos los elementos disponibles en la simulación.

Las reglas de entrada y salida más utilizadas son:

- ***Wait (esperar):*** no se realiza ninguna acción sobre el *part*. Es la regla por defecto que poseen los elementos del modelo.
- ***Pull (coger):*** el elemento "coge" el *part* de otro elemento que esté en su lista de demanda. Sólo puede emplearse como regla de entrada.
- ***Push (empujar):*** el elemento "empuja" el *part* hacia un elemento que esté en su lista. Sólo se puede emplear como regla de salida.
- ***Sequence (secuencia):*** los *parts* tratan de ser estirados/empujados desde/hacia una lista de elementos secuencialmente. Si en un momento dado un *part* (como elemento de entrada) o un elemento (como elemento de salida) no está disponible, hay tres opciones:
    - *Wait:* se espera a que esté disponible.
    - *Next: si no está disponible, pasar al siguiente.*
    - *Reset: si un part* o elemento de la lista no está disponible, se resetea la secuencia y se vuelve a intentar desde el principio.
- ***Select (Seleccionar):*** el *part* se "coge/empuja" desde/hacia aquel elemento de la lista que ocupa la posición dada por el valor de alguna variable.

- ***Percent (porcentaje):*** el *part* se "coge/empuja" Aleatoriamente desde/hacia alguno de los elementos de la lista en función de unos determinados porcentajes de probabilidad.
- ***Most (mayor):*** el elemento "coge/empuja" el *part* desde/hacia aquel elemento de su lista que posea el mayor número de *parts* (opción *parts)* o el mayor número de espacios desocupados (opción *free*).
- ***Least (menor):*** el elemento "coge/empuja" el *part* desde/hacia aquel elemento de su lista que posea el menor número de *parts* (opción *parts)* o el menor número de espacios desocupados (opción *free*).
- ***Buffer (almacén):*** el elemento se "coge/empuja" desde/hacia un *buffer* interno de una máquina que se ha definido de forma que tenga este *buffer* interno.
- ***Match (emparejar):*** permite a una máquina tener distintas entradas.

Capítulo 6. Formulación e implantación del modelo

6.1. Introducción

Una vez explicado el entorno industrial en el que se va a basar la simulación, el proceso productivo de soldadura de un vehículo y los elementos que contiene el *software* de simulación *Witness*, comenzará la definición y construcción del modelo.

Se comenzará definiendo el sistema real mostrando los elementos del sistema y explicando las operaciones que llevan a cabo y así poder comprender el proceso de ensamblado.

En los dos sub-apartados sucesivos se comentarán respectivamente los datos de partida y las hipótesis que se han formulado para poder llevar a cabo la simulación de la manera más realista posible.

Por último, se detallará como se ha realizado la construcción del modelo en *Witness*, es decir, la definición de los elementos, configuración de operaciones, introducción de averías y tiempos de *setup,* etc.

6.2. Definición del sistema

El TFG consiste en el desarrollo de una simulación de la Isla robotizada del Taller de Soldadura denominada CX101, de la factoría de Carrocería-Montaje de Valladolid, en la que se lleva a cabo el ensamblado de la unidad trasera del vehículo *Captur* (véase Figura 45) como ya se comentó en la introducción del presente documento.

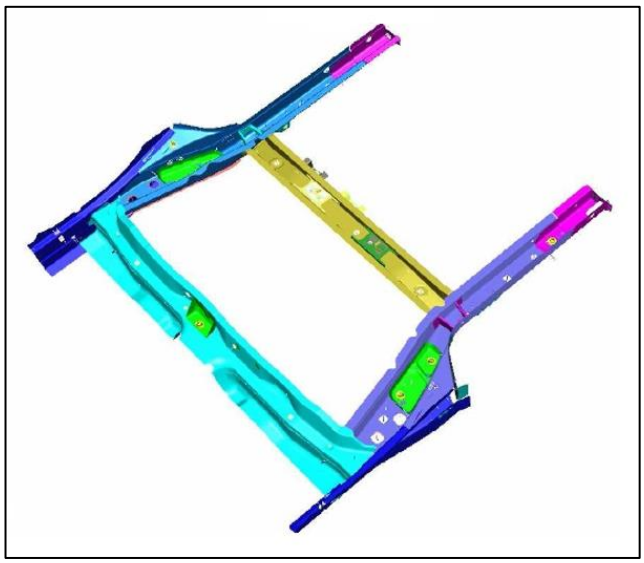

Figura 45. Unidad trasera ensamblada en la CX101 exportada con el software Catia V5.

El objetivo principal es la mejora de la productividad y la eficiencia de dicha Isla mediante el uso del simulador *Witness*, para averiguar si hay tiempos innecesarios y/o costes asociados al proceso que se puedan disminuir mediante la reducción/aumento del número de robots, redistribución de la isla, etc.

Para unir todos los elementos que constituyen la unidad trasera, hay implantados dentro de la CX101 nueve robots, cuatro manutenciones, cinco pinzas fijas al suelo y cinco maquetas donde se realizan los puntos de soldadura embarcada que se detallarán a continuación (véase Figura 46)

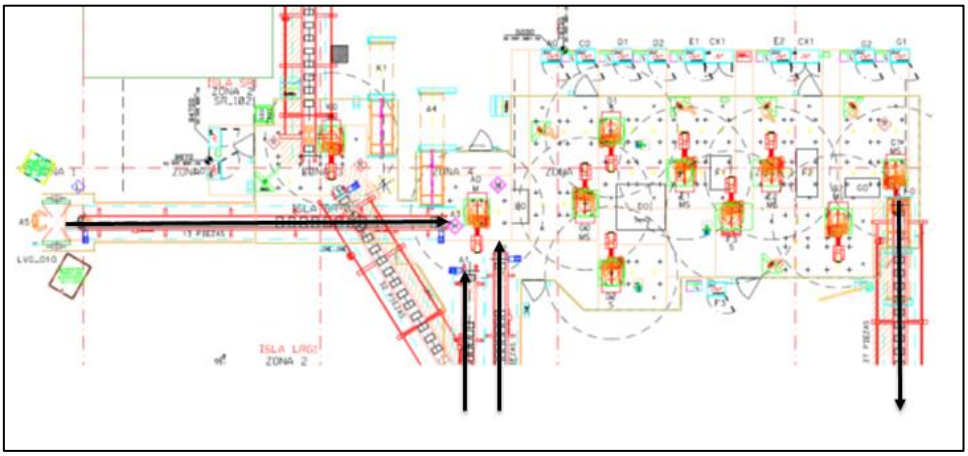

Figura 46. Distribución actual de la Isla CX101 exportada desde Microstation.

6.2.1. Robots

Son los elementos principales de la simulación. La Isla CX101 consta de nueve robots naranjas de la marca ABB, los cuales realizan diferentes operaciones de soldadura o manipulación:

- **Robot A0:** es un robot de manipulación que, gracias a un útil que lleva incorporado, es capaz de recoger en orden las dos traviesas que llegan desde la manutención A3, y los dos largueros de las manutenciones A1 y A2. Las posiciona en su útil y las deposita sobre la maqueta E0, cada una en su respectiva posición, y retorna a su posición inicial. Este robot no hace ninguna operación de soldadura (véase Figura 47).

Figura 47. Robot A0.

- **Robot C0:** es un robot de soldadura por resistencia con pinza al suelo. Se encarga de recoger las piezas posicionadas en la maqueta E0 con un útil de manipulación y trasladarlas hasta su pinza de soldadura instalada a poca distancia del mismo, realizando seis puntos de soldadura por resistencia (PSR) y uniendo el larguero derecho a las dos traviesas. Una vez finalizada la soldadura, traslada la pieza a la maqueta de geometría D0 y vuelve a su posición inicial (véase Figura 48).

Figura 48. Robot C0.

- **Robots D1 y D2:** son dos robots de soldadura por resistencia embarcada que se encuentran a los laterales de la maqueta D0, encargándose de realizar diecisiete PSR. El robot D1, situado en el lado izquierdo de la maqueta, realiza nueve PSR sobre el larguero derecho. El robot D2, situado a la derecha de la maqueta, realiza ocho PSR sobre el larguero izquierdo. Una vez que han finalizado sus respectivas operaciones vuelven a su posición inicial (véase Figura 49).

Figura 49. Robots D1 y D2.

- **Robot E1:** es un robot de soldadura por resistencia con pinza al suelo y se encarga de recoger la pieza de la maqueta D0 y

moverla hasta su respectiva pinza de soldadura en la cual se realizan nueve PSR. Realizada la operación de soldadura éste deposita la pieza sobre la maqueta F1 y vuelve a su posición inicial (véase Figura 50).

Figura 50. Robot E1.

- **Robot F3:** robot de soldadura por resistencia embarcada al cual le llega la señal de que la pieza se encuentra en la maqueta F1, realiza siete PSR y vuelve a su posición inicial (véase Figura 51).

Figura 51. Robot F3.

- **Robot E2:** robot de soldadura por resistencia con pinza al suelo. Su operación consiste en recoger la pieza de la

maqueta F1, realizar diez PSR en su respectiva pinza fijada al suelo y depositarla en la maqueta F2 (véase Figura 52).

Figura 52. Robot E2.

- **Robot G2:** robot de soldadura por resistencia con pinza al suelo. Su operación consiste en recoger la pieza de la maqueta F2, realizar nueve PSR en su respectiva pinza fijada al suelo y depositarla sobre la maqueta G0 (véase Figura 53).

Figura 53. Robot G2.

- **Robot G1:** robot de soldadura por resistencia con pinza al suelo. Recoge la pieza de la maqueta G0, realiza los últimos diez PSR de la isla en su respectiva pinza fijada al suelo y deposita la pieza en la manutención aérea H0 (véase Figura 54).

Figura 54. Robot G1.

6.2.2. Manutenciones

La Isla CX101 está constituida por cuatro manutenciones, tres de entrada y una de salida. Dichas manutenciones son líneas formadas por ganchos de posicionamiento en los que se colocan las diferentes piezas, ya sean de entrada o de salida. A continuación, se detallarán todas y cada una de ellas:

- **Manutención A1:** mueble fijo al suelo que conecta la Isla CX101 con otra que proporciona los largueros izquierdos. Posee una longitud de 10,8 metros y 17 ganchos de posicionamiento en las cuales se almacenan los largueros izquierdos (véase Figura 55).

Figura 55. Manutención A1.

- **Manutención A2:** mueble fijo al suelo que une la Isla CX101 con otra que abastece los largueros derechos. Tiene una longitud de 14.3 metros y una capacidad de stock de 17 piezas (véase Figura 56).

Figura 56. Manutención A2.

- **Manutención A3:** mueble fijo al suelo que abastece a la Isla CX101 desde una célula donde se encuentra un operario introduciendo las traviesas central y trasera. La longitud de esta manutención es de 15 metros y una capacidad de stock de 13 piezas (véase Figura 57).

Figura 57. Manutención A3.

- **Manutención H0:** es la manutención de salida de la Isla CX101. Se diferencia de las anteriores en que es una línea transportadora aérea, en la cual se cuelgan las unidades traseras que salen ensambladas (sin la base de la rueda de repuesto). Tiene una longitud de 17 metros y una capacidad de 27 piezas. Sirve de abastecimiento a la isla donde se ensambla la base en la que se colocará la rueda de repuesto (véase Figura 58).

Figura 58. Manutención H0.

6.2.3. Maquetas

Son los elementos encargados de proporcionar apoyo a las piezas que se mueven siguiendo el flujo de la producción, bien para que se realicen operaciones de soldadura sobre ellas, o bien para que se apoyen las piezas sirviendo de transición entre los diferentes ciclos de los robots.

Se pueden distinguir dos tipos de maquetas:

- *Maquetas de geometría*: sirven de transición entre los ciclos de los robots y sobre ella se realizan puntos de geometría, que son puntos de soldadura críticos para la estabilidad de la pieza. Estos puntos deben estar correctamente referenciados ya que son los mínimos para dar forma al ensamblado.
- *Maquetas de interposte*: sirven de apoyo para las piezas y sobre ellas se realizan puntos de terminación fijando la pieza para que no se mueva.

Dentro de la Isla, hay un total de cinco maquetas.

- Maqueta B0.
- Maqueta de Geometría D0.
- Maqueta F1.
- Maqueta F2.
- Maqueta G0.

6.2.4. Piezas

La unidad trasera del vehículo, que se ensambla en la isla simulada, será la encargada de soportar la base donde se almacena la rueda de repuesto. Se compone de dos traviesas, la central (véase Figura 59) y la trasera (véase Figura 60), y de dos largueros, el derecho (véase Figura 61) y el izquierdo (véase Figura 62).

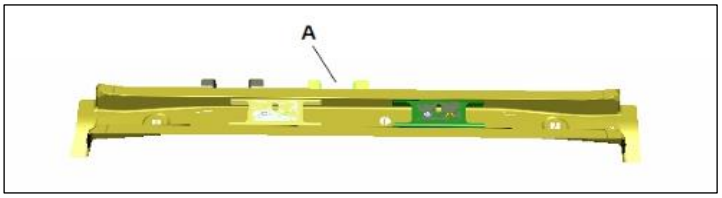

Figura 59. Traviesa central exportada con el software Catia V5.

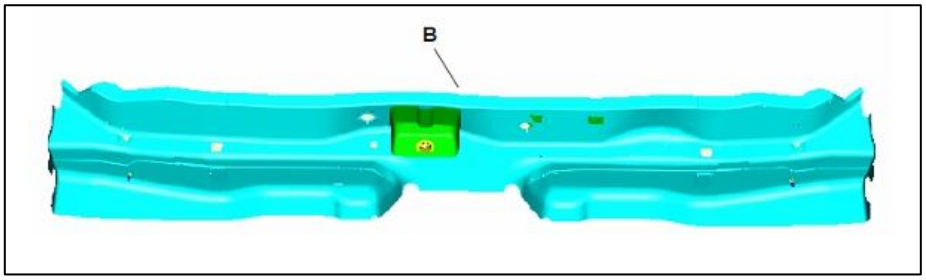

Figura 60. Traviesa trasera exportada con el software Catia V5.

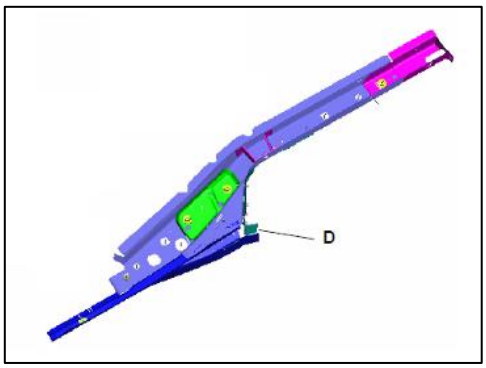

Figura 61. Larguero derecho exportado con el software Catia V5.

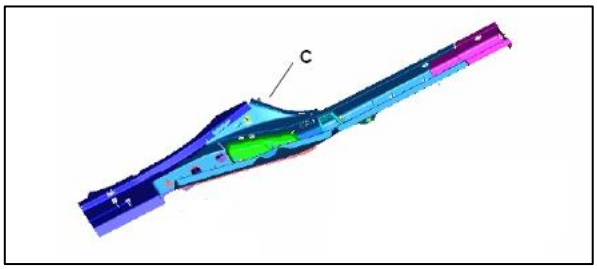

Figura 62. Larguero izquierdo exportado con el software Catia V5.

6.3. Recopilación y procesamiento de los datos de partida.

Para realizar la simulación, se requieren una serie de datos que se han obtenido por diferentes caminos. Los tiempos de ciclo de los robots y las manutenciones, así como sus propiedades técnicas y las paradas producidas, han sido proporcionados por Renault España S.A (los datos aportados, se encuentran en los anexos) y los tiempos de entrada mediante la medición con cronómetro.

Primero nos centramos en los tiempos de entrada de las manutenciones A1 y A2, que han sido obtenidos mediante cronometraje. Un paso fundamental antes del estudio de tiempos corresponde a la determinación del tamaño de la muestra o cálculo del número de observaciones, dado que éste es un factor fundamental para consecución de un nivel de confianza aceptable en el estudio. Se ha utilizado el **método tradicional** que consiste en:

1. Realizar una muestra de 10 lecturas porque los ciclos son menores a 2 minutos.
2. Calcular el rango o intervalo de los tiempos de ciclo:

$$R = X_{max} - X_{min}$$

3. Calcular la media aritmética:

$$\bar{X} = \frac{\sum x}{n}$$

Siendo:

- $\sum x$= Sumatorio de los tiempos de la muestra.
- n= Número de ciclos tomados.

4. Hallar el cociente entre el rango y la media:

$$\frac{R}{\bar{X}}$$

5. Buscar en la siguiente tabla el cociente (véase Tabla 4):

TABLA PARA CALCULO DEL NUMERO DE OBSERVACIONES					
R/X	5	10	R/X	5	10
0	0	0	0.48	68	39
0.01	1	1	0.50	74	42
0.02	1	1	0.52	80	46
0.03	1	1	0.54	86	49
0.04	1	1	0.56	93	53
0.05	1	1	0.58	100	57
0.06	1	1	0.60	107	61
0.07	1	1	0.62	114	65
0.08	1	1	0.64	121	69
0.09	1	1	0.66	129	74
0.10	3	2	0.68	137	78
0.12	4	2	0.70	145	83
0.14	6	3	0.72	153	88
0.16	8	4	0.74	162	93
0.18	10	6	0.76	171	98
0.20	12	7	0.78	180	103
0.22	14	8	0.80	190	108
0.24	13	10	0.82	199	113
0.26	20	11	0.84	209	119
0.28	23	13	0.86	218	126
0.30	27	15	0.88	229	131
0.32	30	17	0.90	239	138
0.34	34	20	0.92	250	143
0.36	38	22	0.94	261	149
0.38	43	24	0.96	273	156
0.40	47	27	0.98	284	162
0.42	52	30	1.00	296	169
0.44	57	33	1.02	303	173
0.46	63	36	1.04	313	179

Tabla 4. Tabla para el cálculo del número de observaciones.

Una vez calculado el tamaño de muestra se comienza con el cronometraje. El tipo de cronometraje utilizado es el denominado "**cronometraje acumulativo**". Consiste en hacer funcionar un reloj de forma ininterrumpida durante todo el estudio; poniéndose en marcha al principio del primer elemento del primer ciclo y no se detiene hasta finalizar todas las observaciones. Al finalizar cada elemento se consigna la hora que marca el cronómetro y el tiempo neto de cada elemento corresponde a las respectivas restas una vez finalizado el estudio. La principal ventaja de este método es que se asegura el registro de todo el tiempo del trabajo que se encuentra sometido a observación.

Por otro lado, los tiempos referentes a las paradas han sido obtenidos gracias al *software* **SMP99** (Supervisión de los Medios de Producción 99), que nos ha proporcionado un documento exportable a **Excel 2013** donde podemos encontrar la duración (en minutos), fecha, causa y localización de todos y cada uno de los parones en la producción que se han producido en la Isla CX101 desde enero hasta octubre de 2015. Gracias a estos datos se ha podido calcular el tiempo entre paradas (en horas) y asemejar a distribuciones estadísticas las paradas de todos y cada uno de los elementos que componen el sistema gracias al programa **Statgraphics Centurion XVII**.

Los pasos que se han llevado a cabo para el proceso de tratamiento de los datos disponibles son:

1. Recoger los datos del sistema real. En este caso, la mayoría de los datos han sido facilitados por Renault España S.A y se encuentran en los anexos añadidos al final del TFG.
2. Introducir en el programa los tiempos entre llegadas de los *parts* C y D, los tiempos entre llegadas de las paradas y la duración de las mismas en la hoja de datos , todos ellos en horas.
3. Una vez introducidos todos los datos en el Statgraphics, seguimos las instrucciones de la Figura 63 para obtener las distribuciones teóricas.

Figura 63. Instrucciones para calcular distribuciones teóricas.

4. Las distribuciones utilizadas se describen brevemente a continuación:
   a. *D.Weibull*: se trata de un modelo continuo asociado a variables de tipo tiempo de vida, tiempo hasta que un mecanismo falla, etc. Su función de distribución es (véase Figura 64):

$$F(x) = 1 - e^{-(\frac{x}{\alpha})^{\beta}}$$

   Donde α es un parámetro de escala y β es un parámetro de forma lo cual proporciona una gran flexibilidad al modelo.

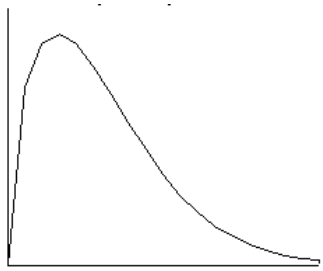

Figura 64. Función de distribución Weibull

   b. *D.Lognormal*: esta distribución se utiliza frecuentemente para expresar el comportamiento de observaciones con asimetría positiva, en donde la mayoría de los valores ocurren en las proximidades de un valor mínimo. Su función de distribución es la siguiente (véase Figura 65):

$$F(x) = \frac{1}{x\sigma_y\sqrt{2\pi}}^{\left(-\frac{(\ln x - \mu_y)^2}{2\sigma_y}\right)}$$

Donde los parámetros μ y σ representan la media y la desviación típica respectivamente.

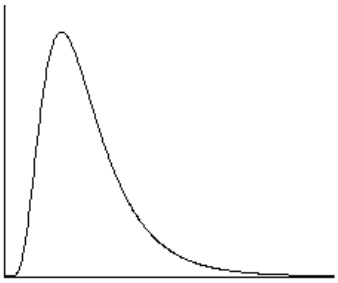

Figura 65. Función de distribución Lognormal.

c. *D.Negativa Exponencial*: este modelo suele utilizarse para variables que describen el tiempo hasta que se produce un determinado suceso y su función de distribución se muestra a continuación (véase Figura 66):

$$F(x) = 1 - e^{\left(-\frac{x}{\alpha}\right)}$$

Donde α representa la media.

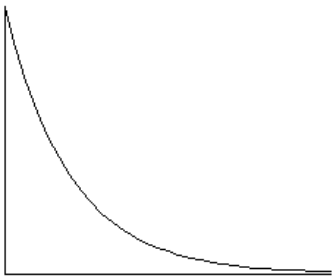

Figura 66. Función de distribución Negativa Exponencial.

d. *D.Uniforme:* es el modelo continuo más simple. Corresponde al caso de una variable aleatoria que sólo puede tomar valores comprendidos entre los extremos a y b, de manera que todos los intervalos de una misma

longitud tienen la misma probabilidad. Su función de distribución es (véase Figura 67):

$$F(x) = \frac{x - a}{b - a}$$

Donde a y b son el límite inferior y superior respectivamente.

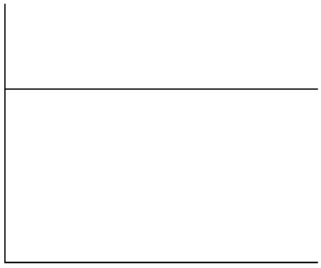

Figura 67. Función de distribución Uniforme.

Todas y cada una de las aproximaciones que se han realizado vienen expuestas y explicadas en los anexos. Un ejemplo de los datos obtenidos por el Statgraphics se muestra a continuación (véase Figura 68).

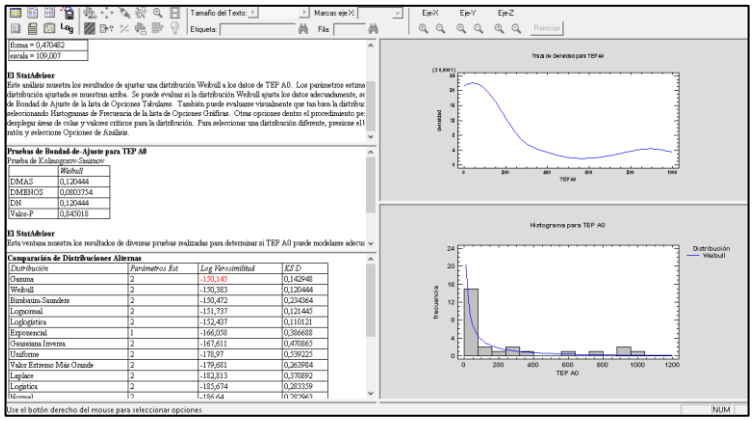

Figura 68. Ejemplo aproximación del Tiempo Entre Paradas (TEP) del Robot A0.

EL tiempo de entrada de materiales de la manutención A3 viene determinado por una **FOS** (Ficha de Operación *Standard*) en centésimas de minuto. Hemos añadido una variabilidad a dicha entrada y unos turnos ya que las piezas que entran en la manutención A3, como ya se ha comentado en subcapítulos anteriores, proceden de operaciones llevadas a cabo por un operario.

Tanto los datos de entrada como los datos de las paradas en la producción, son básicos para llevar a cabo la simulación de modelos. La etapa que consiste en la determinación de las distribuciones estadísticas es normalmente la que consume mayor parte de tiempo y recursos.

6.4. Hipótesis o estimaciones realizadas

En este apartado se expondrán las diferentes hipótesis que se han estimado oportunas:

- Los tiempos están medidos en horas.
- Las maquetas están representadas en el modelo como máquinas, pero no realizan ninguna operación por sí solas. Se ha programado el modelo para que las piezas pasen por ellas, con un tiempo de ciclo de 0, para poder introducir las averías que se producen en las mismas de forma independiente y así poder apreciar cuándo el operario de mantenimiento está reparándolas.
- Los robots D1 y D2 paralelos de soldadura embarcada se han representado como un único elemento, ya que comienzan el ciclo a la vez. Se ha introducido el tiempo de ciclo del robot D1, debido a que es el de mayor duración y, por tanto, es cuello de botella entre los dos.
- Según el convenio interno de Renault Valladolid, el calendario laboral consta de 216 días laborables. Se ha dividido en tres turnos el horario laboral:
    - Turno de mañana: consta de 8 horas laborales de lunes a sábado (6:00-14:00) con tres descansos que suman un total de 35 minutos.
    - Turno de tarde: consta de 8 horas laborales de lunes a sábado (14:00-22:00) con tres descansos que suman 35 minutos.
    - Turno de noche: de lunes a jueves 7 horas (22:00-5:00) excepto el viernes que se trabajan 8 horas (22:00-6:00), con tres descansos que suman 35 minutos. Hay 45 viernes laborales y suponemos que los sábados no disponen de este turno, ya que esto sólo sucede cuando hay cuarto turno.

- Se ha supuesto que el operario de Mantenimiento tiene una disponibilidad del 100%.
- En las paradas se han agrupado la mayoría las causas, ya sean averías, defectos de piezas, controles de calidad, etc.
- En el segundo experimento que se ha llevado a cabo, se supone que durante las obras de Navidad no se añaden mejoras en la isla CX101.
- Se supone que el objetivo diario de producción es de 1.200 vehículos/día.

6.5. Implantación del modelo

Una vez presentado el proceso de soldadura, los elementos del modelo, la fuente y procesos de obtención de datos, se procederá a explicar cómo se ha ido implantando el modelo en *Witness* (véase Figura 69).

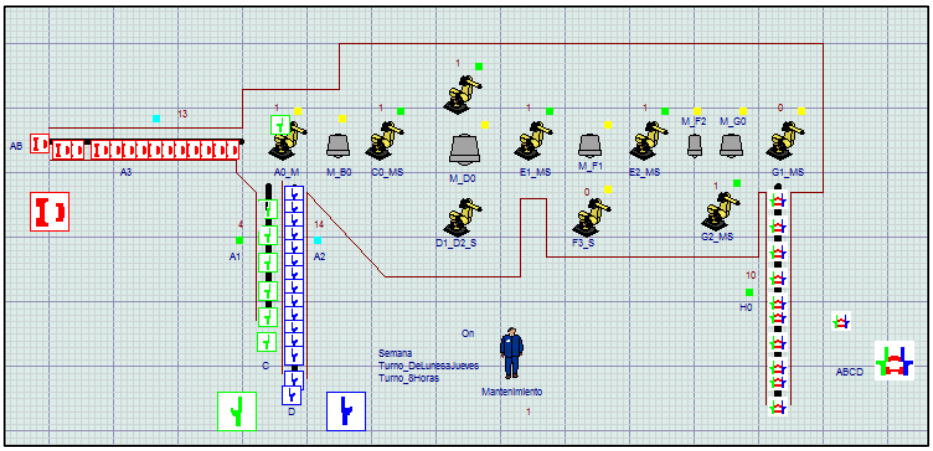

Figura 69. Representación gráfica del modelo en Witness.

Para exponer la implantación dividiremos este aparatado en distintos segmentos, en los que se explicará detenidamente cómo se han ido creando todos y cada uno de los elementos que intervienen en la simulación.

6.5.1. Productos o piezas

El primer elemento definido son los productos que entran, se ensamblan y salen del modelo. Estos productos, como ya hemos

explicado, son las traviesas y los largueros que se incorporan al modelo por las manutenciones A1, A2 y A3 y le abandonan por la H0.

Para la creación de estos elementos se ha utilizado la opción *part*. Un *part,* llamado AB, para las dos traviesas que llegan en una misma garra desde la manutención A3, otro *part,* denominado C, para el larguero izquierdo que se incorpora desde la manutención A1 y, por último, otro *part,* denominado D, para el larguero derecho que llega desde la manutención A2.

Para crear los *parts* seguimos los pasos explicados en el Capítulo Simuladores (*Define-Detail-Display*). Ahora se procederá a explicar la representación de cada uno de ellos.

- ***Part* AB:** es un *part* activo debido a que no procede de ningún *part file,* y hace referencia a las traviesas representándose en el modelo con el icono de la Figura 70. Para introducir en *Witness* el tiempo entre llegadas de dicho *part* se ha consultado la FOS de la célula que le aporta. Esta FOS estima un tiempo de 14 centésimas de minuto (8,4 segundos) lo que tarda un operario en introducir las traviesas en el modelo; por tanto, se ha cronometrado el tiempo en el terreno para calcular la desviación típica y poder asemejar estas medidas a una distribución Normal con media 8,4.

Figura 70. Representació gráfica de las Traviesas.

- ***Part* C:** es un *part* activo y representa el larguero izquierdo y su icono en el modelo es el de la Figura 71. Los tiempos de llegada se han medido mediante cronómetro (anexo) y con los resultados, se ha calculado la media para asemejarlo a una distribución exponencial.

Figura 71. Representación gráfica del larguero izquierdo.

- ***Part* D:** es un *part* activo y representa el larguero derecho y su icono en el modelo es el de la Figura 72. Para conocer los tiempos de llegadas se ha seguido el mismo procedimiento que con el larguero izquierdo.

Figura 72. Representación gráfica del larguero derecho.

- ***Part* ABCD:** es un *part* pasivo y representa la unidad trasera (véase Figura 73) con sus componentes principales ya ensamblados. Este *part* aparece en el modelo tras la operación del Robot A0, que se encarga de colocar las piezas en su correspondiente orden para ser posteriormente unidas mediante los puntos de soldadura.

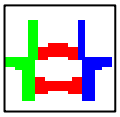

Figura 73. Representación gráfica de la unidad trasera.

Las distribuciones de probabilidad asociadas a los tiempos de entrada de los *parts* AB, C y D se muestran en los anexos.

6.5.2. Robots o máquinas

Son los elementos que realizan operaciones sobre los *parts* en el modelo y, por tanto, poseen un tiempo de ciclo. Se han definido los periodos en los que están inactivos ya sea debido a paradas por averías, mantenimiento o por vacaciones (en estas últimas se han de parar para poder realizar obras orientadas a mejorar la productividad de las instalaciones); se ha asociado a cada uno de los robots un *labor* que se encarga de reparar las máquinas cuando se producen fallos que provocan su parada.

Como todos los elementos, se han definido, detallado y representado siguiendo los pasos pertinentes. Se han creado nueve robots cuyo icono de representación se muestra en la Figura 74. En ella se puede observar, además del icono de simulación, un dígito que sólo toma dos valores ("0"

si no está procesando ningún *part* y "1" en caso contrario), el icono de estado, la cola del *labor queue* que permite observar gráficamente cómo el operario de mantenimiento se acerca al robot cuando tiene una avería, y el nombre del robot junto con una sigla que indica su operación ("M" Manipulación ; "S" Soldadura Embarcada; "SM" Soldadura con pinza al suelo).

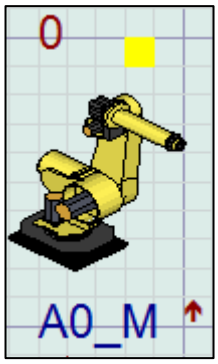

Figura 74. Representación gráfica del Robot A0 de Manipulación.

Los tiempos de ciclo de todos y cada uno de los robots implantados en el modelo, después de las obras de verano de 2015, se muestran en la Tabla 5. Se puede observar que todos los elementos del sistema poseen un tiempo de ciclo de 80 centésimas de minuto, dato a tener en cuenta en la simulación, ya que ningún elemento debe superar dicho valor para conseguir los objetivos propuestos por la marca automovilística.

ISLA	ROBOT	TIPO ROBOT	TC (centésimas de minuto)	TC (minutos)	TC (segundos)	TC (Horas)
CX101	A0	M	65	0,65	39	0,01083333
CX101	C0	MS	56	0,56	33,6	0,00933333
CX101	D1	S	51	0,51	30,6	0,0085
CX101	D2	S	48	0,48	28,8	0,008
CX101	E1	MS	65	0,65	39	0,01083333
CX101	E2	MS	62	0,62	37,2	0,01033333
CX101	F3	S	32	0,32	19,2	0,00533333
CX101	G2	MS	75	0,75	45	0,0125
CX101	G1	MS	55	0,55	33	0,00916667

Tabla 5. Tiempos de Ciclo de los robots.

Para la introducción de paradas se ha de seguir la ruta "*Detail.../Breakdowns",* o bien clicar dos veces con el botón izquierdo del ratón sobre el robot que se quiera modificar. En el fichero exportado de averías, se disponía de la duración de las paradas y la de la fecha en la

que se produjeron; con dichos datos se ha calculado el tiempo entre paradas. Una vez procesados los datos, como ya se ha explicado en el apartado "Recopilación y procesamiento de los datos de partida.", se han asemejado a una distribución estadística. En los anexos se encuentran las aproximaciones realizadas.

Con el fin de hacer más visible la representación del modelo se programó el robot A0 para que, una vez introducidos todos los *parts,* se ensamblasen las piezas y se pudiese observar un icono con la pieza ya ensamblada (véase Figura 75).

```
ICON = 405
CHANGE ALL to Piezas.ABCD
PRINT "Pass"
```

Figura 75. Comandos con instrucciones para cambiar el tipo de icono.

Es importante mencionar que todos los robots son tipo *single* excepto el robot A0 que es tipo *assembly*, y se ha tenido que programar para que coja las piezas siguiendo el orden fijado (véase Figura 76).

```
SEQUENCE /Wait Manutenciones.A3(1) at Front#(1),
Manutenciones.A1(1) at Front#(1),
Manutenciones.A2(1) at Front#(1)
```

Figura 76. Comandos con instrucciones que permiten que el Robot A0 coja primero las traviesas y luego los largueros.

En estos elementos también se ha añadido un tiempo de *setup*, representando los cambios de cápsulas de los electrodos y operaciones de mantenimiento. Este tiempo de *setup* se ha calculado en función de los puntos de soldadura que realiza cada robot, ya que cada 10.000 puntos de soldadura se han de cambiar las cápsulas y para ello es necesario parar la producción en la isla.

6.5.3. Manutenciones, Transportadores o conveyor.

Son los elementos que trasportan los *parts* desde un lugar a otro del modelo. Como todo elemento, seguimos la ruta "*Define/Detail/Display*" para crear y representar los *conveyor* (véase Figura 77).

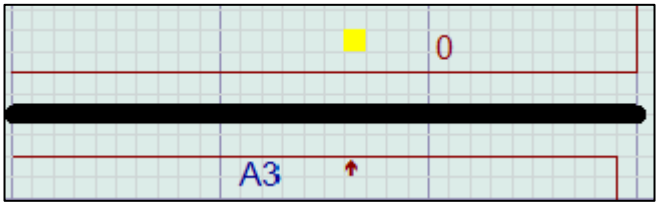

Figura 77. Representación gráfica de la manutención A3.

Dichas manutenciones constan de un conjunto de ganchos que se utilizan para transportar las piezas y que se acumulan formando colas. Para definir esta condición hay que ir a "*Detail/Type/indexed queuing*".

Estos elementos, al igual que los robots, poseen diferentes estados que se muestran en la siguiente tabla (Tabla 6). En estos elementos se han definido su longitud, capacidad y tiempo de ciclo. También llevan asociado un *labor* que se encarga de resolver las paradas que se producen. Se han programado como "*Indexed queuing*" que indica que las piezas en la manutención se pueden acumular.

	Color	Estado
	Blanco	Fuera de turno
	Amarillo	Esperando piezas
	Verde Claro	Movimiento libre
	Magenta	Bloqueada
	Cián	Movimiento de cola
	Rojo	Averíado
	Verde Oscuro	Reiniciando

Tabla 6. Posibles estados de un conveyor.

Los tiempos de ciclo de todas y cada una de las manutenciones implantados en el modelo se muestran en la Tabla 7.

ISLA	MANUTENCION	TC (cts)	TC (minutos)	TC (segundos)	TC (Horas)
CX101	A3	34,8	0,348	20,88	0,0058
CX101	A2	44,4	0,444	26,64	0,0074
CX101	A1	44,4	0,444	26,64	0,0074
CX101	H0	47,4	0,474	28,44	0,0079

Tabla 7. Tiempos de Ciclo de las manutenciones.

Las averías que se han introducido en las manutenciones se muestran en los anexos.

6.5.4. Mantenimiento o *labor.*

Representan los operarios de mantenimiento (véase Figura 78) que se encuentran en el Taller de Soldadura y que acuden a la isla cuando se produce una parada. Gracias al Software SMP99 los operarios saben cuál es la causa de la parada y acuden al lugar donde se haya producido para volver a poner en marcha el proceso.

Figura 78. Representación gráfica del operario de mantenimiento.

El puesto de mantenimiento va rotando en función de los tres turnos de producción; por esa razón se ha asignado a este elemento los tres turnos de trabajo existentes.

Las primeras simulaciones las realizaremos suponiendo una disponibilidad del 100 % del operario. Más adelante reduciremos esta disponibilidad (*available*), ya que un operario de mantenimiento tiene que ocuparse de las averías que ocurren en más islas del taller, no solo se centra en una.

6.5.5. Variables.

Se han creado una serie de variables con el objetivo de obtener resultados que nos ayuden a experimentar con el modelo, sacar conclusiones y proponer soluciones (véase Figura 79).

Figura 79. Principales variables creadas en el modelo

La primera variable que se creó fue "*N_Parts*" (véase Figura 80) que indica el número de piezas ensambladas que abandonan la isla con dirección hacia otra isla del taller donde se ensambla la base de la rueda de repuesto.

```
Variables.Numero_Piezas_Out = Variables.Numero_Piezas_Out + 1
```

Figura 80. Contador de piezas ensambladas que salen del modelo.

También se ha calculado el tiempo medio que las piezas se encuentran en los *conveyor* (en minutos) y el tiempo medio que tardan las piezas en atravesar el modelo, lo que se conoce como WIP (*Work In Process*) mediante los siguientes comandos introducidos en las reglas de salida de las manutenciones (véase Figura 81)

```
Variables.AVT_ConveyorH0 = ATime (H0) * 60
Variables.WIP = NWIP (Piezas.AB) + NWIP (Piezas.C) + NWIP (Piezas.D) + NWIP (Piezas.ABCD)
```

Figura 81. Comandos con instrucciones para determinar el tiempo medio de una pieza en una determinada manutención, el tiempo medio de una pieza en el modelo.

Para calcular el número de paradas en la producción, se ha introducido una serie de comandos en la salida de todos y cada uno de los robots y manutenciones como se muestra en la Figura 82.

```
Variables.ESTADO (1) = IState (A0_M)
IF Variables.ESTADO (1) = 3
 Variables.N_Breakdowns_A0 = Variables.N_Breakdowns_A0 + 1
ENDIF
```

Figura 82. Comandos con instrucciones para determinar el número de paradas en la producción.

La variable "ESTADO_MANTENIMIENTO" se utiliza simplemente para indicar con un 1 si el operario de mantenimiento está realizando tareas de reparación y con un 0 si se encuentra en reposo o realizando operaciones en otras islas del taller.

Las últimas dos variables "N_Paradas" y "Designación" se han creado con el propósito de representar el número de averías que se producen

durante la simulación y al elemento que pertenecen. Debido a que almacenan el nombre y número de paradas en la producción producidas en todos y cada uno de los elementos del sistema y su capacidad es de 22. La programación de la variable "N_Paradas" se ha realizado dentro de la sección "Actions" que se encuentran en el apartado "Breakdowns" de cada elemento (véase Figura 83).

```
Variables.N_Paradas_R_M_Maq(1) = Variables.N_Paradas_R_M_Maq(1) + 1
```

Figura 83. Comandos con instrucciones para el cálculo de las paradas en la producción.

En cambio, para la programación de la variable "Designación" se han introducido todos y cada uno de los comandos dentro de la misma (véase Figura 84).

```
Designación_R_M_Maq(1) = Robots.A0_M
Designación_R_M_Maq(2) = Robots.C0_MS
Designación_R_M_Maq(3) = Robots.D1_D2_S
Designación_R_M_Maq(4) = Robots.E1_MS
Designación_R_M_Maq(5) = Robots.F3_S
Designación_R_M_Maq(6) = Robots.E2_MS
Designación_R_M_Maq(7) = Robots.G2_MS
Designación_R_M_Maq(8) = Robots.G1_MS
Designación_R_M_Maq(9) = Maquetas.M_B0
Designación_R_M_Maq(10) = Maquetas.M_D0
Designación_R_M_Maq(11) = Maquetas.M_F1
Designación_R_M_Maq(12) = Maquetas.M_F2
Designación_R_M_Maq(13) = Maquetas.M_G0
Designación_R_M_Maq(14) = Manutenciones.A3
Designación_R_M_Maq(15) = Manutenciones.A1
Designación_R_M_Maq(16) = Manutenciones.A2
Designación_R_M_Maq(17) = Manutenciones.H0
```

Figura 84.Comandos utilizados para mostrar el nombre de todos y cada uno de los elementos que participan en el proceso de producción.

6.5.6. Turnos.

Los turnos son imprescindibles para aumentar el grado de exactitud del modelo. Para ello se ha creado un turno principal, denominado "TP_Semana", compuesto por cuatro sub-turnos con la denominación "ST" ("ST_LunesaJueves","ST_Viernes","ST_Sabado","ST_Domingo"), que todos a su vez se desglosan en otros dos sub-turnos denominados con el prefijo "ST2" ("ST2_8Horas", "ST2_7Horas"), excepto el sub-turno "ST_Domingo" que no se desglosa debido a que todo las horas son consideradas de descanso.

En el proceso real, de lunes a viernes, existen tres turnos laborales (mañana, tarde y noche) y el sábado tan solo tiene dos turnos (mañana y tarde), por lo que atendiendo a la clasificación descrita en el párrafo anterior, la configuración horaria queda de la siguiente manera:

- TP_Semana
  - ST_LunesaJueves
    - ST2_8Horas (Mañana)
    - ST2_8Horas (Tarde)
    - ST2_8Horas (Noche)
  - ST_Viernes
    - ST2_8Horas (Mañana)
    - ST2_8Horas (Tarde)
    - ST2_7Horas (Noche)
  - ST_Sabado
    - ST2_8Horas (Mañana)
    - ST2_7Horas (Tarde)
  - ST_Domingo

En cuanto a los tiempos de descanso *(Rest Time),* independientemente de si el turno es de 8 o de 7 horas se ha introducido un descanso de 35 minutos. En la Figura 85 podemos observar la configuración del "ST2_8Horas".

	Period Type	Working Time	Rest Time	Overtime
1	Period	7.42	0.583	0.0
Total		7	0	0

Figura 85. Distribución del tiempo en el sub-turno "ST2_8Horas".

Capítulo 7. Validación y experimentación del modelo.

7.1. Introducción.

Una vez creado el modelo de la isla robotizada, es necesario llevar a cabo su validación a fin de comprobar en qué medida refleja el comportamiento del sistema real.

Antes de llevar a cabo la experimentación del modelo, se deben seguir unos pasos previos que son:

- Etapa de calentamiento, que es el período necesario para que el modelo se encuentre en el estado normal de funcionamiento. Si nada más comenzar la simulación, el funcionamiento del modelo ya es normal, esta etapa será nula.
- Determinación del tiempo de simulación del modelo. Este tiempo depende de numerosos factores como, por ejemplo, la aleatoriedad del sistema.
- Determinación del número de réplicas. No es conveniente sacar conclusiones basándose en los datos obtenidos de una sola experimentación. Se suele realizar de 3 a 5 repeticiones con cada experimento cambiando las semillas de generación de los números aleatorios, saltando un rango de valores aleatorios, etc.

7.2. Validación del modelo.

La validación consiste en determinar si el modelo conceptual de simulación es una representación exacta del sistema real en estudio. Si determinamos que el modelo es válido, podemos afirmar que las decisiones tomadas a partir de dicho modelo son similares a las que se tomarían físicamente con el sistema.

Hay diversas formas de validar el modelo, por ejemplo, observando cómo funciona, enseñándoselo a personas que conocen el sistema o comparando el modelo con los resultados del sistema real.

Una vez finalizado el proceso de validación, se determina que el modelo es adecuado y podremos comenzar a realizar experimentos sobre él para posteriormente sacar conclusión y tomar decisiones.

La primera prueba que se ha realizado es comprobar que el número de piezas ensambladas en un día corresponde, con un ligero margen de error, a la cantidad de vehículos que se fabrican por día en la fábrica de Valladolid.

Para ello, se ha procedido a la simulación durante 24 horas obteniéndose un total de 1.204 piezas ensambladas. Teniendo en cuenta que el objetivo diario de vehículos en la factoría actualmente es de 1.130, podemos afirmar que la prueba es válida, pudiendo observar que la isla es capaz de producir con mayor cadencia (véase Figura 86).

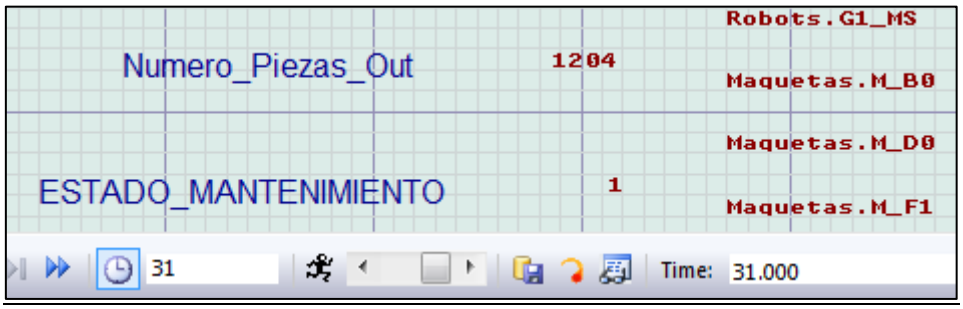

Figura 86. Resultados de la primera prueba de validación.

Es necesario resaltar que en el menú *time* el valor introducido es 31. Esto se debe a que el primer turno está programado para que empiece a las 7:00 pm; por tanto, para que se observe la producción de los tres turnos hay que simular hasta las 7:00 pm del día siguiente, es decir, 24 horas en total.

La segunda prueba que se ha realizado, es la simulación durante 7 meses con 8 Robots (sin F3), debido a que en las obras de verano de 2015 se instaló el Robot F3 en la isla CX101. Para ello se ha suprimido el Robot mencionado creando un nuevo modelo donde se han introducido los anteriores tiempos de ciclo correspondientes a los meses anteriores a

las modificaciones que se produjeron en las obras de verano (véase Tabla 8 *y* Tabla 9).

ISLA	ROBOT	TIPO ROBOT	TC (cts)	TC (minutos)	TC (segundos)	TC (Horas)
CX101	A0	M	65,29	0,6529	39,174	0,01088167
CX101	C0	MS	56,43	0,5643	33,858	0,009405
CX101	D1	S	56,59	0,5659	33,954	0,00943167
CX101	D2	S	47,79	0,4779	28,674	0,007965
CX101	E1	MS	64,6	0,646	38,76	0,01076667
CX101	E2	MS	61,97	0,6197	37,182	0,01032833
CX101	F3	S	0	0	0	0
CX101	G2	MS	76,32	0,7632	45,792	0,01272
CX101	G1	MS	55,5	0,555	33,3	0,00925

Tabla 8. Tiempos de ciclo de los robots antes de las obras de verano de 2015.

ISLA	MANUTENCION	TC (cts)	TC (minutos)	TC (segundos)	TC (Horas)
CX101	A3	70	0,7	42	0,0116666
CX101	A2	75,23	0,7523	45,138	0,0125383
CX101	A1	71,58	0,7158	42,948	0,01193
CX101	H0	85,63	0,8563	51,378	0,0142716

Tabla 9. Tiempos de ciclo de las manutenciones antes de las obras de verano de 2015.

La prueba consiste en simular durante 7 meses, que equivalen según el calendario de Renault España a 214 días (5.136 horas) hasta las vacaciones de verano. Este intervalo de tiempo está comprendido entre el 1 de enero de 2015 hasta el 2 de agosto del mismo año. Cabe destacar también que se han introducido todos los días festivos tanto locales como nacionales.

Para verificar los resultados, se realiza un cálculo aproximado de los vehículos que teóricamente se habrían tenido que fabricar en ese periodo de tiempo, sabiendo que la cadencia de frabricación era de 1.120 vehículos diarios. Este valor no siempre es el mismo, debido a la ya mencionada producción bajo pedido, estos objetivos fluctúan cada cierto tiempo.

$$Nº\ días\ laborales = 25 + 24 + 27 + 23 + 25 + 26 + 27 + 1 = 178$$

$$Nº\ Vehículos = 178\ días * 1.120\ \frac{Vehículos}{Día} = 199.360\ vehículos$$

Ahora observamos las unidades traseras que se han ensamblado en la Figura 87:

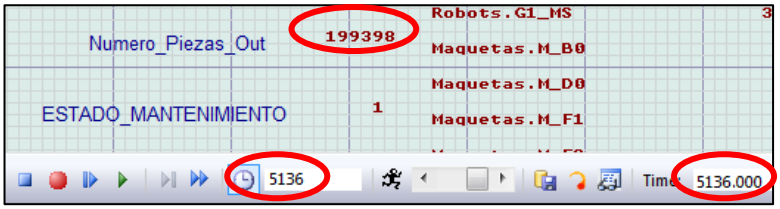

Figura 87. Resultados de la simulación con 8 robots durante 5.136 horas.

Como podemos observar, la isla CX101 sin el robot F3 era capaz de satisfacer la demanda ya que el número de unidades traseras ensambladas es de 199.398 unidades y lo previsto era 199.360 vehículos. Sin embargo, si la cadencia de producción aumentara a 1.130 vehículos diarios, la isla se convertiría en cuello de botella debido a que se requerirían 201.140 vehículos (178 días x 1.130 vehículos/día) en ese mismo periodo de tiempo. Podemos afirmar, por tanto, que el modelo es realista y justificar las remodelaciones en la isla durante las obras de verano.

La tercera prueba de validación, consiste en comparar el número de paradas reales que se han producido en la isla a lo largo de los 7 meses con los datos obtenidos de la simulación. Para ello se ha realizado una gráfica en Excel que muestra la comparativa de forma clara y concisa (véase Figura 88). En los resultados obtenidos, se puede apreciar una clara semejanza ente las paradas de la producción en la reales y las simuladas. Observando la gráfica, se observa que los elementos D0 y C0 poseen valores más elevados que los obtenidos en la simulación. Esto es debido a que la estadística no es exacta, aunque sí se pude predecir que dichos elementos iban a ser objeto de numerosas averías. Por tanto, podemos concluir que el modelo es válido y se asemeja a la realidad, finalizando, por tanto, la etapa de validación.

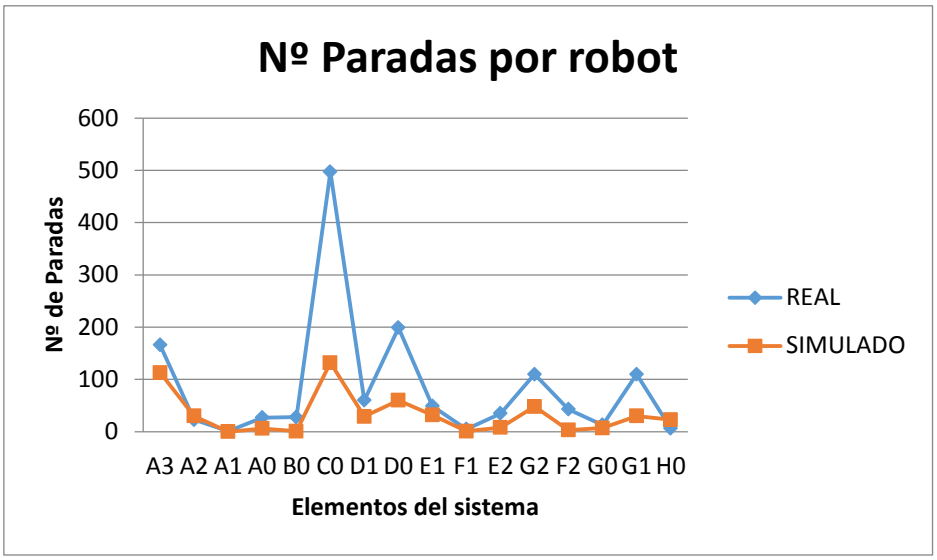

Figura 88 .Comparación entre el número de paradas reales y simuladas ente los meses de enero y agosto

7.3. Realización de Experimentos.

Una vez validado el modelo, el paso siguiente consiste en realizar cambios en algún parámetro del modelo con el objetivo de intentar mejorar la productividad de la isla.

7.3.1. Primer experimento. Simulación con 9 robots.

Para comprobar si la implantación del nuevo robot iba a suponer un aumento de la productividad y, por tanto, una maximización de los beneficios, se ha realizado una simulación desde enero hasta agosto de 2015 (5.136 horas), pero introduciendo el Robot F3 y los nuevos tiempos de ciclo.

Para ello introducimos en "*Model/Clock/…*" que el día de inicio debe ser el 1 de enero de 2015 y comenzamos el experimento obteniendo los resultados siguientes (véase Figura 89):

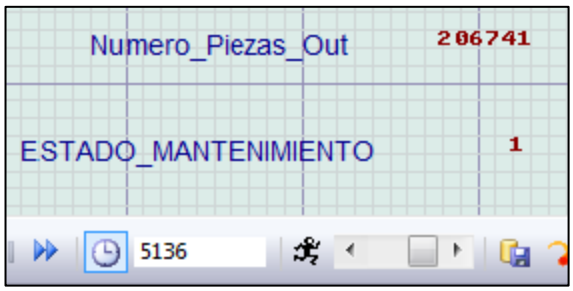

Figura 89. Resultados de la simulación con 9 robots durante 5.136 horas.

Al final de la simulación la cantidad de elementos ensamblados asciende a 206.741 unidades. Si comparamos este dato con el que se obtuvo en la simulación con ocho robots durante el mismo periodo de tiempo (199.398 unidades) podemos concluir que la incorporación del robot F3, supone una gran mejora en la instalación generando un aumento de la productividad.

A continuación, se muestran las estadísticas referentes a cada uno de los elementos en porcentajes (véase Figura 90*):*

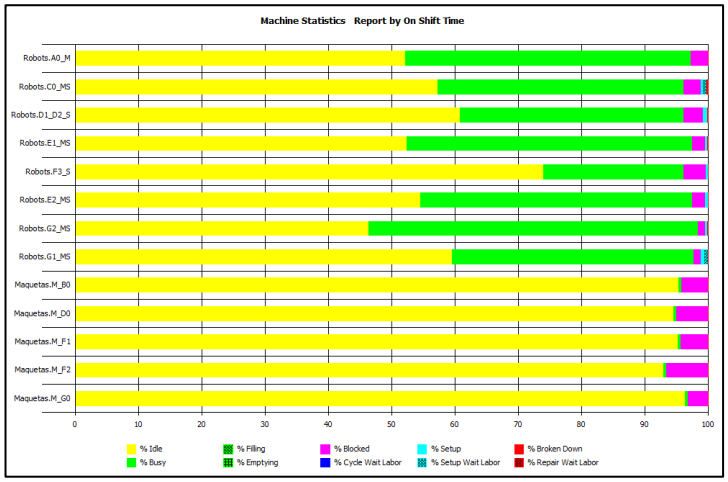

Figura 90. Estadísticas de los robots y maquetas del primer experimento.

Es importante destacar el elevado porcentaje de tiempo ocioso (% *idle*) que posee el robot F3 introducido en las obras de verano. Esto se debe a que realiza pocos puntos de soldadura y podría aumentar su rendimiento si se le adjudicasen más.

En cuanto al tiempo de ocupación (% *Busy*), se puede advertir que el Robot G2 es el que mayor ocupación tiene, y por tanto, el más

sobrecargado. También cabe destacar que en el robot C0 se originan un gran número de averías respecto a los demás elementos (0,2%), lo que a largo plazo puede suponer una pérdida de la productividad y una elevada utilización de los operarios de mantenimiento.

Si observamos las estadísiticas de las manutenciones (véase Figura 91), se puede destacar (en rojo) que el porcentaje de averías en la manutención H0 es elevado, por lo que habría que desarrollar un estudio exhaustivo para conocer las causas que generan dichas averías.

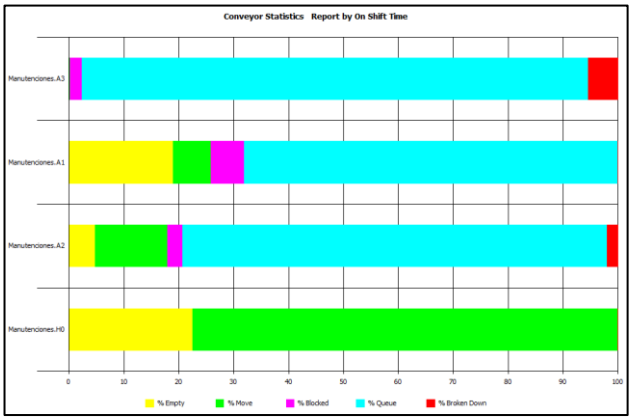

Figura 91. Resultados de las manutenciones del primer experimento.

Las principales medidas llevadas a cabo en la isla CX101 fueron realizadas en las manutenciones ya que éstas poseían un tiempo de ciclo elevado que provocaba tiempos ociosos en los robots. Esto podemos detectarlo observando el elevado *Average Time* de las mismas (véase Tabla 10).

Avg Time sin F3	Avg Time con F3
0.27	0.26
0.15	0.15
0.23	0.21
0.24	0.22

Tabla 10. Comparación de los Average Time con el robot F3 y sin el robot F3.

Para finalizar, observamos las estadísticas del operario de mantenimiento (véase Figura 92):

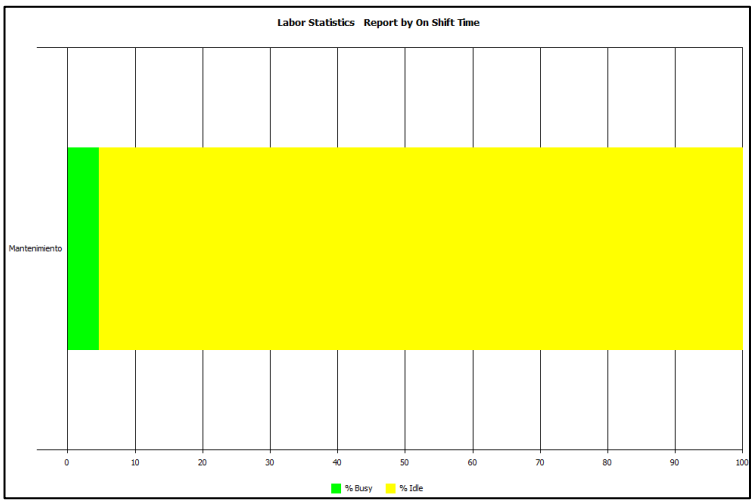

Figura 92. Resultados del porcentaje de ocupación del operario de mantenimiento del primer experimento.

Se observa (en amarillo) un gran porcentaje de tiempo ocioso. En este tiempo el operario de mantenimiento en la realidad no está parado, si no que dicho operario se encarga de distintas islas dentro del taller. Por tanto, un 4,72% de su tiempo lo dedica a la isla CX101, ya sea por mantenimientos preventivos o correctivos.

Cabe destacar también que si comparamos el porcentaje de ocupación del operario de mantenimiento dedicado a la isla antes de la incorporación del robot F3 y después, podemos apreciar un ligero aumento del 4.26 % al 4.72% lo que se traduce en alrededor de unas 300 operaciones más en la isla. Esto claramente nos alerta de que el aumento de la producción lleva consigo una mayor probabilidad de fallo en las máquinas y posibles defectos de fabricación.

7.3.2. Segundo experimento. Simulación con 9 robots hasta agosto de 2016.

El segundo experimento realizado consiste en la simulación durante 11 meses desde el 26 de agosto de 2015 hasta el 31 de julio de 2016 (incluyendo todos los días festivos). Se ha seleccionado este periodo de simulación porque según el calendario laboral de Renault, el 1 de agosto de 2016 comienzan las vacaciones de verano. Para ello se introduce el Robot F3 y los nuevos tiempos de ciclo. El objetivo es prever el comportamiento del sistema, desde la puesta en marcha tras las obras de verano de 2015 hasta finales de julio de 2016 (suponiendo que no se ha

introducido ninguna mejora adicional en la isla durante el paro de Navidad).

El número de días de los que va a constar la simulación es un total de:

$$\begin{aligned} &Nº\ de\ días\ simulados \\ &= 6 + 30 + 31 + 30 + 31 + 31 + 31 + 29 + 31 + 30 + 31 + 30 + 31 \\ &= 341\ días * 24\ \frac{horas}{día} = 8.184\ horas\ simuladas \end{aligned}$$

Para la simulación es necesario cambiar en "*Model/Clock/…*" el día de inicio de la simulación introduciendo el "26/08/2015". Los resultados del número de piezas ensambladas se encuentran en la Figura 93:

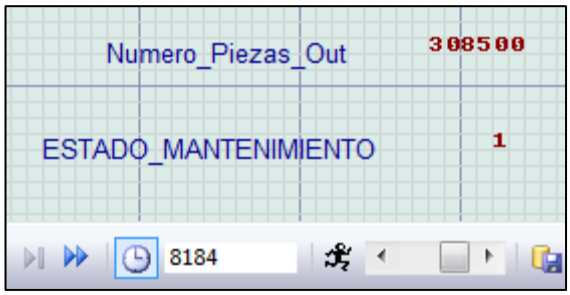

Figura 93. Resultados de la simulación con 9 robots durante 8.184 horas.

Lo primero que se puede observar es que el número de unidades traseras ensambladas en la isla es de 308.500 unidades. Si lo comparamos con las cadencias de producción actuales de Renault, podemos deducir que la mejora en la isla permite hacer frente a la demanda.

Días laborales (Agosto 2015\Julio 2016)

(5+25+26+24+18) días x 1.120 $\frac{vehículos}{día}$ = 109.760 vehículos

(24+25+25+25+24+26+26) días x 1.130 $\frac{\text{vehículos}}{\text{día}}$ = 197.750 vehículos

109.760+197.750=307.510 vehículos < 308.500 unidades

Este objetivo puede variar debido a la producción bajo pedido, pero gracias a este experimento podemos advertir que a largo plazo, el objetivo de producción está garatizado.

Analizando las paradas en la producción (véase Figura 94), se puede prever una disminución de la productividad debido a ciertos elementos del sistema.

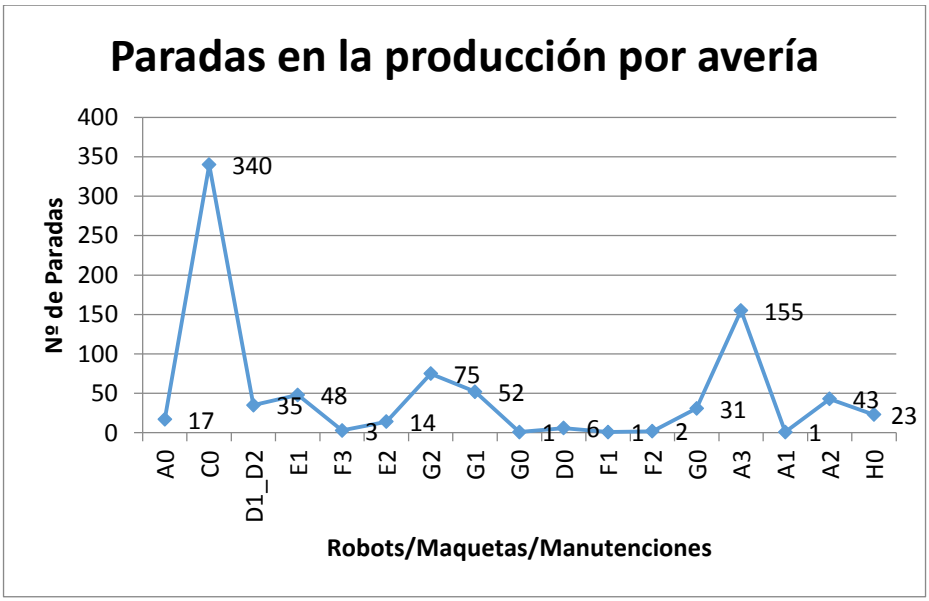

Figura 94. Resultados del número de paradas en la producción durante 8.184 horas simuladas.

Como principal elemento causante de paradas encontramos al robot C0 con 397. También la manutención A3 y los robots G2 y G1 poseen un gran número de paradas. Con esta información se concluye que sobre la isla CX101 se ha de realizar un trabajo de mantenimiento tanto predictivo como preventivo, incidiendo sobre los elementos mencionados anteriormente.

El **mantenimiento preventivo** está planificado en el tiempo y su objetivo es evitar que se produzca la avería. A diferencia del mantenimiento correctivo, no es necesario realizarlo en tiempo de producción y, por tanto, es planificado en tiempos libres de fábrica.

Lo que se pretende con este tipo de mantenimiento es reducir el número de intervenciones correctivas, realizando tareas de revisión periódicas y sustitución de componentes gastados. Es un tipo de

mantenimiento exigente, pues requiere de una disciplina estricta de supervisión y elaboración de un plan preventivo a cumplir por personal especializado. Este tipo de mantenimiento puede que aumente el número de paradas por *setup*, pero se compensaría reduciendo el número de averías, ya que la duración de las paradas de *setup* suelen tener una duración concreta y menor.

El **mantenimiento predictivo,** al igual que el preventivo, consiste en anteponerse a la avería. La diferencia es que se basa en la aplicación de herramientas o técnicas de detección de los diferentes elementos medibles de anticipación al fallo, como por ejemplo el desgaste. Su objetivo es realizar el mantenimiento justo en el momento preciso.

Para poder realizarlo es necesario disponer de tecnología basada en indicadores que sean capaces de medirnos las variables que marquen la intervención a la máquina, así como personal preparado en la interpretación de los datos.

A partir de los mantenimientos anteriores citados, surgió el concepto de 'TPM' Mantenimiento Productivo Total, originario en los años sesenta en Japón con el único fin de conseguir una producción Just in Time (JIT).

Esta técnica se basa en hacer partícipes a todos los integrantes (Total) de la empresa en labores de mantenimiento. Las responsabilidades no recaen exclusivamente en los técnicos de mantenimiento, sino que es responsabilidad de todos, por tanto se consigue un resultado final más participativo y enriquecido. Está ligado al proceso de mejora continua y calidad total, y recoge conceptos del Mantenimiento Basado en el Tiempo (MBT) y en las Condiciones (MBC).

Si nos fijamos en la Tabla 11 podemos deducir que se ha de aplicar un mantenimiento correctivo específico en el robot C0, ya que su porcentaje de tiempo averiado es demasiado elevado respecto a los demás elementos del sistema.

Name	% Idle	% Busy	% Blocked	% Broken Down
Robots.A0_M	52.58	44.92	2.40	0.09
Robots.C0_MS	57.76	38.70	2.47	0.31
Robots.D1_D2_S	60.69	35.25	3.24	0.08
Robots.E1_MS	52.32	44.92	2.31	0.08
Robots.F3_S	73.81	22.12	3.76	0.01
Robots.E2_MS	54.40	42.85	1.85	0.02
Robots.G2_MS	46.72	51.83	0.96	0.12
Robots.G1_MS	59.87	38.01	1.19	0.10
Maquetas.M_B0	95.66	0.41	3.92	0.00
Maquetas.M_D0	94.82	0.41	4.77	0.00
Maquetas.M_F1	95.02	0.41	4.57	0.00
Maquetas.M_F2	93.10	0.41	6.48	0.00
Maquetas.M_G0	96.58	0.41	2.98	0.02

Tabla 11. Resultados de los robots y las maquetas del segundo experimento.

El **mantenimiento correctivo** consiste en reparar la avería una vez se ha producido. Por lo general, cuando se realiza este mantenimiento el proceso de fabricación está parado; por tanto, la producción disminuye y los costes aumentan. Por esta razón, es preciso centrarse en el robot C0 ya que es el que más costes provoca debido a los elevados tiempos de reparación o mantenimiento.

Como en el experimento anterior, también se sigue observando un elevado tiempo ocioso (no produce) del robot F3 incorporado en las obras de verano, por lo que dicho robot se ha introducido para una mejora a largo plazo. También observamos una ocupación elevada del robot G2. Como se ha comentado anteriormente, el elevado tiempo ocioso del robot F3 se puede solucionar aumentando sus puntos de soldadura y elimando así posibles puntos que realicen otros robots que provoquen una disminución de la productividad como por ejemplo el robot G2 (véase Figura 95).

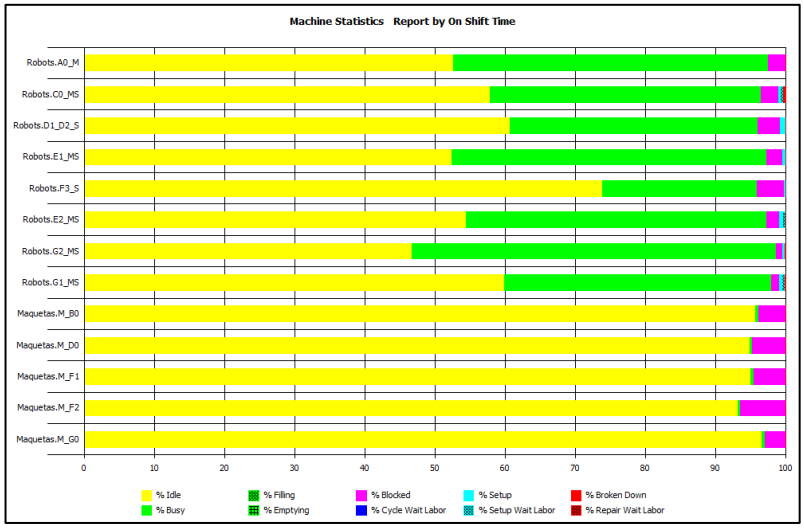

Figura 95. Resultados de los robots y maquetas del segundo experimento.

En la figura anterior, se puede observar además un elevado porcentaje de bloqueo en la maqueta F2. Si nos centramos en ella, y observamos su localización, se advierte que es adyacente al robot G2, que como ya se ha comentado, es el robot con mayor porcentaje de ocupación y, por tanto, genera tiempos de espera de piezas en la ya mencionada maqueta. Se concluye que el robot G2 es el cuello de botella de la isla.

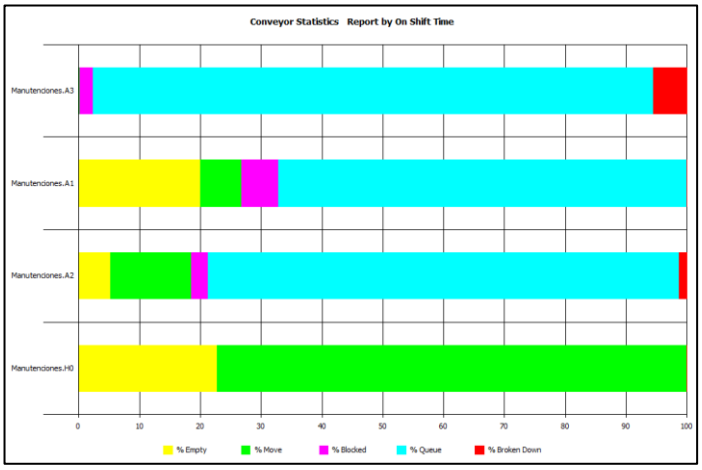

Figura 96. Resultados de las manutenciones del segundo experimento.

Analizando el gráfico de las manutenciones de entrada al modelo (véase Figura 96) se concluye que la manutención A2 provoca tiempos ociosos en la isla debido al elevado porcentaje de tiempo que se

encuentra vacía; esto puede deberse a problemas en islas precedentes a la CX101 donde se ensamblan los largueros. Se puede observar también un elevado porcentaje de averías en la manutención A3, aunque el suministro de materiales a la isla está garantizado.

El operario de mantenimiento aumenta su ocupación en la isla debido al elevado número de paradas que ocurren tanto en el robot C0, como en la manutención A3 (véase Tabla 12).

Name	% Busy	% Idle
Mantenimiento	4.88	95.19

Tabla 12. Resultados del tiempo de ocupación del operario de mantenimiento del segundo experimento.

7.3.3. Tercer experimento. Equilibrado de robots.

El tercer experimento consiste en simular durante los 11 meses aumentando el tiempo de ciclo del robot F3. Es decir, se le adjudican más puntos de soldadura para reducir las operaciones y, por tanto, el tiempo de ciclo de los robots antecesores o predecesores, equilibrando la producción de la isla.

Es importante mencionar que para la llevar a cabo este experimento en la realidad, se debería antes llevar a cabo un estudio de viabilidad para verificar el reajuste de puntos. Esto se debe a posibles problemas con las trayectorias de los robots, por espacio de maniobra o simplemente por riesgo de avería.

Para decidir a qué robots se les elimina puntos de soldadura, nos basamos en las estadísticas del experimento anterior. Como podemos observar en la Figura 95, los robots con mayor porcentaje de ocupación son el G2 de soldadura con pinza al suelo con un 51,83 % y los robots E1 y A0 ambos con un 44,92 %.

Los intervalos de tiempo de un punto de soldadura se estiman entre 0,3 y 0,6 segundos, a los cuales se le añade 2 segundos más para estimar el tiempo que se pierde en mover el el brazo del robot. Una vez estimada la duración de un punto de soldadura (2,5 segundos), se procede a realizar una reestruccturación de los tiempos de ciclo con el objetivo de equilibrar la producción de la isla, aprovechando aquellos

robots que pueden aumentar su rendimiento sin sobrepasar las 80 centésimas de minuto.

Teniendo en cuenta que un robot puede hacer entre unos diez o doce puntos de soldadura y la estimación anterior, obtenemos la siguiente tabla (véase Tabla 13):

$$2.5\ seg\ x\ \frac{1\ min}{60\ seg}\ x\ \frac{100\ cts}{1\ min} = 4.167\ cts$$

ISLA	ROBOT	TIPO ROBOT	TC (cts)	TC (Horas)	Puntos modificados
CX101	A0	M	65	0,010833	0
CX101	C0	MS	56	0,009333	0
CX101	D1	S	51	0,0085	0
CX101	D2	S	48	0,008	0
CX101	E1	MS	60.833	0,010139	-1
CX101	E2	MS	62	0,010333	0
CX101	F3	S	44.5	0,007417	3
CX101	G2	MS	64.166	0,011667	-2
CX101	G1	MS	55	0,009167	0

Tabla 13. Tiempos de ciclo para la primera simulación del tercer experimento.

Para obtener la tabla anterior, se han introducido tres puntos de soldadura en las operaciones del robot F3 que pasa a realizar 10 PSR. Se ha eliminado 1 PSR del robot E1 y 2 del robot G2.

Volvemos a simular durante 8.184 horas y observamos los siguientes resultados (véase Figura 97):

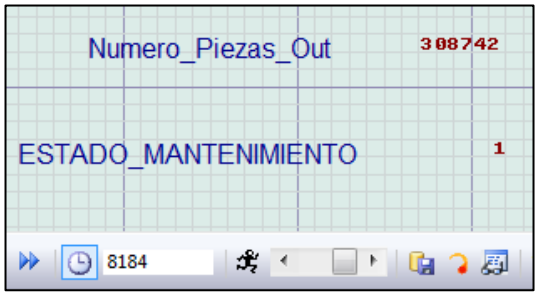

Figura 97. Resultado de la primera simulación del tercer experimento.

El resultado que arroja la primera simulación tras haber aumentado la ocupación del robot F3, es el aumento de la producción, es decir, se

consigue una isla más eficiente, ya que, con los mismos recursos obtenemos resultados mas óptimos.

En la Figura 98 se puede observar que al equilibrar la ocupación de los robots, se reduce el porcentaje de bloqueo (morado) de la maqueta F2, que en la anterior simulación mencionamos.

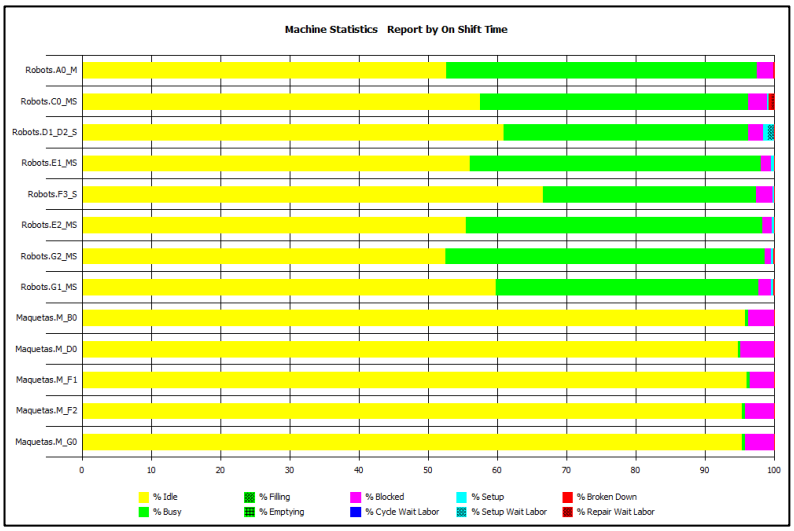

Figura 98. Resultados de los robots y maquetas de la primera simulación del tercer experimento.

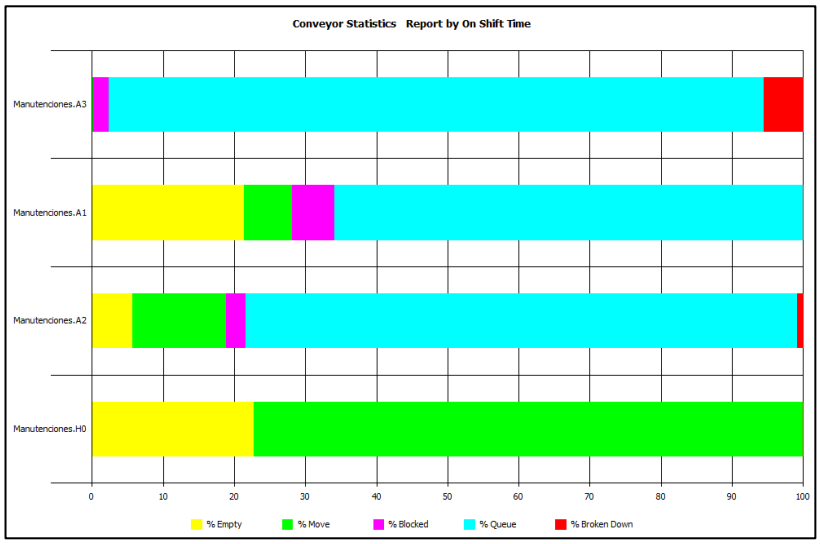

Figura 99. Resultados de las manutenciones de la primera simulación del tercer experimento.

Al no haber introducido ninguna mejora en las manutenciones para esta simulación, lo único que podemos resaltar es que aumenta el porcentaje de ocupación en la manutención de salida H0, lo que es lógico debido a que se ensamblan mayor cantidad de unidades (*veáse* Figura 99*)*.

Además de aumentar la productividad, podemos observar una reducción del porcentaje de ocupación del operario de mantenimiento en un 0.03%, lo que se traduce en alrededor de 15 paradas menos en la producción (véase Tabla 14*)*.

Name	% Busy	% Idle
Mantenimiento	4.86	95.14

Tabla 14. Estadísiticas del operario de mantenimiento de la primera simulación del tercer experimento.

También se ha simulado, aumentado a doce, el número de PSR del robot F3, eliminado otro punto más del robot G2 y suprimiendo uno del robot D1 (véase Tabla 15).

ISLA	ROBOT	TIPO ROBOT	TC (cts)	TC (Horas)	Puntos modificados
CX101	A0	M	65	0,010833	0
CX101	C0	MS	56	0,009333	0
CX101	D1	S	46,833	0,007806	-1
CX101	D2	S	48	0,008	0
CX101	E1	MS	60,833	0,010139	-1
CX101	E2	MS	62	0,010333	0
CX101	F3	S	52,835	0,008806	4
CX101	G2	MS	62,499	0,010417	-2
CX101	G1	MS	55	0,009167	0

Tabla 15.Tiempos de ciclo para la segunda simulación del tercer experimento.

Con los nuevos tiempos de ciclo obtenidos gracias a la nueva reestruccturación de los PSR obtenemos los siguientes resultados (véase Figura 100):

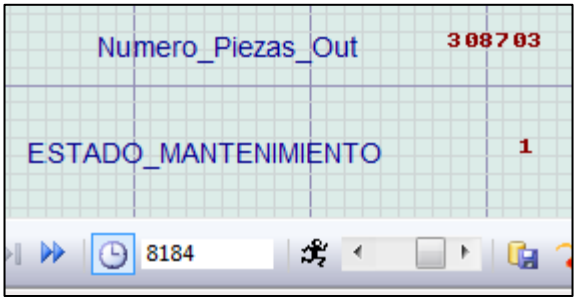

Figura 100. Resultados de la segunda simulación del tercer experimento.

El resultado de esta simulación no mejora la situación anterior, pero sí que aumenta la producción respecto a la situación actual (2º Experimento).

Se lleva a cabo una tercera simulación, con el fin de obtener una productividad mayor que la de la primera simulación de este experimento. El nuevo reajuste se muestra a continuación (véase Tabla 16):

ISLA	ROBOT	TIPO ROBOT	TC (cts)	TC (Horas)	Puntos modificados
CX101	A0	M	65	0,010833	0
CX101	C0	MS	56	0,009333	0
CX101	D1	S	51	0,0085	0
CX101	D2	S	52,167	0,008695	1
CX101	E1	MS	56,666	0,009444	-2
CX101	E2	MS	57,833	0,009639	-1
CX101	F3	S	52,835	0,008806	5
CX101	G2	MS	62,499	0,010417	-3
CX101	G1	MS	55	0,009167	0

Tabla 16. Tiempos de ciclo para la tercera simulación del tercer experimento.

Una vez simulado de nuevo las 8.184 horas, obtenemos los siguientes resultados (véase Figura 101):

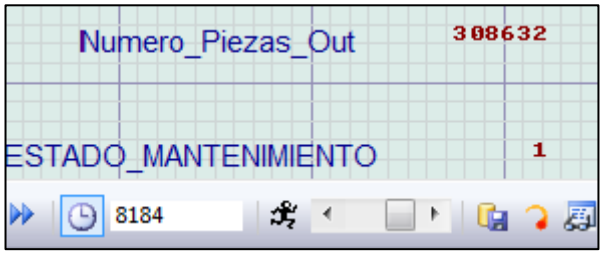

Figura 101. Resultados de la segunda simulación del tercer experimento.

Como se aprecia en la imagen anterior, aumenta la producción en la isla respecto a la disposición actual de los porcentajes de ocupación, lo que proporciona mayor aumento en su capacidad productiva.

Al realizar el equilibrado de los tiempos de ciclo, se aprecia una mínima pero valorable mejora en la actividad del operario de mantenimiento (véase Tabla 17). Al equilibrar la producción de los robots, se consigue un mayor rendimiento de la isla evitando así que algunos de los robots se sobrecarguen de actividad y, por tanto, se reduzcan las intervenciones de mantenimiento.

Name	% Busy	% Idle
Mantenimiento 1 simulación	4.86	95.14
Mantenimiento 2 simulación	4.85	95.15
Mantenimiento 3 simulación	4.84	95.16

Tabla 17. Evolución del porcentaje de ocupación del operario de mantenimiento.

7.3.4. Cuarto experimento. Incorporación de un décimo robot.

Con este experimento lo que se pretende es observar el comportamiento de la isla introduciendo un décimo robot y aumentando la cadencia de producción. Para ello se ha introducido en el modelo un robot a mayores denominado F4, con el fin de conseguir reducir tiempos de ciclo de robots adyacentes.

Suponemos que el nuevo robot será de soldadura embarcada y que realizará 9 puntos de soldadura en paralelo con el robot F3. El *layout* se muestra en la Figura 102.

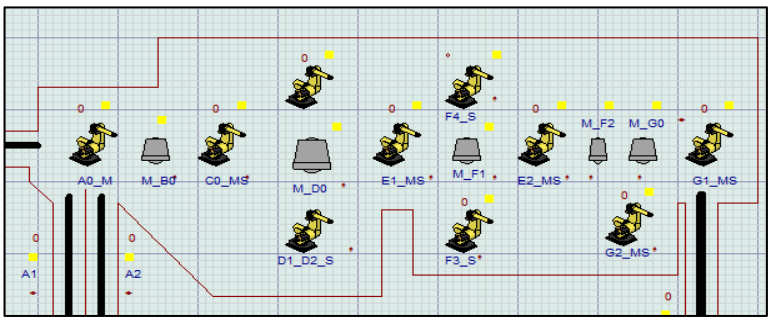

Figura 102. Layout con diez robots.

Al incorporar paralelo el robot F4 al F3, no se ha creado una nueva máquina, sino que se ha estimado el tiempo de ciclo del nuevo robot (que es superior al F3) y se han seguido las mismas directrices que en la definición de los robots D1 y D2.

Para estimar el número de paradas producidas por el robot F4 se ha utilizado la misma distribución que la utilizada para el robot F3, como se puede encontrar en los anexos. Por otra parte, para el cálculo de su tiempo de ciclo, recordamos que se había estimado un punto de soldadura junto a su movimiento de aproximación en 2,5 segundos. A este tiempo se le añade 10 segundos más para cubrir todos los movimientos que lleva a cabo el robot desde que se pone en marcha hasta que recupera su posición inicial.

$$\left(9\ puntos * \ 2{,}5\ \frac{seg}{punto}\right) + 10\ seg = 32.5\ seg = 54{,}16\ Cts$$

Habiendo calculado el tiempo de ciclo del nuevo robot, la modificación de puntos queda de la siguiente manera (véase Tabla 18):

ISLA	ROBOT	TIPO ROBOT	TC (cts)	TC (Horas)	Puntos modificados
CX101	A0	M	65	0,010833	0
CX101	C0	MS	51,833	0,008639	-1
CX101	D1	S	51	0,0085	0
CX101	D2	S	48	0,008	0
CX101	E1	MS	56,666	0,009444	-2
CX101	E2	MS	53,666	0,008944	-2
CX101	F3	S	32	0,005333	0
CX101	F4	S	54,16	0,009027	0
CX101	G2	MS	58,332	0,009722	-3
CX101	G1	MS	55	0,009167	0

Tabla 18. Tiempos de ciclo para el quinto experimento.

Una vez simulado obtenemos que se ensamblan 308.864 unidades (véase Figura 103), es decir, se produce un aumento del 0,11% en el rendimiento de la isla, lo que era de esperar introduciendo un nuevo robot. Un 0,11% de mejora en la productividad puede parece escasa, pero se traduce en más de 300 unidades ensambladas en el mismo periodo de tiempo, considerándose una mejora sustancial.

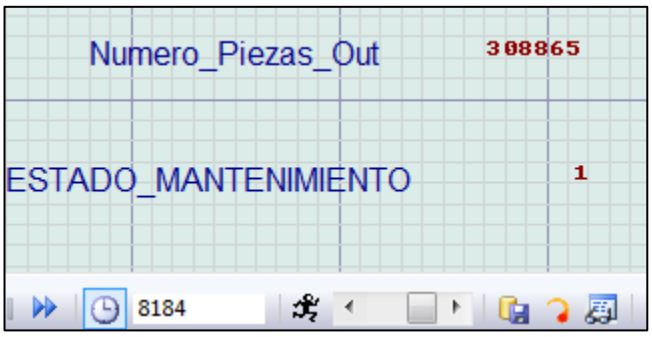

Figura 103. Resultados del quinto esperimento.

Si analizamos las paradas que se producen en la isla durante los 11 meses simulados podemos construir la comparativa de la Figura 104, donde en color naraja se representa el comportamiento de la isla con 9 robots y en color azul con 10. Se deduce que con la incorporación del robot F4 se disminuye el número de las paradas en la producción causadas por los robots; esta diferencia se acentúa en los robots C0 y G2. Sin embargo, el aumento de la cadencia provoca que las manutenciones sean objeto de mayor número de averías.

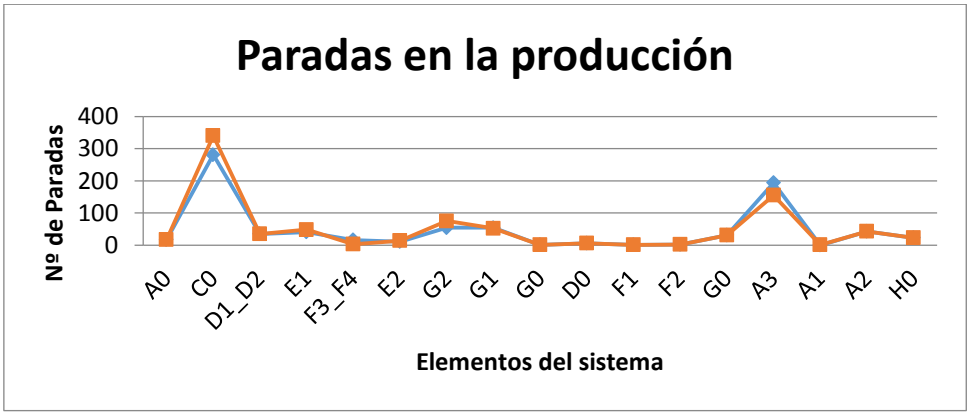

Figura 104. Comparación entre el número de paradas con 9 robots (naranja) y con 10 robots (azul).

Como se ha comentado, todo aumento en la producción conlleva mayor desgaste en las instalaciones, repercutiendo sobre los costes de mantenimiento. En la Tabla 19 se puede apreciar un aumento de hasta el 5% aproximadamente en la ocupación el operario de mantenimiento.

Name	% Busy	% Idle
Mantenimiento con 10 robots	5.01	94.99

Tabla 19. Resultados del porcentaje de ocupación del operario de mantenimiento.

7.3.5. Quinto experimento. Reducción de los TEP.

Lo que se pretende con este experimento es observar el comportamiento de la isla con 9 robots, si simulamos durante 11 meses reduciendo el número de paradas y mejorando el tiempo de reparación y de *setup* de los elementos del sistema.

Suponemos que despúes de haber localizado los elementos con mayor riesgo de avería, se lleva a cabo un mantenimiento preventivo que reduce las averías en un 5 %. Para ello se modifican las distribuciones estadísitcas introducidas en los elemtos con mayor número de paradas.

Los elementos críticos son:

- Robot C0 (0,20% *Broken Down*)
- Robots D1 y D2 (0,10% *Broken Down*)
- Robot G2 (0,10% *Broken Down*)
- Manutención A2 (5,36% *Broken Down*)

Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 105:

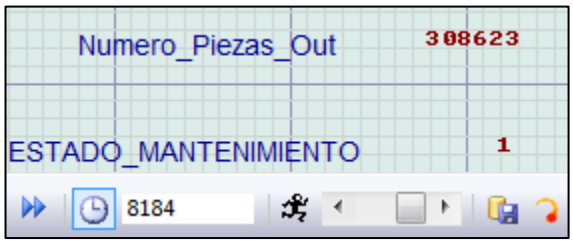

Figura 105. Resultados de la simulación reduciendo los tiempos entre paradas.

Observamos una mejora que proporciona 123 unidades ensambladas a mayores, confirmando que los elementos anteriormente citados provocan pérdidas de productividad sustanciales y deben ser analizados detenidamente sobre el terreno, para localizar los problemas que causan los elevados índices de avería.

Como se muestra en Tabla 20, *Witness* nos proporciona tiempo de ocupación del operario de mantenimiento observando que en este experimento se produce la mayor reducción porcentual de operaciones en el mantenimiento.

Name	% Busy	% Idle
Mantenimiento	4.79	95.26

Tabla 20. Resultados del porcentaje de ocupación del operario de mantenimiento.

Capítulo 8. Estudio Económico.

8.1. Introducción.

La finalidad del proyecto ha sido la elaboración de un modelo de simulación para el estudio de una isla robotizada del Taller de Soldadura de la Factoría Carrocería Montaje de Valladolid, para la compañía Renault España S.A.

Al llevar a cabo un estudio económico del desarrollo de un modelo de simulación, no deben considerarse costes asociados a nuevos equipos ni de locales. Por otro lado, el coste derivado de los materiales y de las horas empleadas en el diseño del modelo, sí se ha de tener en cuenta. Esto se debe a que se considera que la entidad encargada del proyecto consta de los recursos mínimos para construir el modelo de simulación.

A diferencia de otros tipos de proyectos, como pueden ser los eléctricos, mecánicos, etc., este tipo de proyectos no requieren un consumo importante de material ya que se basa en la concepción, desarrollo y ejecución de un paquete de simulación para crear un modelo que imite un proceso productivo industrial real.

A continuación, se expondrán las principales etapas con sus respectivos costes asociados y una breve exposición del personal involucrado.

Para realizar el estudio económico vamos a dividir el proyecto en tres grandes etapas:

- Etapa 1: definición del proyecto.
    - Estudio de la situación actual. Observar detenidamente el funcionamiento de la isla robotizada para comprender a la perfección los procesos que se suceden en la misma.
    - Definición del proyecto. Teniendo en cuenta la situación actual, se establecen los objetivos que se desean alcanzar con el desarrollo del proyecto.

- Etapa 2: preparación del modelo.
    - Formulación del modelo. Se observó el comportamiento del sistema real y del modelo anteriormente creado para después agregar al modelo nuevo nuevas características para observar su funcionamiento.
    - Colección de datos. Fueron proporcionados por Renault España S.A. y mediante cronometraje acumulativo.
- Etapa 3: implantación del modelo y experimentación.
    - Implantación del modelo en *Witness*.
    - Validación del modelo.
    - Introducción de mejoras al modelo y experimentación.
    - Obtención de resultados.

8.2. Costes de elaboración del Proyecto. Estudio económico.

La contabilidad de costes está dividida en los costes asociados a cada actividad realizada hasta obtener el coste del proyecto final. Con esta estructuración, lo que se pretende es analizar la influencia de cada proceso que interviene en el coste final.

Las partidas en las que se ha dividido este sub-apartado son las siguientes:

- Cálculo de horas efectivas anuales y de las tasas por hora de los salarios.
- Cálculo de amortizaciones de los equipos.
- Costes por hora y por trabajador de los materiales consumibles.
- Costes indirectos.
- Horas del personal dedicado a cada una de las partes.

Es importante resaltar que la duración del proyecto es de 5 meses, desde principios de agosto del 2015 hasta finales de diciembre de 2015.

8.2.1. Cálculo de horas efectivas anuales y de las tasas por hora de los salarios.

Este coste se calcula atendiendo a las horas que trabajan a lo largo de la duración del proyecto los profesionales que han intervenido en la elaboración del mismo.

Para el cálculo de los días efectivos, se ha supuesto que los componentes del equipo trabajaban 5 días a la semana durante una jornada de 8 horas, por lo tanto el número de días efectivos queda reflejado de la siguiente forma (véase Tabla 21):

Concepto	Valor
Días efectivos	153
Fin de semana	44
Festivos	10
Otros (Enfermedad, Formación...)	7
Total días	92
Total en horas	736

Tabla 21. Días laborables efectivos.

Una vez obtenidos los días y horas efectivos, calculamos el coste horario, mensual y total de cada uno de los participantes del proyecto (véase Tabla 22).

Concepto	Director	Ing. De Org. Industrial	Auxiliar Administrativo
Sueldo Bruto	45.000,00 €	31.500,00 €	11.780,00 €
Seguridad Social	15.750,00 €	12.775,00 €	4.123,00 €
Coste Anual	60.750,00 €	44.275,00 €	15.903,00 €
Coste Mensual	5.062,50 €	3.689,58 €	1.325,25 €
Coste hora	25,31 €	18,45 €	6,63 €

Tabla 22. Coste horario y mensual del equipo de profesionales.

Para el desarrollo del proyecto, es necesario la figura del Director del Proyecto, que es la persona que tiene la responsabilidad total de la planificación y la ejecución del proyecto y realiza las tareas de supervisión y control, cumplimiento de plazos, presupuestos, etc.

Por debajo se encuentra el Ingeniero de Organización Industrial o Ingeniero Industrial, especializado en la rama de Gestión Industrial. Este ente se encarga de llevar a cabo la construcción del modelo, su programación y su posterior validación.

Por último se encuentra el Auxiliar Administrativo el cual estará encargado de llevar a cabo el desarrollo de la documentación y la generación de informes, con el objetivo de liberar a los ingenieros de temas administrativos.

8.2.2. Cálculo de horas dedicadas a cada fase del proyecto.

Se proporciona una estimación de las horas dedicadas por el personal en cada una de las fases (véase Tabla 23).

Horas dedicadas a cada fase del Proyecto	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
Director del Proyecto	20	40	60
Ingeniero de O.I.	40	80	160
Auxiliar Administrativo	15	20	40
TOTAL	75	140	260
TOTAL ACUMULADO	65	205	465

Tabla 23. Desglose del número de horas dedicadas al proyecto por el personal.

8.2.3. Cálculo de amortización de los equipos de desarrollo.

Corresponde al coste derivado de los equipos en la confección del proyecto (véase Tabla 24).

Concepto	Coste	Cantidad	Coste Total
PC portátil TOSHIBA Intel Core I7	1.038,71 €	1,00 €	1.038,71 €
PC Intel Core PC Intel i7	574,90 €	3,00 €	1.724,70 €
Monitor - HP Pavilion 22xig, IPS, Full HD	149,00 €	3,00 €	447,00 €
Windows 10 Home 64 bits	99,90 €	4,00 €	399,60 €
Microsoft Office 2013	74,99 €	4,00 €	299,96 €
Licencia Witness	3.000,00 €	1,00 €	3.000,00 €
Total Amortizar	6.909,97 €		

Tabla 24. Coste de equipos y software utilizados.

Hay que tener en cuenta que se ha considerado una amortización de los equipos de desarrollo de 5 años. El método de amortización utilizado es "cuota lineal" y valor residual nulo. En la siguiente tabla se puede observar la amortización semanal, diaria y horaria de los equipos (véase Tabla 25).

Tipo	Periodo	Amortización
Anual	5 años	2303,323333
Semanal	260,89	26,48614359
Diaria	1826,25	3,783693361
Horaria	43830	0,15765389

Tabla 25. Amortización de los equipos y software.

8.2.4. Cálculo del coste de material consumible.

El material consumible se refiere a todo material necesario para un trabajo adecuado en una oficina como puede ser papel, cartuchos de impresora, CD`s, carpetas, bolígrafos, etc. Se ha calculado el coste total anual por persona y horario y se refleja a continuación (véase Tabla 26):

Concepto	Coste
Papel	30,00 €
Consumibles de Oficina	18,00 €
CD	20,00 €
Otros (Reprografía, ecuadernaciones, etc.)	150,00 €
Coste total anual por persona	218,00 €
Coste horario por persona	0,30 €

Tabla 26. Coste material consumible.

8.2.5. Cálculo de los costes indirectos.

En este apartado se consideran los gastos referidos a los consumos de energía eléctrica, calefacción, agua, teléfono, etc. Se ha calculado el coste anual por persona y horario reflejado en la Tabla 27.

Concepto	Coste
Alquiler	400 €
Teléfono	150 €
Electricidad	33 €
Agua	15 €
Internet	50 €
Otros	60 €
Coste total anual por persona	708 €
Coste horario por persona	0,961 €

Tabla 27. Costes indirectos.

8.3. Costes asociados a cada fase del proyecto.

Una vez calculados los costes horarios de cada profesional, las horas dedicadas a cada fase del proyecto, los costes asociados a los equipos de desarrollo, las amortizaciones, los costes relativos al material consumible y los costes indirectos, se puede llevar cabo una estimación del coste asociado a cada una de las fases del proyecto.

Primero se muestra el desglose de los costes de la primera fase (véase Tabla 28 *y* Figura 106):

Fase 1					
Concepto		Horas	C.Horario	C.Total	Porcentaje
Personal	Director del Proyecto	20	25,31 €	506,25 €	31,58
	Ingeniero de I.O.	40	18,45 €	737,92 €	46,03
	Auxiliar Administrativo	15	6,63 €	99,39 €	6,20
Equipos de desarrollo	Equipos de desarrollo	50	0,16 €	7,88 €	0,49
Material Consumible	Material Consumible	200	0,30 €	59,24 €	3,70
Costes Indirectos	Costes Indirectos	200	0,96 €	192,39 €	12,00
Coste Total Fase 1	Coste Total Fase 1			1.603,07 €	100,00

Tabla 28. Costes asociados a la fase 1.

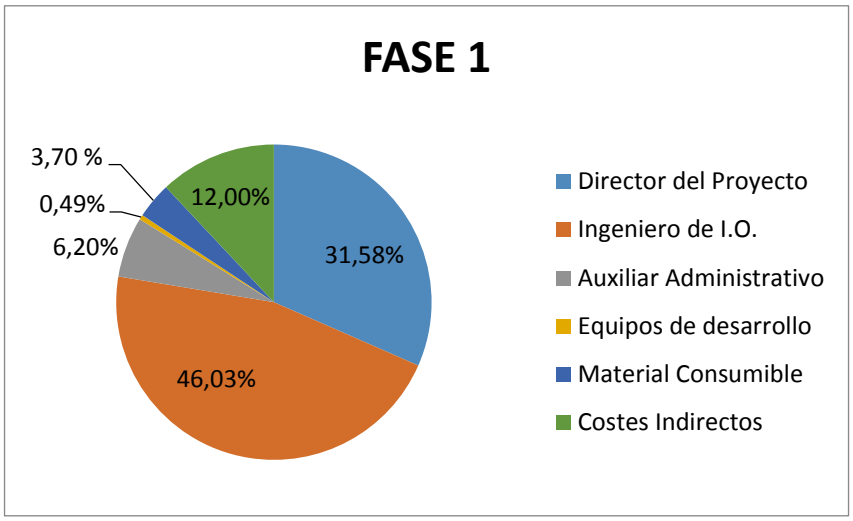

Figura 106. Proporción de loscostes asociados a la Fase 1.

Para la segunda fase, preparación del modelo, véase la Tabla 29 y Figura 107.

Fase 2					
Concepto		Horas	C.Horario	C.Total	
Personal	Director del Proyecto	40	25,31 €	1.012,50 €	37,33
	Ingeniero de I.O.	80	18,45 €	1.475,83 €	54,42
	Auxiliar Administrativo	20	6,63 €	132,53 €	4,89
Equipos de desarrollo		100	0,16 €	15,77 €	0,58
Material Consumible		60	0,30 €	17,77 €	0,66
Costes Indirectos		60	0,96 €	57,72 €	2,13
Coste Total Fase 2				2.712,11 €	100,00

Tabla 29. Costes asociados a la Fase 2.

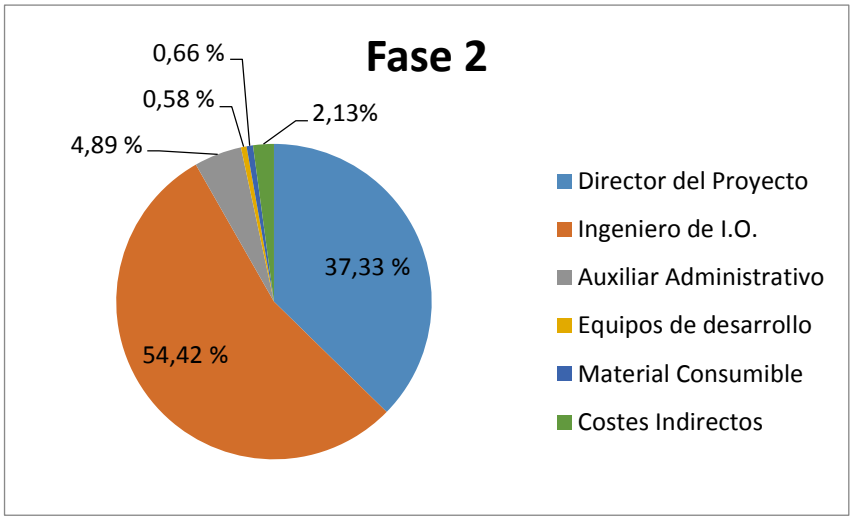

Figura 107. Proporción de los costes asociados a la Fase 2.

Por último, los costes asociados a la fase 3, implantación del modelo, se debe consultar la siguiente tabla (véase Tabla 30 y Figura 108):

Fase 3					
Concepto		Horas	C.Horario	C.Total	
Personal	Director del Proyecto	60	25,31 €	1.518,75 €	31,18
	Ingeniero de I.O.	160	18,45 €	2.951,67 €	60,60
	Auxiliar Administrativo	40	6,63 €	265,05 €	5,44
Equipos de desarrollo		100	0,16 €	15,77 €	0,32
Material Consumible		95	0,30 €	28,14 €	0,58
Costes Indirectos		95	0,96 €	91,39 €	1,88
Coste Total Fase 3				4.870,76 €	100,00

Tabla 30. Costes asociados a la Fase 3.

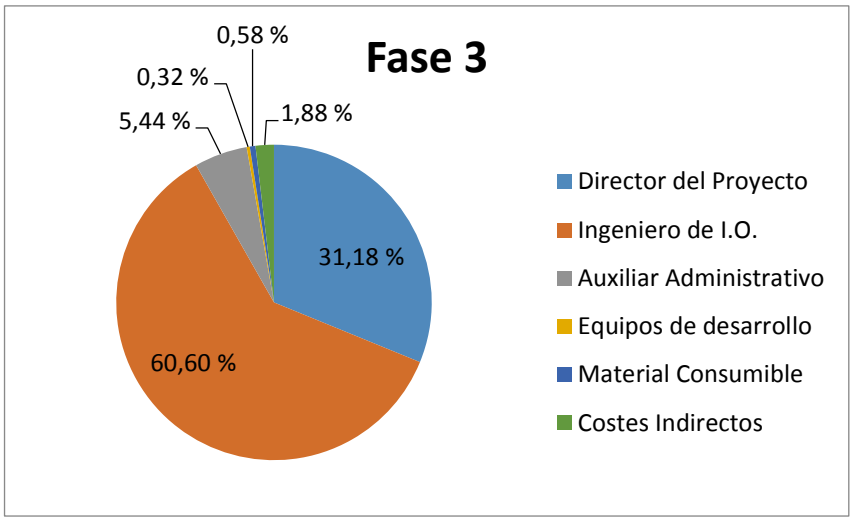

Figura 108. Proporción de los costes asociados a la Fase 3.

8.4. Coste total y estimación del precio de venta.

Para calcular el precio final del proyecto, se suman los costes totales de cada una de las fases. Una vez hecho esto, sobre el coste total para calcular el precio de venta, consideramos un beneficio del 25 % y unos impuestos aplicables del 21%. Por lo que el precio final de venta del proyecto asciende a los 13.893,74 € (véase Tabla 31 y Figura 109).

Concepto	Coste
Fase 1	1.603,07 €
Fase 2	2.712,11 €
Fase 3	4.870,76 €
Coste Final del Proyecto	9.185,94 €
Beneficio (25%)	2.296,49 €
Coste Final + Beneficio	11.482,43 €
Impuestos (21%)	2.411,31 €
Precio de Venta	13.893,74 €

Tabla 31. Desglose del coste total y del precio de venta unitario.

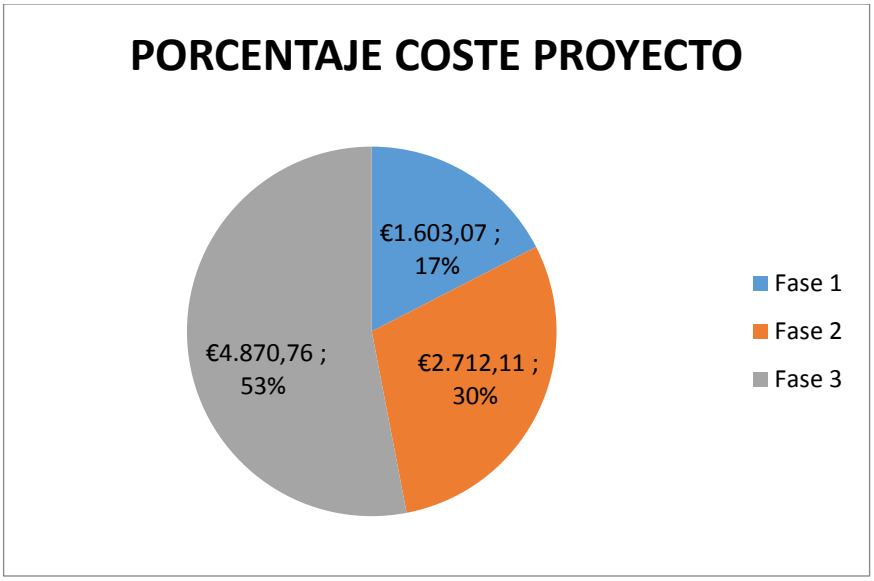

Figura 109. Proporción de los costes asociados al proyecto.

Capítulo 9. Conclusiones y líneas de futuro.

En el presente capítulo se exponen las conclusiones extraídas de la elaboración del proyecto. El objetivo principal consistía en estudiar y analizar la isla robotizada CX101 para poder observar su comportamiento y determinar aspectos mejorables. En los siguientes apartados se comentarán los resultados obtenidos, las zonas potencialmente mejorables y se expondrán una serie de razones por las cuales este sistema puede ser extrapolado a otras zonas del taller.

9.1. Objetivos alcanzados

Una vez finalizado el TFG se concluye que la simulación es una herramienta capaz de localizar las limitaciones de capacidad u obstáculos que disminuyen el flujo, reduciendo el rendimiento del conjunto de la cadena de actividades y se demuestra que puede ser utilizado como un método real para la mejora de la eficiencia de los procesos productivos del Taller de Soldadura de la factoría de Carrocería Montaje de Renault en Valladolid.

Uno de los objetivos principales era conseguir crear un modelo que se asemejara lo más posible a la realidad. Los datos facilitados por Renault y los obtenidos mediante cronometraje se analizaron mediante el programa *Statgraphics,* esto permitió que todas las muestras pudiesen asemejarse a distribuciones estadísticas. Gracias al trabajo realizado se ha conseguido un modelo considerado válido.

Analizando con detenimiento el primer experimento se llega a la conclusión de que el *Witness* es capaz de localizar zonas en la isla que causan una disminución de la eficiencia. Además, se puede observar cómo se va a comportar en un futuro siendo conscientes siempre del grado de exactitud del modelo y de las variaciones estadísticas.

Comparando los resultados obtenidos en la segunda prueba de validación (simulación durante 7 meses sin el robot F3) con los obtenidos en el primer experimento (simulación durante 7 meses con el robot F3), se demuestra en qué lugar de la isla se producen los cuellos de botella y

se justifican las medidas que se llevaron a cabo en las obras de verano para mejorar la eficiencia de la isla.

Las principales medidas que se tomaron estaban destinadas a reducir todos los tiempos de ciclo por debajo de las 80 centésimas de minuto, para ajustarse a la nueva cadencia de producción. En la isla CX101 todos los robots estaban por debajo de las 80 centésimas de minuto, necesarias para obtener el objetivo de producción, aunque se llevó a cabo una reubicación de puntos de soldadura.

Las citadas reubicaciones de puntos de soldadura provocaron que en dos robots, el G2 y el D1, se produjera una disminución del tiempo de ciclo. Podemos llegar a esta conclusión con *Witness* en el primer experimento, observando, en el primer caso, que el robot G2 es el elemento con mayor tiempo de ciclo y que está sobrecargado, provocando tiempos ociosos en robots adyacentes y, como consecuencia, una pérdida de productividad. En el segundo caso, para que hubiese menor diferencia de tiempos entre los robots D1 y D2 paralelos, era conveniente reducir el tiempo de ciclo del robot D1 y así disminuir la diferencia de tiempos que existe entre ambos, con el fin de optimizar el proceso.

Con el segundo experimento, el objetivo principal era observar si la isla es capaz de soportar un aumento en la cadencia de producción. Se ha concluido que en la isla CX101 se puede hacer frente a una cadencia de 1.130 vehículos diarios hasta el paro en la producción en julio de 2016. Se argumenta en que la fabricación de vehículos desde agosto de 2015 hasta el 31 de julio de 2016 se estima en 307.510 vehículos, y con la simulación se ha obtenido un total de unidades traseras ensambladas de 308.500.

Durante el tercer experimento se proponen una serie de medidas con el propósito de equilibrar el flujo de producción mediante la modificación de puntos de soldadura en los robots. Antes de comentar los resultados, debe mencionarse que para la modificación de los puntos de soldadura es necesario llevar a cabo un estudio de trayectorias y verificar la viabilidad de los cambios realizados. Los resultados de esta simulación muestran el comportamiento de la isla en el caso de que los cambios en las operaciones de los robots fuesen validados y llevadas a cabo.

En la primera simulación (3º experimento) se aumentan las operaciones del robot F3, es decir, se incrementa su porcentaje de

ocupación, reduciendo con ello el de robots cuellos de botella como son el G2 o el E1. Los resultados arrojados por el simulador nos proporcionan un aumento del 0,078% en la productividad de la isla, lo que se interpreta en alrededor de 240 unidades ensambladas a mayores.

Tanto en la segunda como en la tercera simulación obtenemos un aumento del 0,066% y 0,043% Por tanto, los resultados obtenidos permiten deducir que equilibrando el flujo de producción, es decir, nivelando los tiempos de ciclo y ocupación de los robots se mejora la eficiencia de la isla, ya que se produce más con los mismos recursos, aumentando así la flexibilidad para adaptarse a la demanda (véase Figura 110).

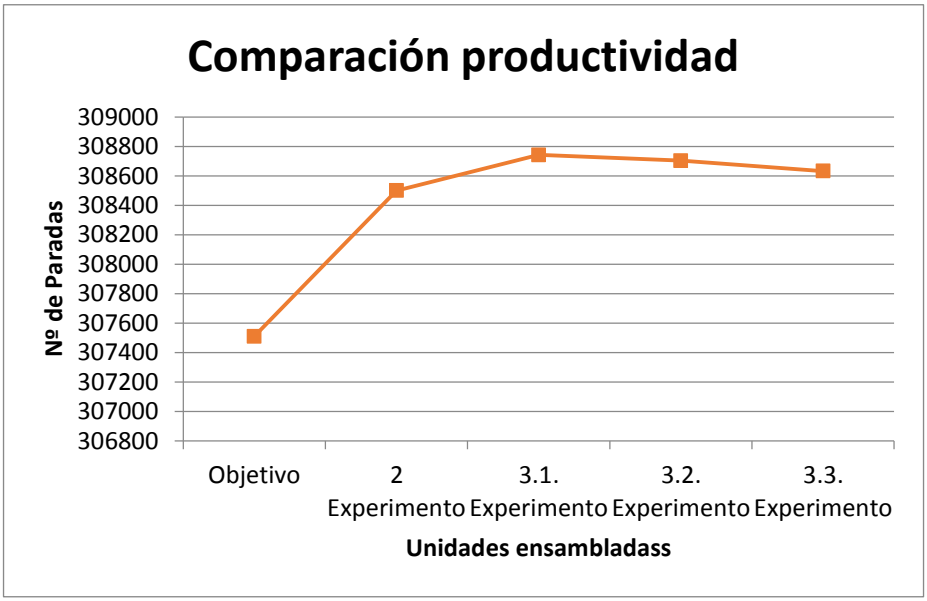

Figura 110. Comparativa de la producción en los diferentes experimentos.

También cabe resaltar del tercer experimento, que al compensar el proceso de producción, el operario de mantenimiento reduce su actividad por lo que deducimos que se producen menos paradas en la producción provocadas por averías.

En cuanto al cuarto experimento, se busca visualizar el comportamiento de la isla si se implantase un hipotético robot denominado F4, que actuase de forma paralela al robot F3 permitiendo eliminar puntos de soldadura del resto de robots. Sería difícil que este caso llegase a convertirse en realidad por el inconveniente que supone el

espacio en la zona, pero sirve de ejemplo para otras islas que tengan superávit de tiempo de ciclo y no consigan producir la cadencia fijada.

Analizando los resultados obtenidos se concluye que existe un aumento de la productividad, aunque se debería estudiar si el beneficio obtenido rentabilizaría la inversión que conlleva la implantación del nuevo robot. Mencionar también que en cuanto a la reubicación de los puntos de soldadura de dicho experimento, se ha buscado el equilibrio de flujo para reducir los tiempos ociosos, disminuir el tiempo de ciclo del cuello de botella y reducir el número de operaciones del robot C0 para que no provoque tan elevado índice de averías.

Por otra parte, el quinto experimento muestra el patrón de funcionamiento de la isla, si aplicamos un mantenimiento preventivo que reduce un 5% el número de paradas de las máquinas críticas. Una vez localizados los elementos clave del proceso, se realizó una serie de modificaciones en su menú de averías para introducir dicha mejora. Los resultados arrojados por el programa suponen un 0,039% de mejora en la producción de la isla y, por tanto, mayores beneficios con una inversión mucho menor que la del anterior experimento.

Es importante resaltar que la simulación permite un proceso de mejora continua, generando que el sistema sea cada vez más eficiente y rentable. Esto es de gran trascendencia debido a que cualquier pequeña inversión destinada a llevar cabo una mejora, puede reducir considerablemente los costes en recursos y en personal.

Finalmente, se puede destacar que los objetivos alcanzados son satisfactorios, ya que el programa es capaz de mostrarnos el comportamiento de la isla ante diferentes situaciones modificando los parámetros de entrada. También queda demostrado que nos permite localizar elementos críticos que ralentizan el proceso productivo y por tanto, incurren en una menor productividad y mayores gastos de operación (dinero utilizado para transformar la materia prima en productos finales).

9.2. Líneas de futuro.

En este apartado se presenta el trabajo futuro que se podría realizar y posibles aspectos de mejora del modelo.

Este trabajo puede servir de modelo para realizar un estudio exhaustivo de todas y cada una de las islas del taller de soldadura, lo que proporcionaría una mayor exactitud a la hora de valorar los resultados.

Si se llevase a cabo una modelización, similar a la que se ha realizado en este trabajo, con todas las islas del taller de soldadura y se enlazaran sus procesos de producción, se podría analizar con exactitud la localización de los puntos críticos que pueden ser susceptibles de mejora. Gracias a las estadísticas que nos proporciona *Witness* se podría apreciar un exhaustivo comportamiento del taller, elemento por elemento, y reducir tiempo a la hora de llevar a cabo modificaciones.

Además, el simulador cuenta con multitud de elementos para poder modelizar cualquier tipo de zona de la factoría, ya fuesen líneas de monaje del vehículo, el proceso de pintura, embutición, etc.

Igualmente, si se contase con un mayor número de datos, se podría llevar a cabo un tratamiento más profundo de los mísmos para que los parámetros introducidos en el modelo fueran aún más exactos. Asimismo, en el programa se podría introducir valoraciones económicas que no se han llevado a cabo por desconocimiento de datos económicos (debido a la confidencialidad de Renault).

En cuanto al modelo, cabe destacar que todo puede ser mejorable. Se podría llevar a cabo una mejora de la representación para asemejarlo con mayor exactitud a la realidad, e incluso centrarse en obtener un modelo 3D para que fuese más visual.

Bibliografía

Barrientos , A. (2012). *Fundamentos de robótica.* Madrid: MacGraw-Hill.

Benito Martín, J., & Sanz Angulo, P. (2014). *Manual básico de Witness.* Univerisdad de Valladolid.

Benito Martín, J., & Sanz Angulo, P. (2014). *Simulación y evaluación de procesos.* Universidad de Valladolid.

Forte, J. F. (2005). *Guía práctica para la simulación de procesos industriales.* Centro Tecnológico del Mueble y la Madera de la Región de Murcia.

García Sánchez, A., Ortega Mier, M., & Izquierdo Delgado, D. (2012). *Elementos de Simulación, "Un enfoque práctico con Witness".* Universidad Politécnica de Madrid.

Gutierrez, J. L. (s.f.). Soldadura . *Metal Actual*, 18-24.

Himmelblau, D. (1992). *Análisis y simulación de procesos.* Barcelona: Reverté .

Jeffus, L., & Piquer Caballero, J. (2008). *Manual de soldadura GTAW (TIG).* Madrid: Paraninfo.

Jeffus, L., & Piquer Caballero, J. (2009). *Soldadura: principios y aplicaciones.* Madrid: Paraninfo.

Ortega , M., & García Sánchez, Á. (2006). *Simulación de sistemas discretos.* Univerisdad Politécnica de Madrid.

Ortega , M., & García Sánchez, Á. (2010). *Primeros pasos con Witness.* Universidad Politécnica de Madrid.

Ortega , M., & García Sánchez, Á. (2012). *Elementos de simulación.* Universidad Politécnica de Madrid.

Pazos, J., Suárez, A., & Díaz, R. (2008). *Teoría de colas y simulación de eventos discretos.* Pearson Prentice Hall (Madrid).

Walton, D. (2008). *Witness testimony evidence : argumentation, artificial intelligence, and law .* Cambridge University Press.

Referencias Web

Las URL se han acortado gracias a la herramienta de Google: **URL Shortener**.

Partida, Á. (25 de Marzo de 2014). *Mantenimiento & Mentoring Industrial*. Disponible en http://goo.gl/89yk5u . Última visita el 28 de Enero de 2016.

Unión, A. E. (2007). *www.iesremedios.es.* Disponible en http://goo.gl/p6KeUL. Última visita el 28 de Enero de 2016.

Villanueva, V. (12 de Octubre de 2012). *Blog Logística y Producción*. Disponible en http://goo.gl/jrtXsp. Última visita el 28 de Enero de 2016.

Mitshubishi Electric. *www.mx.mitsubishielectric.com.* Disponible en https://goo.gl/5FiaoT. Última visita el 28 de Enero de 2016.

Grupo Renault. Disponible en https://goo.gl/EdAxFk. Última visita el 28 de Enero de 2016.

ABB. Disponible en http://goo.gl/nTpz. Última visita el 28 de Enero de 2016.

Lanner. Dsiponible en http://goo.gl/5G3QTV. Última visita el 28 de Enero de 2016.

Soldadura.org. Disponible en http://goo.gl/SJxYB7. Última visita el 28 de Enero de 2016.

I.E.S. Cristobal Monroy "Departamento de tecnología". *Procesos de unión: Soldadura.* Disponible en https://goo.gl/mM93pm. Última visita el 28 de Enero de 2016.

Anexos

Datos de partida.

Los datos arrojados por el SMP99 en los cuales aparecen la duración (en minutos), fecha, causa y localización de todos y cada uno de los parones en la producción que se han producido en la Isla CX101 desde enero hasta octubre de 2015, se encuentran en los CDs adjuntos al TFG, ante la imposibilidad de reflejarlos en el presente documento por la dimensión de los mísmos, ya que resultarían ilegibles.

Tiempos entre paradas, duración de las averías y tiempos de llegada.

En los siguientes anexos se muestran todas y cada una de las aproximaciones llevadas a cabo mediante el software *Statgraphics*. Se ha denominado con las siglas "TEP" al Tiempo entre paradas de los elementos del sistema, "DUR" a la duración de las mismas a lo largo de la simulación y "TdLL" a los tiempos de llegada de los *parts*.

Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - TEP A3

- Datos/Variable: TEP A3
- 165 valores con rango desde 0,02 a 265,98
- Distribución Ajustada: **Weibull**
    - Forma=0.612403
    - Escala = 20,939

Este análisis muestra los resultados de ajustar una distribución Weibull a los datos de TEP A3. Los parámetros estimados para la distribución ajustada se muestran arriba.

Pruebas de Bondad-de-Ajuste para TEP A3

Prueba de Kolmogorov-Smirnov (véase Tabla 32):

	Weibull
DMAS	0,0512241
DMENOS	0,0449387
DN	0,0512241
Valor-P	0,779541

Tabla 32. Prueba de Kolgomorov-Smirnov para TEP A3.

Esta ventana muestra los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si TEP A3 puede modelarse adecuadamente con una distribución Weibull.

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que TEP A3 proviene de una distribución Weibull con 95% de confianza.

Comparación de Distribuciones Alternas

En este apartado se comparan diferentes distribuciones estadísiticas calculando el logaritmo de verosimilitud, para observer cuál es la que más se asemeja a los datos introducidos (véase Tabla 33).

Distribución	*Parámetros Est.*	*Log Verosimilitud*	*KS D*
Weibull	2	-688,829	0,0512241
Gamma	2	-691,668	0,0843577
Lognormal	2	-692,608	0,0774588
Loglogística	2	-695,926	0,0715271
Birnbaum-Saunders	2	-699,59	0,154124
Exponencial	1	-730,377	0,226959
Gaussiana Inversa	2	-751,17	0,313395
Valor Extremo Más Grande	2	-807,225	0,195475
Laplace	2	-825,592	0,334169
Logística	2	-846,816	0,271899
Normal	2	-869,576	0,260956
Uniforme	2	-921,252	0,627662
Valor Extremo Más Chico	2	-933,897	0,357543
Pareto	1	-1,E9	0,204885

Tabla 33. Comparación entre distribuciones para TEP A3.

De acuerdo con el estadístico log verosimilitud, la distribución de mejor ajuste es la distribución Weibull. Esta es la distribución actualmente seleccionada (véase Figura 111).

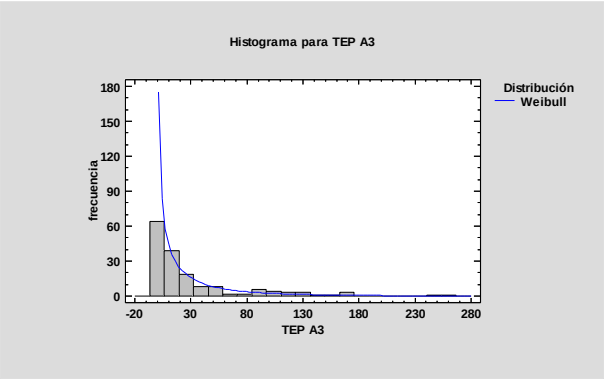

Figura 111. Distribución asociada a TEP A3.

Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - DUR A3

- Datos/Variable: DUR A3
- 166 valores con rango desde 0,00558333 a 1,63362
- Distribución Ajustada: **Lognormal.**
    - Media= 0.059468
    - Desviación estándar= 0.0550627

Este análisis muestra los resultados de ajustar una distribución lognormal a los datos de DUR A3. Los parámetros estimados para la distribución ajustada se muestran arriba.

Pruebas de Bondad-de-Ajuste para DUR A3

Prueba de Kolmogorov-Smirnov (véase Tabla 34).

	Lognormal
DMAS	0,054467
DMENOS	0,0614983
DN	0,0614983
Valor-P	0,556638

Tabla 34. Prueba de Kolgomorov-Smirnov para DUR A3.

Esta ventana muestra los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si DUR A3 puede modelarse adecuadamente con una distribución lognormal.

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que DUR A3 proviene de una distribución lognormal con 95% de confianza.

Comparación de Distribuciones Alternas

En este apartado se comparan diferentes distribuciones estadísiticas calculando el logaritmo de verosimilitud, para observer cuál es la que mas se asemeja a los datos introducidos (véase Tabla 35).

Distribución	*Parámetros Est.*	*Log Verosimilitud*	*KS D*
Loglogística	2	329,168	0,0463827
Lognormal	2	324,64	0,0614983
Gaussiana Inversa	2	317,569	0,0803994
Birnbaum-Saunders	2	311,219	0,10414
Gamma	2	291,172	0,136503
Weibull	2	286,474	0,166122
Exponencial	1	286,47	0,167841
Valor Extremo Más Grande	2	271,385	0,14511
Laplace	2	256,239	0,205178
Normal	2	102,159	0,323901
Uniforme	2	-80,9039	0,863342
Logística	2	-668,59	0,499365
Pareto	1	-4,97E11	1,16966
Valor Extremo Más Chico	<sin ajuste>		

Tabla 35. Comparación entre distribuciones para DUR A3.

De acuerdo con el estadístico log verosimilitud, la distribución de mejor ajuste es la distribución Loglogística, aunque se ha introducido una Lognormal debido a que Witness carece de una distribución Loglogística (véase Figura 112).

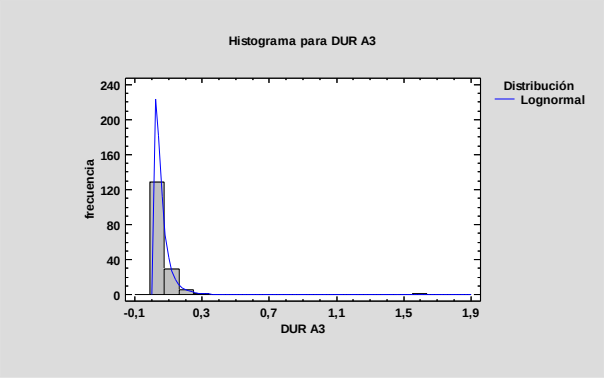

Figura 112. Distribución asociada a DUR A3.

Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - TEP A2

- Datos/Variable: TEP A2
- 22 valores con rango desde 0,04 a 2136,78
- Distribución Ajustada: **Weibull.**
    - Forma= 0.392097.

- Escala= 84.2685

Este análisis muestra los resultados de ajustar una distribución Weibull a los datos de TEP A2. Los parámetros estimados para la distribución ajustada se muestran arriba.

Pruebas de Bondad-de-Ajuste para TEP A2

Prueba de Kolmogorov-Smirnov (véase Tabla 36).

	Weibull
DMAS	0,112749
DMENOS	0,0747274
DN	0,112749
Valor-P	0,942457

Tabla 36. Prueba de Kolgomoroz-Smirnov para TEP A2.

Esta ventana muestra los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si TEP A2 puede modelarse adecuadamente con una distribución Weibull.

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que TEP A2 proviene de una distribución Weibull con 95% de confianza.

Comparación de Distribuciones Alternas

En este apartado se comparan diferentes distribuciones estadísiticas calculando el logaritmo de verosimilitud, para observer cuál es la que mas se asemeja a los datos introducidos (véase Tabla 37).

Distribución	*Parámetros Est.*	*Log Verosimilitud*	*KS D*
Weibull	2	-120,598	0,112749
Gamma	2	-121,032	0,128865
Lognormal	2	-121,248	0,123608
Loglogística	2	-121,839	0,11167
Gaussiana Inversa	2	-138,282	0,472492
Exponencial	1	-144,335	0,441942
Valor Extremo Más Grande	2	-157,983	0,319827
Laplace	2	-159,12	0,432627
Logística	2	-163,892	0,329667
Normal	2	-167,906	0,310335
Uniforme	2	-168,675	0,673632
Valor Extremo Más Chico	2	-176,37	0,377043
Pareto	1	-1,E9	0,23611
Birnbaum-Saunders	<sin ajuste>		

Tabla 37. Comparación entre distribuciones para TEP A2.

De acuerdo con el estadístico log verosimilitud, la distribución de mejor ajuste es la distribución Weibull (véase Figura 113).

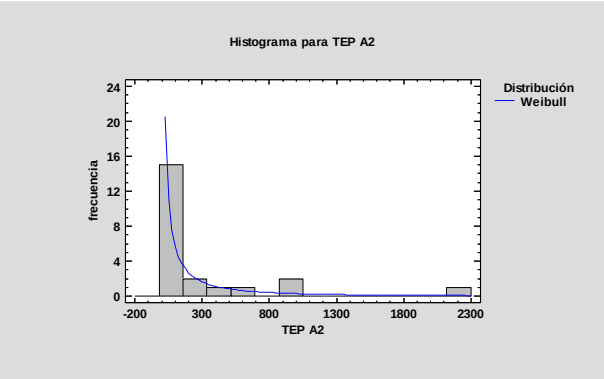

Figura 113. Distribución asociada a TEP A2.

Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - DUR A2

- Datos/Variable: DUR A2
- 23 valores con rango desde 0,0171333 a 0,371
- Distribución Ajustada: **Lognormal.**
    - Media= 0.086574
    - Desviación estándar= 0.092985

Este análisis muestra los resultados de ajustar una distribución lognormal a los datos de DUR A2. Los parámetros estimados para la distribución ajustada se muestran arriba.

Pruebas de Bondad-de-Ajuste para DUR A2

Prueba de Kolmogorov-Smirnov (véase Tabla 38):

	Lognormal
DMAS	0,192395
DMENOS	0,110261
DN	0,192395
Valor-P	0,365475

Tabla 38.Prueba de Kolgomorov-Smirnov para DUR A2.

Esta ventana muestra los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si DUR A2 puede modelarse adecuadamente con una distribución lognormal.

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que DUR A2 proviene de una distribución lognormal con 95% de confianza.

Comparación de Distribuciones Alternas

En este apartado se comparan diferentes distribuciones estadísiticas calculando el logaritmo de verosimilitud, para observer cuál es la que mas se asemeja a los datos introducidos (véase Tabla 39).

Distribución	*Parámetros Est.*	*Log Verosimilitud*	*KS D*
Gaussiana Inversa	2	36,9611	0,204142
Birnbaum-Saunders	2	36,1963	0,230402
Lognormal	2	36,0104	0,192395
Loglogística	2	35,9119	0,139871
Gamma	2	32,5362	0,249293
Weibull	2	32,1693	0,229235
Exponencial	1	32,1019	0,211822
Valor Extremo Más Grande	2	27,8983	0,273036
Laplace	2	26,156	0,298989
Uniforme	2	23,8932	0,573808
Logística	2	22,1497	0,2551
Normal	2	19,9052	0,312221
Valor Extremo Más Chico	2	13,3365	0,307717
Pareto	1	-4,97E11	1,0

Tabla 39. Comparación entre distribuciones para DUR A2..

Esta tabla compara la bondad de ajuste cuando varias distribuciones se ajustan a DUR A2.

De acuerdo con el estadístico log verosimilitud, la distribución de mejor ajuste es la distribución Gaussiana Inversa, aunque se ha introducido una Lognormal debido a que Witness carece de una distribución Gaussiana Inversa (véase Figura 114).

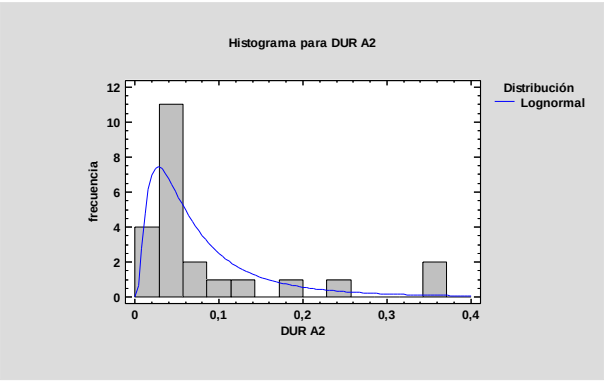

Figura 114. Distribución asociada a DUR A2.

Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - TEP A0

- Datos/Variable: TEP A0
- 26 valores con rango desde 0,09 a 976,09

- Distribuciones Ajustada :**Weibull**
  - Forma= 0.470482.
  - Escala= 109.007

Este análisis muestra los resultados de ajustar una distribución Weibull a los datos de TEP A0. Los parámetros estimados para la distribución ajustada se muestran arriba.

Pruebas de Bondad-de-Ajuste para TEP A0

Prueba de Kolmogorov-Smirnov (véase Tabla 40)

	Weibull
DMAS	0,120444
DMENOS	0,0803754
DN	0,120444
Valor-P	0,845018

Tabla 40. Prueba de Kolgomorov-Smirnov para TEP A0.

Esta ventana muestra los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si TEP A0 puede modelarse adecuadamente con una distribución Weibull.

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que TEP A0 proviene de una distribución Weibull con 95% de confianza.

Comparación de Distribuciones Alternas

En este apartado se comparan diferentes distribuciones estadísiticas calculando el logaritmo de verosimilitud, para observer cuál es la que mas se asemeja a los datos introducidos (véase Tabla 41)

Distribución	*Parámetros Est.*	*Log Verosimilitud*	*KS D*
Gamma	2	-150,145	0,142948
Weibull	2	-150,383	0,120444
Birnbaum-Saunders	2	-150,472	0,234364
Lognormal	2	-151,737	0,121445
Loglogística	2	-152,437	0,110121
Exponencial	1	-166,058	0,386688
Gaussiana Inversa	2	-167,611	0,470865
Uniforme	2	-178,97	0,539225
Valor Extremo Más Grande	2	-179,681	0,263984
Laplace	2	-182,813	0,370892
Logística	2	-185,674	0,283359
Normal	2	-186,64	0,282963
Valor Extremo Más Chico	2	-192,515	0,296528
Pareto	1	-1,E9	0,235464

Tabla 41. Comparación entre distribuciones para TEP A0.

Esta tabla compara la bondad de ajuste cuando varias distribuciones se ajustan a TEP A0.

De acuerdo con el estadístico log verosimilitud, la distribución de mejor ajuste es la distribución Gamma, aunque se ha introducido una Weibull ya que existe muy poca variación en la similitud (véase Figura 115).

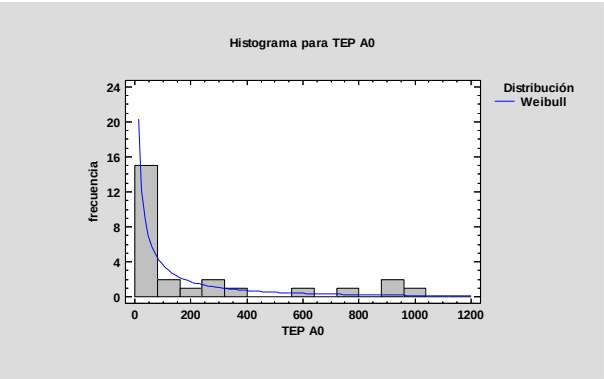

Figura 115. Distribución asociada a TEP A0.

Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - DUR A0

- Datos/Variable: DUR A0
- 27 valores con rango desde 0,0245 a 1,71622
- Distribución Ajustada: **Lognormal.**
  - Media= 0,327577.
  - Desviación estándar=0,519036.

Este análisis muestra los resultados de ajustar una distribución lognormal a los datos de DUR A0. Los parámetros estimados para la distribución ajustada se muestran arriba.

Pruebas de Bondad-de-Ajuste para DUR A0

Prueba de Kolmogorov-Smirnov (véase Tabla 42).

	Lognormal
DMAS	0,194227
DMENOS	0,106063
DN	0,194227
Valor-P	0,261101

Tabla 42. Prueba de Kolgomorov-Smirnov para DUR A0.

Esta ventana muestra los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si DUR A0 puede modelarse adecuadamente con una distribución lognormal.

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que DUR A0 proviene de una distribución lognormal con 95% de confianza.

Comparación de Distribuciones Alternas

En este apartado se comparan diferentes distribuciones estadísiticas calculando el logaritmo de verosimilitud, para observer cuál es la que mas se asemeja a los datos introducidos (véase Tabla 43)

Distribución	*Parámetros Est.*	*Log Verosimilitud*	*KS D*
Gaussiana Inversa	2	7,68575	0,192165
Birnbaum-Saunders	2	6,43415	0,246564
Lognormal	2	6,19978	0,194227
Loglogística	2	6,12787	0,141499
Weibull	2	2,05668	0,238819
Gamma	2	1,45006	0,272766
Exponencial	1	1,16963	0,304394
Valor Extremo Más Grande	2	-9,02765	0,319782
Laplace	2	-10,3838	0,317688
Uniforme	2	-14,1951	0,614212
Logística	2	-16,2526	0,28107
Normal	2	-19,0951	0,33884
Valor Extremo Más Chico	2	-26,8442	0,32989
Pareto	1	-4,97E11	1,36304

Tabla 43. Comparación entre distribuciones para DUR A0.

Esta tabla compara la bondad de ajuste cuando varias distribuciones se ajustan a DUR A0. Pueden seleccionarse otras distribuciones usando las Opciones de Ventana.

De acuerdo con el estadístico log verosimilitud, la distribución de mejor ajuste es la distribución Gaussiana Inversa aunque se ha utilizado la Lognormal debido a que el Witness no dispone de la Gaussiana Inversa (véase Figura 116).

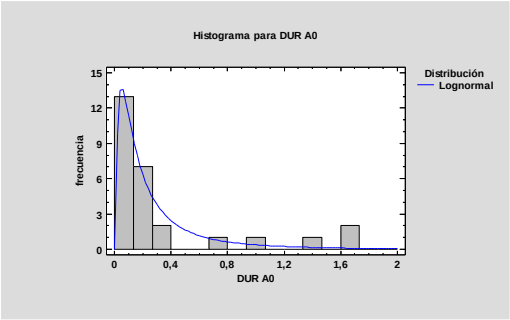

Figura 116. Distribución asociada a DUR A0.

Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - TEP B0

- Datos/Variable: TEP B0
- 27 valores con rango desde 0,13 a 1174,85
- Distribución Ajustada: **Weibull.**
    - Forma= 0,752672.
    - Escala= 234,589

Este análisis muestra los resultados de ajustar una distribución Weibull a los datos de TEP B0. Los parámetros estimados para la distribución ajustada se muestran arriba.

Pruebas de Bondad-de-Ajuste para TEP B0

Prueba de Kolmogorov-Smirnov (véase Tabla 44):

	Weibull
DMAS	0,0714568
DMENOS	0,14171
DN	0,14171
Valor-P	0,650179

Tabla 44. Prueba de Kolgomorov-Smirnov para TEP B0.

Esta ventana muestra los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si TEP B0 puede modelarse adecuadamente con una distribución Weibull.

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que TEP B0 proviene de una distribución Weibull con 95% de confianza.

Comparación de Distribuciones Alternas

En este apartado se comparan diferentes distribuciones estadísiticas calculando el logaritmo de verosimilitud, para observer cuál es la que mas se asemeja a los datos introducidos (véase Tabla 45)

Distribución	*Parámetros Est.*	*Log Verosimilitud*	*KS D*
Gamma	2	-175,814	0,137899
Weibull	2	-176,426	0,14171
Exponencial	1	-178,21	0,147052
Loglogística	2	-180,123	0,130351
Lognormal	2	-181,429	0,166161
Birnbaum-Saunders	2	-185,463	0,362465
Valor Extremo Más Grande	2	-185,703	0,151128
Logística	2	-189,743	0,177522
Normal	2	-190,391	0,171038
Laplace	2	-190,688	0,230035
Uniforme	2	-190,857	0,418235
Valor Extremo Más Chico	2	-197,351	0,261006
Gaussiana Inversa	2	-209,434	0,567373
Pareto	1	-1,E9	0,33212

Tabla 45. Comparación entre distribuciones para TEP B0.

Esta tabla compara la bondad de ajuste cuando varias distribuciones se ajustan a TEP B0.

De acuerdo con el estadístico log verosimilitud, la distribución de mejor ajuste es la distribución Gamma aunque se ha utilizado la Weibull ya que existe muy poca diferencia en la similitud (véase Figura 117).

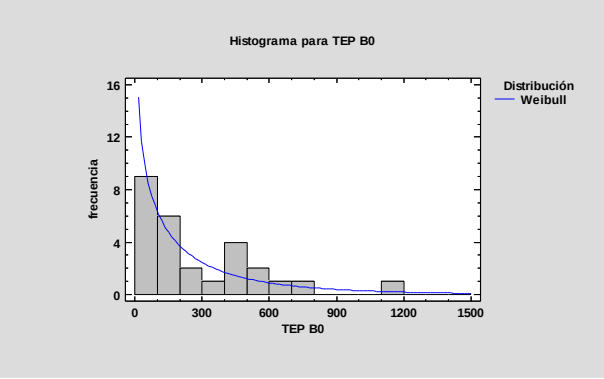

Figura 117. Distribución asociada a TEP B0.

Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - DUR B0

- Datos/Variable: DUR B0
- 28 valores con rango desde 0,02395 a 0,259083
- Distribución Ajustada: **Lognormal.**
  - Media= 0,0907283.
  - Desviación estándar= 0,0628831.

Este análisis muestra los resultados de ajustar una distribución lognormal a los datos de DUR B0. Los parámetros estimados para la distribución ajustada se muestran arriba.

Pruebas de Bondad-de-Ajuste para DUR B0

Prueba de Kolmogorov-Smirnov (véase Tabla 46)

	Lognormal
DMAS	0,0950835
DMENOS	0,124311
DN	0,124311
Valor-P	0,779843

Tabla 46. Prueba de Kolgomorov-Smirnov para DUR B0.

Esta ventana muestra los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si DUR B0 puede modelarse adecuadamente con una distribución lognormal.

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que DUR B0 proviene de una distribución lognormal con 95% de confianza.

Comparación de Distribuciones Alternas

En este apartado se comparan diferentes distribuciones estadísiticas calculando el logaritmo de verosimilitud, para observer cuál es la que mas se asemeja a los datos introducidos (véase Tabla 47)

Distribución	*Parámetros Est.*	*Log Verosimilitud*	*KS D*
Birnbaum-Saunders	2	46,8512	0,127115
Gaussiana Inversa	2	46,7787	0,13377
Lognormal	2	46,559	0,124311
Gamma	2	46,2061	0,102748
Loglogística	2	45,8161	0,110158
Valor Extremo Más Grande	2	45,4403	0,110855
Weibull	2	45,3589	0,115151
Laplace	2	42,1259	0,161826
Logística	2	42,1053	0,129185
Normal	2	41,3931	0,162019
Uniforme	2	40,5329	0,391946
Exponencial	1	39,5658	0,239598
Valor Extremo Más Chico	2	34,762	0,216668
Pareto	1	-4,97E11	1,0

Tabla 47. Comparación entre distribuciones para DUR B0.

Esta tabla compara la bondad de ajuste cuando varias distribuciones se ajustan a DUR B0.

De acuerdo con el estadístico log verosimilitud, la distribución de mejor ajuste es la distribución Birnbaum-Saunders aunque se ha utilizado la Lognormal debido a que el Witness no dispone de la Birnbaum-Saunders (véase Figura 118).

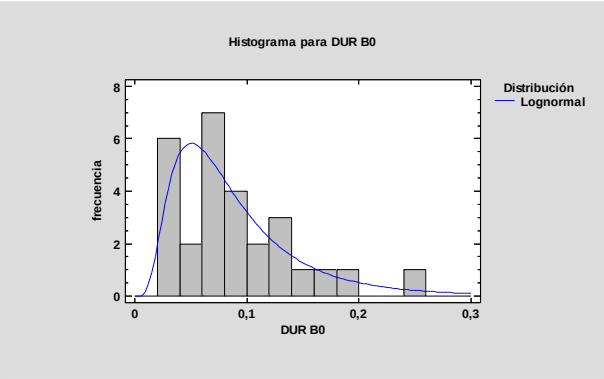

Figura 118. Distribución asociada a DUR B0.

Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - TEP CO

- Datos/Variable: TEP CO
- 497 valores con rango desde 0,01 a 1233,21
- Distribución Ajustada: **Lognormal.**
  - Media= 12,0749
  - Desviación estándar= 159,278

Este análisis muestra los resultados de ajustar una distribución lognormal a los datos de TEP CO. Los parámetros estimados para la distribución ajustada se muestran arriba.

Pruebas de Bondad-de-Ajuste para TEP CO

Prueba de Kolmogorov-Smirnov (véase Tabla 48).

	Lognormal
DMAS	0,0588902
DMENOS	0,0423357
DN	0,0588902
Valor-P	0,0636672

Tabla 48. Prueba de Kolgomorov-Smirnov para TEP CO.

Esta ventana muestra los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si TEP CO puede modelarse adecuadamente con una distribución lognormal.

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que TEP CO proviene de una distribución lognormal con 95% de confianza.

Comparación de Distribuciones Alternas

En este apartado se comparan diferentes distribuciones estadísiticas calculando el logaritmo de verosimilitud, para observer cuál es la que mas se asemeja a los datos introducidos (véase Tabla 49).

Distribución	*Parámetros Est.*	*Log Verosimilitud*	*KS D*
Lognormal	2	-1067,36	0,0588902
Loglogística	2	-1076,08	0,0631574
Gaussiana Inversa	2	-1106,26	0,221605
Weibull	2	-1127,55	0,112911
Birnbaum-Saunders	2	-1131,34	0,208142
Gamma	2	-1237,11	0,208633
Exponencial	1	-1835,19	0,525657
Laplace	2	-2170,26	0,469892
Logística	2	-2170,26	
Valor Extremo Más Grande	2	-2222,11	0,364131
Normal	2	-2867,34	0,424561
Uniforme	2	-3537,33	0,91146
Pareto	1	-4,97E11	7,43478E33
Valor Extremo Más Chico	<sin ajuste>		

Tabla 49. Comparación entre distribuciones para TEP C0.

Esta tabla compara la bondad de ajuste cuando varias distribuciones se ajustan a TEP C0.

De acuerdo con el estadístico log verosimilitud, la distribución de mejor ajuste es la distribución lognormal (véase Figura 119).

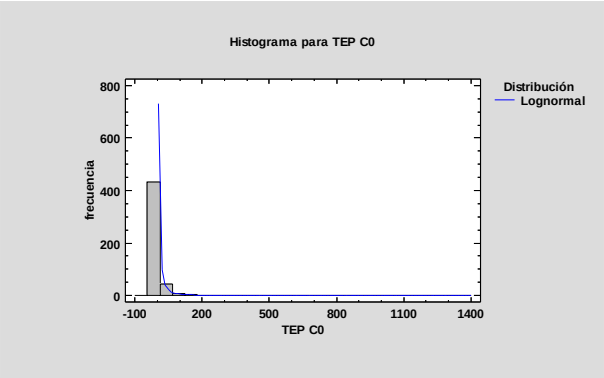

Figura 119. Distribución asociada a TEP C0.

Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - DUR C0

- Datos/Variable: DUR C0
- 497 valores con rango desde 0,0003 a 1,02747
- Distribución Ajustada: **Lognormal.**
    - Media= 0,0695235.

- Desviación estándar= 0,0618585.

Este análisis muestra los resultados de ajustar una distribución lognormal a los datos de DUR C0. Los parámetros estimados para la distribución ajustada se muestran arriba.

Pruebas de Bondad-de-Ajuste para DUR C0

Prueba de Kolmogorov-Smirnov (véase Tabla 50):

	Lognormal
DMAS	0,0675615
DMENOS	0,0758025
DN	0,0758025
Valor-P	0,00661512

Tabla 50. Prueba de Kolgomorov-Smirnov para DUR C0.

Esta ventana muestra los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si DUR C0 puede modelarse adecuadamente con una distribución lognormal.

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es menor a 0,05, se puede rechazar la idea de que DUR C0 proviene de una distribución lognormal con 95% de confianza. Aunque se rechace la hipótesis, como se observará a continuación la distribución lognormal es la segunda que mas se aproxima a los datos introducidos y debido a Witness carece de la distribución Loglogística se ha introducido la ya citada Lognormal.

Comparación de Distribuciones Alternas

En este apartado se comparan diferentes distribuciones estadísiticas calculando el logaritmo de verosimilitud, para observer cuál es la que mas se asemeja a los datos introducidos (véase Tabla 51)

Distribución	*Parámetros Est.*	*Log Verosimilitud*	*KS D*
Loglogística	2	923,021	0,0496415
Lognormal	2	899,268	0,0758025
Gamma	2	872,253	0,121974
Weibull	2	848,355	0,11577
Valor Extremo Más Grande	2	846,232	0,133256
Exponencial	1	826,101	0,187847
Birnbaum-Saunders	2	801,945	0,169384
Laplace	2	797,688	0,159918
Gaussiana Inversa	2	787,849	0,179694
Logística	2	747,15	0,140109
Normal	2	594,695	0,210673
Uniforme	2	-13,3217	0,771262
Pareto	1	-4,97E11	1,0092
Valor Extremo Más Chico	<sin ajuste>		

Tabla 51. Comparación entre distribuciones para DUR C0.

Esta tabla compara la bondad de ajuste cuando varias distribuciones se ajustan a DUR C0.

De acuerdo con el estadístico log verosimilitud, la distribución de mejor ajuste es la distribución Loglogística, aunque se ha utilizado la Lognormal debido a que el Witness no dispone de la Loglogísitica (véase Figura 120).

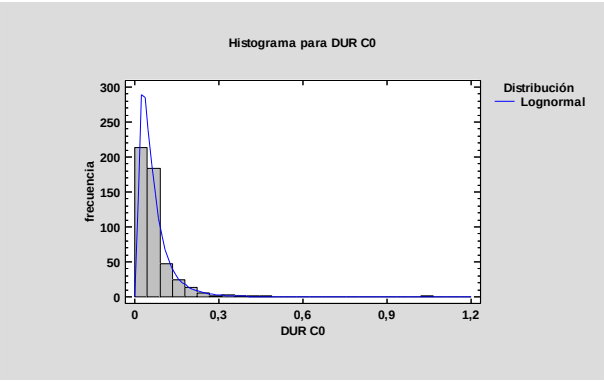

Figura 120. Distribución asociada a DUR C0.

Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - TEP D1

- Datos/Variable: TEP D1
- 43 valores con rango desde 0,04 a 698,7
- Distribución Ajustada: **Weibull.**
  - Forma=0,564573.
  - Escala= 90,6833.

Este análisis muestra los resultados de ajustar una distribución Weibull a los datos de TEP D1. Los parámetros estimados para la distribución ajustada se muestran arriba.

Pruebas de Bondad-de-Ajuste para TEP D1

Prueba de Kolmogorov-Smirnov (véase Tabla 52).

	Weibull
DMAS	0,0842755
DMENOS	0,123192
DN	0,123192
Valor-P	0,547659

Tabla 52. Prueba de Kolgomorov-Smirnov para TEP D1.

Esta ventana muestra los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si TEP D1 puede modelarse adecuadamente con una distribución Weibull.

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que TEP D1 proviene de una distribución Weibull con 95% de confianza.

Comparación de Distribuciones Alternas

En este apartado se comparan diferentes distribuciones estadísiticas calculando el logaritmo de verosimilitud, para observer cuál es la que mas se asemeja a los datos introducidos (véase Tabla 53)

Distribución	*Parámetros Est.*	*Log Verosimilitud*	*KS D*
Gamma	2	-239,364	0,0994367
Weibull	2	-240,794	0,123192
Loglogística	2	-246,3	0,147972
Lognormal	2	-246,396	0,19102
Exponencial	1	-253,886	0,249133
Valor Extremo Más Grande	2	-271,017	0,182449
Laplace	2	-278,087	0,311114
Logística	2	-279,333	0,229671
Uniforme	2	-281,614	0,507825
Normal	2	-282,472	0,219832
Gaussiana Inversa	2	-285,026	0,511759
Valor Extremo Más Chico	2	-294,995	0,301914
Pareto	1	-1,E9	0,291189
Birnbaum-Saunders	<sin ajuste>		

Tabla 53. Comparación entre distribuciones para TEP D1.

Esta tabla compara la bondad de ajuste cuando varias distribuciones se ajustan a TEP D1.

De acuerdo con el estadístico log verosimilitud, la distribución de mejor ajuste es la distribución Gamma aunque se ha utilizado la Weibull ya que existe muy poca diferencia en la similitud (véase Figura 121).

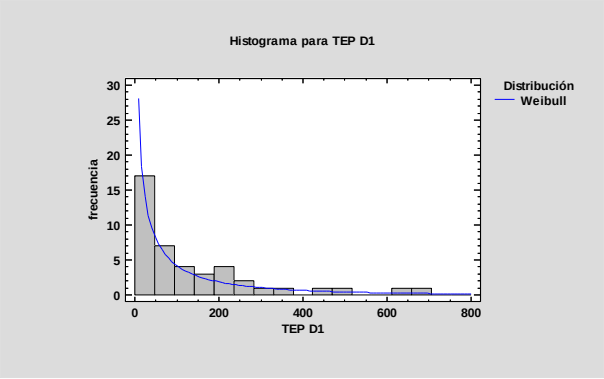

Figura 121. Distribución asociada a TEP D1.

Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - DUR D1

- Datos/Variable: DUR D1
- 44 valores con rango desde 0,0171333 a 0,63505
- Distribución Ajustada: **Lognormal.**
    - Media=0,109071.
    - Desviación estándar= 0,120582.

Este análisis muestra los resultados de ajustar una distribución lognormal a los datos de DUR D1. Los parámetros estimados para la distribución ajustada se muestran arriba.

Pruebas de Bondad-de-Ajuste para DUR D1

Prueba de Kolmogorov-Smirnov (véase Tabla 54)

	Lognormal
DMAS	0,105785
DMENOS	0,0761326
DN	0,105785
Valor-P	0,70841

Tabla 54. Prueba de Kolgomorov-Smirnov para DUR D1.

Esta ventana muestra los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si DUR D1 puede modelarse adecuadamente con una distribución lognormal.

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que DUR D1 proviene de una distribución lognormal con 95% de confianza.

Comparación de Distribuciones Alternas

En este apartado se comparan diferentes distribuciones estadísiticas calculando el logaritmo de verosimilitud, para observer cuál es la que mas se asemeja a los datos introducidos (véase Tabla 55).

Distribución	*Parámetros Est.*	*Log Verosimilitud*	*KS D*
Gaussiana Inversa	2	59,5639	0,111791
Birnbaum-Saunders	2	58,4422	0,140596
Lognormal	2	58,0775	0,105785
Loglogística	2	57,4857	0,088339
Gamma	2	52,3932	0,174186
Weibull	2	51,7648	0,165865
Exponencial	1	51,6452	0,154163
Valor Extremo Más Grande	2	43,9321	0,18269
Laplace	2	39,0991	0,276595
Logística	2	33,4902	0,233583
Normal	2	27,932	0,282872
Uniforme	2	21,1817	0,629402
Valor Extremo Más Chico	2	12,3435	0,327129
Pareto	1	-4,97E11	1,0

Tabla 55. Comparación entre distribuciones para DUR D1.

Esta tabla compara la bondad de ajuste cuando varias distribuciones se ajustan a DUR D1.

De acuerdo con el estadístico log verosimilitud, la distribución de mejor ajuste es la distribución Gaussiana Inversa, aunque se ha utilizado la Lognormal debido a que el Witness no dispone de la Gaussiana Inversa (véase Figura 122).

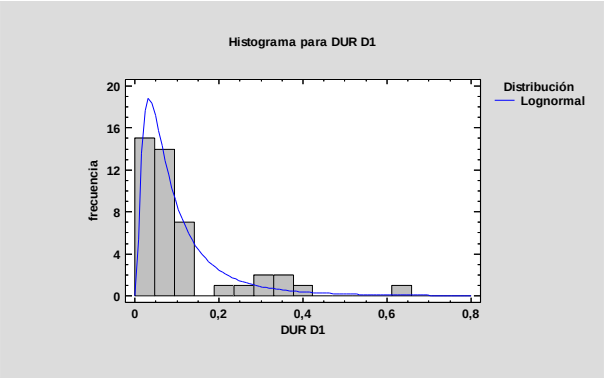

Figura 122. Distribución asociada a DUR D1.

Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - TEP D2

- Datos/Variable: TEP D2
- 15 valores con rango desde 8,9 a 1115,37
- Distribución Ajustada: **Weibull.**
    - Forma= 0,921358.
    - Escala= 290,798.

Este análisis muestra los resultados de ajustar una distribución Weibull a los datos de TEP D2. Los parámetros estimados para la distribución ajustada se muestran arriba.

Pruebas de Bondad-de-Ajuste para TEP D2

Prueba de Kolmogorov-Smirnov (véase Tabla 56).

	Weibull
DMAS	0,160043
DMENOS	0,0991826
DN	0,160043
Valor-P	0,836968

Tabla 56. Prueba de Kolgomorov-Smirnov para TEP D2.

Esta ventana muestra los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si TEP D2 puede modelarse adecuadamente con una distribución Weibull.

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que TEP D2 proviene de una distribución Weibull con 95% de confianza.

Comparación de Distribuciones Alternas

En este apartado se comparan diferentes distribuciones estadísiticas calculando el logaritmo de verosimilitud, para observer cuál es la que mas se asemeja a los datos introducidos (véase Tabla 57).

Distribución	*Parámetros Est.*	*Log Verosimilitud*	*KS D*
Weibull	2	-100,605	0,160043
Gamma	2	-100,643	0,167369
Exponencial	1	-100,693	0,174175
Lognormal	2	-100,901	0,163031
Loglogística	2	-100,985	0,137735
Birnbaum-Saunders	2	-101,023	0,209515
Gaussiana Inversa	2	-102,301	0,265439
Valor Extremo Más Grande	2	-104,43	0,208227
Uniforme	2	-105,134	0,53908
Laplace	2	-105,79	0,198576
Logística	2	-107,547	0,207414
Normal	2	-108,317	0,305991
Valor Extremo Más Chico	2	-111,871	0,336708
Pareto	1	-115,362	0,415231

Tabla 57. Comparación entre distribuciones para TEP D2.

Esta tabla compara la bondad de ajuste cuando varias distribuciones se ajustan a TEP D2.

De acuerdo con el estadístico log verosimilitud, la distribución de mejor ajuste es la distribución Weibull (véase Figura 123).

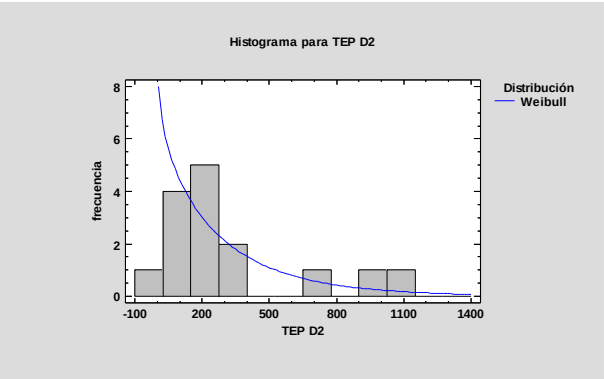

Figura 123. Distribución asociada a TEP D2.

Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - DUR D2

- Datos/Variable: DUR D2
- 16 valores con rango desde 0,0200333 a 0,434417
- Distribución Ajustada: **Lognormal.**
  - Media= 0,123991.
  - Desviación estándar= 0,116803.

Este análisis muestra los resultados de ajustar una distribución lognormal a los datos de DUR D2. Los parámetros estimados para la distribución ajustada se muestran arriba.

Pruebas de Bondad-de-Ajuste para DUR D2

Prueba de Kolmogorov-Smirnov (véase Tabla 58).

	Lognormal
DMAS	0,11401
DMENOS	0,0900086
DN	0,11401
Valor-P	0,985417

Tabla 58. Prueba de Kolgomorov-Smirnov para DUR D2.

Esta ventana muestra los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si DUR D2 puede modelarse adecuadamente con una distribución lognormal.

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que DUR D2 proviene de una distribución lognormal con 95% de confianza.

Comparación de Distribuciones Alternas

En este apartado se comparan diferentes distribuciones estadísiticas calculando el logaritmo de verosimilitud, para observer cuál es la que mas se asemeja a los datos introducidos (véase Tabla 59).

Distribución	*Parámetros Est.*	*Log Verosimilitud*	*KS D*
Gaussiana Inversa	2	19,9759	0,111087
Birnbaum-Saunders	2	19,9597	0,121697
Lognormal	2	19,9098	0,11401
Loglogística	2	19,7761	0,0971813
Gamma	2	19,1243	0,142779
Weibull	2	18,6379	0,158888
Valor Extremo Más Grande	2	17,9115	0,149974
Exponencial	1	17,6912	0,18315
Laplace	2	16,2135	0,175015
Logística	2	15,0158	0,159312
Uniforme	2	14,0954	0,539964
Normal	2	13,4391	0,240321
Valor Extremo Más Chico	2	8,71201	0,303277
Pareto	1	-4,97E11	1,0

Tabla 59. Comparación entre distribuciones para DUR D2.

Esta tabla compara la bondad de ajuste cuando varias distribuciones se ajustan a DUR D2.

De acuerdo con el estadístico log verosimilitud, la distribución de mejor ajuste es la distribución Gaussiana Inversa, aunque se ha utilizado la Lognormal debido a que el Witness no dispone de la Gaussiana Inversa (véase Figura 124).

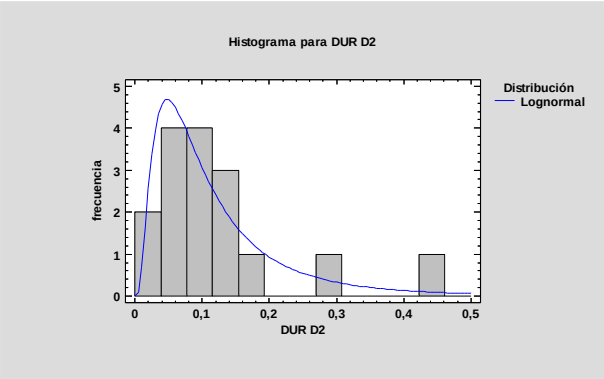

Figura 124. Distribución asociada a DUR D2.

Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - TEP D0

- Datos/Variable: TEP D0
- 199 valores con rango desde 0,02 a 702,98
- Distribución Ajustada: **Weibull.**
  - Forma=0,485813.
  - Escala=18,0803.

Este análisis muestra los resultados de ajustar una distribución Weibull a los datos de TEP D0. Los parámetros estimados para la distribución ajustada se muestran arriba.

Pruebas de Bondad-de-Ajuste para TEP D0

Prueba de Kolmogorov-Smirnov (véase Tabla 60):

	Weibull
DMAS	0,0778002
DMENOS	0,0977571
DN	0,0977571
Valor-P	0,0445869

Tabla 60. Prueba de Kolgomorov-Smirnov para TEP D0.

Esta ventana muestra los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si TEP D0 puede modelarse adecuadamente con una distribución Weibull.

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es menor a 0,05, se puede rechazar la idea de que TEP D0 proviene de una distribución Weibull con 95% de confianza.

Comparación de Distribuciones Alternas

En este apartado se comparan diferentes distribuciones estadísiticas calculando el logaritmo de verosimilitud, para observer cuál es la que mas se asemeja a los datos introducidos (véase Tabla 61).

Distribución	*Parámetros Est.*	*Log Verosimilitud*	*KS D*
Birnbaum-Saunders	2	-783,61	0,182353
Gamma	2	-792,165	0,0793779
Weibull	2	-793,535	0,0977571
Lognormal	2	-806,327	0,158316
Loglogística	2	-812,757	0,129902
Exponencial	1	-905,471	0,306818
Gaussiana Inversa	2	-906,389	0,418465
Valor Extremo Más Grande	2	-1002,81	0,18328
Laplace	2	-1028,96	0,330551
Logística	2	-1048,99	0,273761
Normal	2	-1118,22	0,30141
Uniforme	2	-1304,5	0,772787
Pareto	1	-1,E9	0,30971
Valor Extremo Más Chico	<sin ajuste>		

Tabla 61. Comparación entre distribuciones para TEP D0.

Esta tabla compara la bondad de ajuste cuando varias distribuciones se ajustan a TEP D0.

De acuerdo con el estadístico log verosimilitud, la distribución de mejor ajuste es la distribución Birnbaum-Saunders, Saunders aunque se ha utilizado la Weibull debido a que el Witness no dispone de la Birnbaum-Saunders (véase Figura 125).

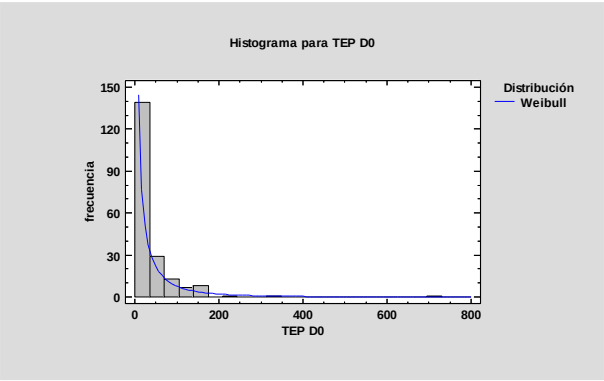

Figura 125. Distribución asociada a TEP D0.

Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - DUR D0

- Datos/Variable: DUR D0
- 199 valores con rango desde 0,00333333 a 0,586633

- Distribución Ajustada: **Lognormal.**
  - Media= 0.0637274.
  - Desviación estándar= 0,0619747.

Este análisis muestra los resultados de ajustar una distribución lognormal a los datos de DUR D0. Los parámetros estimados para la distribución ajustada se muestran arriba.

Pruebas de Bondad-de-Ajuste para DUR D0

Prueba de Kolmogorov-Smirnov (véase Tabla 62).

	Lognormal
DMAS	0,0407373
DMENOS	0,0583151
DN	0,0583151
Valor-P	0,521139

Tabla 62. Prueba de Kolgomorov-Smirnov para DUR D0.

Esta ventana muestra los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si DUR D0 puede modelarse adecuadamente con una distribución lognormal.

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que DUR D0 proviene de una distribución lognormal con 95% de confianza.

Comparación de Distribuciones Alternas

En este apartado se comparan diferentes distribuciones estadísiticas calculando el logaritmo de verosimilitud, para observer cuál es la que mas se asemeja a los datos introducidos (véase Tabla 63).

Distribución	*Parámetros Est.*	*Log Verosimilitud*	*KS D*
Loglogística	2	373,6	0,0489728
Lognormal	2	372,734	0,0583151
Gamma	2	369,789	0,0491978
Birnbaum-Saunders	2	368,231	0,0878919
Gaussiana Inversa	2	365,486	0,0986081
Weibull	2	363,789	0,0690416
Valor Extremo Más Grande	2	358,448	0,0818192
Exponencial	1	353,533	0,152955
Laplace	2	332,079	0,147071
Logística	2	329,054	0,11431
Normal	2	282,482	0,159254
Uniforme	2	107,272	0,721507
Pareto	1	-4,97E11	1,0
Valor Extremo Más Chico	<sin ajuste>		

Tabla 63. Comparación entre distribuciones para DUR D0.

Esta tabla compara la bondad de ajuste cuando varias distribuciones se ajustan a DUR D0.

De acuerdo con el estadístico log verosimilitud, la distribución de mejor ajuste es la distribución Loglogística, aunque se ha utilizado la Lognormal debido a que el Witness no dispone de la Loglogísitica (véase Figura 126).

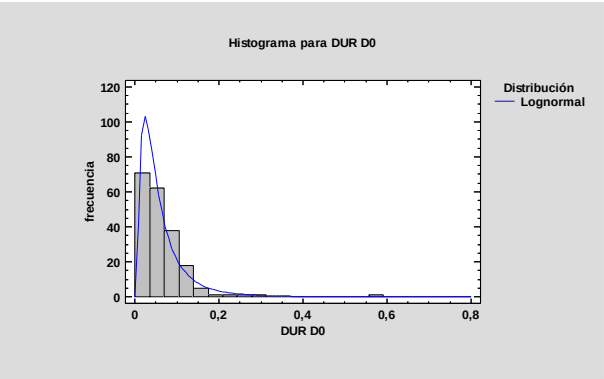

Figura 126. Distribución asociada a DUR D0.

Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - TEP E1

- Datos/Variable: TEP E1
- 48 valores con rango desde 0,03 a 884,85
- Distribución Ajustada: **Weibull.**
    - Forma= 0,43375.
    - Escala= 49,5202.

Este análisis muestra los resultados de ajustar una distribución Weibull a los datos de TEP E1. Los parámetros estimados para la distribución ajustada se muestran arriba.

Pruebas de Bondad-de-Ajuste para TEP E1

Prueba de Kolmogorov-Smirnov (véase Tabla 64)

	Weibull
DMAS	0,0983151
DMENOS	0,0784814
DN	0,0983151
Valor-P	0,742347

Tabla 64. Prueba de Kolgomorov-Smirnov para TEP E1.

Esta ventana muestra los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si TEP E1 puede modelarse adecuadamente con una distribución Weibull.

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que TEP E1 proviene de una distribución Weibull con 95% de confianza.

Comparación de Distribuciones Alternas

En este apartado se comparan diferentes distribuciones estadísiticas calculando el logaritmo de verosimilitud, para observer cuál es la que mas se asemeja a los datos introducidos (véase Tabla 65).

Distribución	*Parámetros Est.*	*Log Verosimilitud*	*KS D*
Gamma	2	-237,896	0,105745
Weibull	2	-238,41	0,0983151
Lognormal	2	-240,93	0,132997
Loglogística	2	-242,599	0,112364
Gaussiana Inversa	2	-271,332	0,443488
Exponencial	1	-275,355	0,364395
Valor Extremo Más Grande	2	-301,172	0,224194
Laplace	2	-306,617	0,383557
Logística	2	-312,804	0,29289
Normal	2	-319,622	0,274878
Uniforme	2	-325,698	0,619743
Valor Extremo Más Chico	2	-337,015	0,356635
Pareto	1	-1,E9	0,258789
Birnbaum-Saunders	<sin ajuste>		

Tabla 65. Comparación entre distribuciones para TEP E1.

Esta tabla compara la bondad de ajuste cuando varias distribuciones se ajustan a TEP E1.

De acuerdo con el estadístico log verosimilitud, la distribución de mejor ajuste es la distribución Gamma aunque se ha utilizado la Weibull ya que existe muy poca diferencia en la similitud (véase Figura 127).

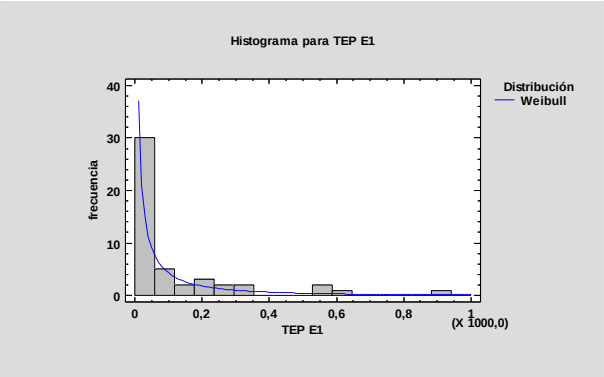

Figura 127. Distribución asociada a TEP E1.

Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - DUR E1

- Datos/Variable: DUR E1
- 49 valores con rango desde 0,00346667 a 0,475117
- Distribución Ajustada: **Weibull.**
    - Forma= 1,35884.
    - Escala= 0,121223.

Este análisis muestra los resultados de ajustar una distribución Weibull a los datos de DUR E1. Los parámetros estimados para la distribución ajustada se muestran arriba.

Pruebas de Bondad-de-Ajuste para DUR E1

Prueba de Kolmogorov-Smirnov (véase Tabla 66).

	Weibull
DMAS	0,0905297
DMENOS	0,081722
DN	0,0905297
Valor-P	0,816762

Tabla 66. Prueba de Kolgomorov-Smirnov para DUR E1.

Esta ventana muestra los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si DUR E1 puede modelarse adecuadamente con una distribución Weibull.

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que DUR E1 proviene de una distribución Weibull con 95% de confianza.

Comparación de Distribuciones Alternas

En este apartado se comparan diferentes distribuciones estadísiticas calculando el logaritmo de verosimilitud, para observer cuál es la que mas se asemeja a los datos introducidos (véase Tabla 67).

Distribución	Parámetros Est.	Log Verosimilitud	KS D
Loglogística	2	64,6544	0,0499989
Gamma	2	63,6821	0,0812282
Weibull	2	62,625	0,0905297
Lognormal	2	62,2607	0,092359
Valor Extremo Más Grande	2	61,7644	0,102243
Exponencial	1	59,0052	0,181774
Birnbaum-Saunders	2	57,4273	0,163357
Laplace	2	56,5708	0,144822
Gaussiana Inversa	2	55,515	0,17546
Logística	2	53,774	0,120302
Normal	2	48,8088	0,175712
Uniforme	2	36,8244	0,524446
Valor Extremo Más Chico	2	32,1047	0,253613
Pareto	1	-4,97E11	1,0

Tabla 67. Comparación entre distribuciones para DUR E1.

Esta tabla compara la bondad de ajuste cuando varias distribuciones se ajustan a DUR E1.

De acuerdo con el estadístico log verosimilitud, la distribución de mejor ajuste es la distribución Loglogística, aunque se ha utilizado la distribución Weibull debido a que Witness no dispone de la Loglogísitica (véase Figura 128).

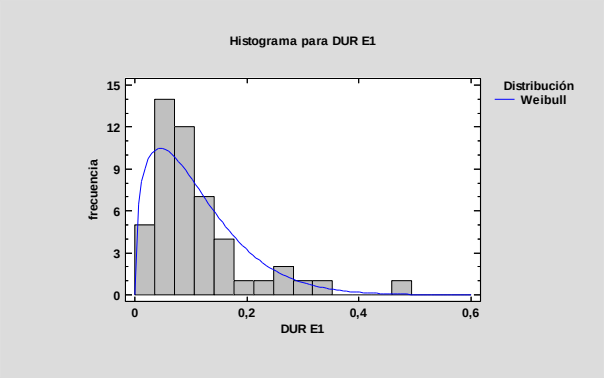

Figura 128. Distribución asociada a DUR E1.

Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - TEP F1

- Datos/Variable: TEP F1
- 4 valores con rango desde 0,06 a 2470,98
- Distribución Ajustada: **Weibull.**
    - Forma= 0,352032.
    - Escala= 322,08

Este análisis muestra los resultados de ajustar una distribución Weibull a los datos de TEP F1. Los parámetros estimados para la distribución ajustada se muestran arriba.

Pruebas de Bondad-de-Ajuste para TEP F1

Prueba de Kolmogorov-Smirnov (véase Tabla 68).

	Weibull
DMAS	0,202525
DMENOS	0,240863
DN	0,240863
Valor-P	0,974446

Tabla 68. Prueba de Kolgomorov-Smirnov para TEP F1.

Esta ventana muestra los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si TEP F1 puede modelarse adecuadamente con una distribución Weibull.

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que TEP F1 proviene de una distribución Weibull con 95% de confianza.

Comparación de Distribuciones Alternas

En este apartado se comparan diferentes distribuciones estadísiticas calculando el logaritmo de verosimilitud, para observer cuál es la que mas se asemeja a los datos introducidos (véase Tabla 69).

Distribución	*Parámetros Est.*	*Log Verosimilitud*	*KS D*
Gamma	2	-26,035	0,229234
Weibull	2	-26,4902	0,240863
Loglogística	2	-27,1555	0,205983
Exponencial	1	-30,8454	0,430056
Uniforme	2	-31,2494	0,475912
Gaussiana Inversa	2	-32,1032	0,699688
Valor Extremo Más Grande	2	-32,6567	0,301924
Normal	2	-33,3723	0,272712
Logística	2	-33,3905	0,240435
Laplace	2	-33,4701	0,298765
Valor Extremo Más Chico	2	-33,8838	0,317563
Pareto	1	-1,E9	0,396687
Lognormal	2	-4,97E11	0,263315
Birnbaum-Saunders	<sin ajuste>		

Tabla 69. Comparación entre distribuciones para TEP F1.

Esta tabla compara la bondad de ajuste cuando varias distribuciones se ajustan a TEP F1.

De acuerdo con el estadístico log verosimilitud, la distribución de mejor ajuste es la distribución Gamma aunque se ha utilizado la Weibull ya que existe muy poca diferencia en la similitud (véase Figura 129).

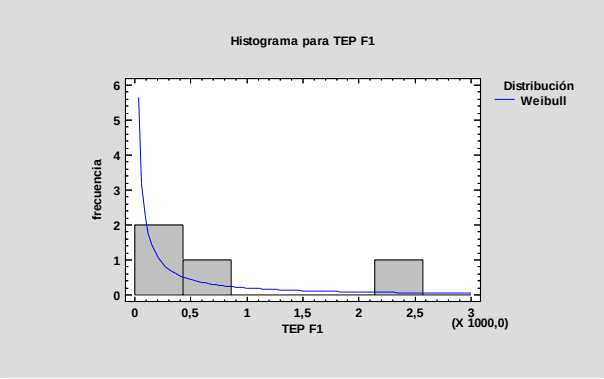

Figura 129. Distribución asociada a TEP F1.

Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - DUR F1

- Datos/Variable: DUR F1
- 5 valores con rango desde 0,0112167 a 0,0691667
- Distribución Ajustada: **Uniforme.**
    - Límite inferior= 0, 0112167.
    - Límite superioir= 0, 0691667.

Este análisis muestra los resultados de ajustar una distribución Uniforme a los datos de DUR F1. Los parámetros estimados para la distribución ajustada se muestran arriba.

Pruebas de Bondad-de-Ajuste para DUR F1

Prueba de Kolmogorov-Smirnov (véase Tabla 70).

	Uniforme
DMAS	0,2
DMENOS	0,33109
DN	0,33109
Valor-P	0,643446

Tabla 70. Prueba de Kolgomorov-Smirnov para DUR F1.

Esta ventana muestra los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si DUR F1 puede modelarse adecuadamente con una distribución Uniforme.

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que DUR F1 proviene de una distribución Uniforme con 95% de confianza.

Comparación de Distribuciones Alternas

En este apartado se comparan diferentes distribuciones estadísiticas calculando el logaritmo de verosimilitud, para observer cuál es la que mas se asemeja a los datos introducidos (véase Tabla 71).

Distribución	*Parámetros Est.*	*Log Verosimilitud*	*KS D*
Uniforme	2	14,2409	0,33109
Valor Extremo Más Chico	2	12,9893	0,203885
Laplace	2	12,5864	0,243385
Normal	2	12,4854	0,240031
Logística	2	12,4505	0,222283
Weibull	2	12,407	0,273931
Gamma	2	11,8681	0,284286
Valor Extremo Más Grande	2	11,8585	0,261698
Loglogística	2	11,3797	0,233505
Birnbaum-Saunders	2	11,3103	0,335005
Lognormal	2	11,2334	0,301879
Gaussiana Inversa	2	11,1794	0,340389
Exponencial	1	10,4294	0,375198
Pareto	1	-4,97E11	1,0

Tabla 71. Comparación entre distribuciones para DUR F1.

Esta tabla compara la bondad de ajuste cuando varias distribuciones se ajustan a DUR F1.

De acuerdo con el estadístico log verosimilitud, la distribución de mejor ajuste es la distribución uniforme (véase Figura 130).

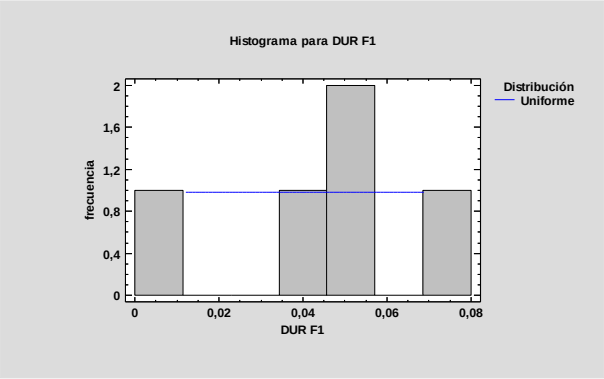

Figura 130. Distribución asociada a DUR F1.

Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - TEP F3

- Datos/Variable: TEP F3
- 3 valores con rango desde 46,98 a 684,07
- Distribución Ajustada: **Weibull.**
    - Forma= 0,826716.
    - Escala= 235,451.

Este análisis muestra los resultados de ajustar una distribución Uniforme a los datos de TEP F3. Los parámetros estimados para la distribución ajustada se muestran arriba.

Pruebas de Bondad-de-Ajuste para TEP F3

Prueba de Kolmogorov-Smirnov (véase Tabla 72).

	Weibull
DMAS	0,39203
DMENOS	0,243975
DN	0,39203
Valor-P	0,745823

Tabla 72. Prueba de Kolgomorov-Smirnov para TEP F3.

Esta ventana muestra los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si TEP F3 puede modelarse adecuadamente con una distribución uniforme.

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que TEP F3 proviene de una distribución Uniforme con 95% de confianza.

Comparación de Distribuciones Alternas

En este apartado se comparan diferentes distribuciones estadísiticas calculando el logaritmo de verosimilitud, para observer cuál es la que mas se asemeja a los datos introducidos (véase Tabla 73).

Distribución	*Parámetros Est.*	*Log Verosimilitud*	*KS D*
Gaussiana Inversa	2	-18,9511	0,402929
Birnbaum-Saunders	2	-19,0204	0,429856
Uniforme	2	-19,3707	0,646889
Lognormal	2	-19,4031	0,356495
Loglogística	2	-19,4447	0,347868
Weibull	2	-19,6228	0,39203
Gamma	2	-19,6627	0,411126
Exponencial	1	-19,7227	0,464327
Valor Extremo Más Grande	2	-20,8971	0,425664
Laplace	2	-21,1543	0,471197
Normal	2	-21,4503	0,378917
Logística	2	-21,4909	0,374175
Valor Extremo Más Chico	2	-21,6764	0,409377
Pareto	1	-22,1845	0,549959

Tabla 73. Comparación entre distribuciones para TEP F3.

Esta tabla compara la bondad de ajuste cuando varias distribuciones se ajustan a TEP F3.

De acuerdo con el estadístico log verosimilitud, la distribución de mejor ajuste es la distribución Gaussiana Inversa, aunque se ha utilizado una Weibull debido a que Witness carece de la distribución Gaussiana Inversa (véase Figura 131).

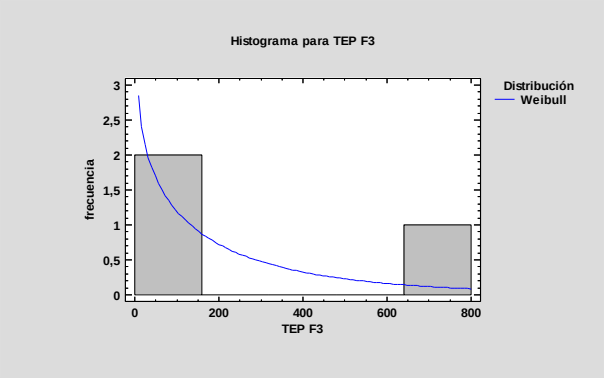

Figura 131. Distribución asociada a TEP F3.

Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - DUR F3

- Datos/Variable: DUR F3
- 4 valores con rango desde 0,05 a 0,28
- Distribución Ajustada: **Uniforme.**
    - Límite inferior= 0, 05.
    - Límite superior= 0, 28.

Este análisis muestra los resultados de ajustar una distribución Uniforme a los datos de DUR F3. Los parámetros estimados para la distribución ajustada se muestran arriba.

Pruebas de Bondad-de-Ajuste para DUR F3

Prueba de Kolmogorov-Smirnov (véase Tabla 74).

	Uniforme
DMAS	0,25
DMENOS	0,576087
DN	0,576087
Valor-P	0,140621

Tabla 74. Prueba de Kolgomorov-Smirnov para DUR F3.

Esta ventana muestra los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si DUR F3 puede modelarse adecuadamente con una distribución uniforme.

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que DUR F3 proviene de una distribución Uniforme con 95% de confianza.

Comparación de Distribuciones Alternas

En este apartado se comparan diferentes distribuciones estadísiticas calculando el logaritmo de verosimilitud, para observer cuál es la que mas se asemeja a los datos introducidos (véase Tabla 75).

Distribución	*Parámetros Est.*	*Log Verosimilitud*	*KS D*
Uniforme	2	5,8787	0,576087
Valor Extremo Más Chico	2	4,76678	0,356812
Laplace	2	4,48105	0,279018
Logística	2	3,89279	0,332907
Normal	2	3,85004	0,380895
Weibull	2	3,73864	0,422435
Gamma	2	3,26659	0,430649
Valor Extremo Más Grande	2	3,25256	0,402744
Birnbaum-Saunders	2	2,84343	0,461201
Loglogística	2	2,76353	0,369818
Gaussiana Inversa	2	2,71288	0,46603
Lognormal	2	2,70307	0,41243
Exponencial	1	2,33898	0,43986
Pareto	1	-4,97E11	1,0

Tabla 75. Comparación entre distribuciones paa DUR F3.

Esta tabla compara la bondad de ajuste cuando varias distribuciones se ajustan a DUR F3.

De acuerdo con el estadístico log verosimilitud, la distribución de mejor ajuste es la distribución uniforme (véase Figura 132).

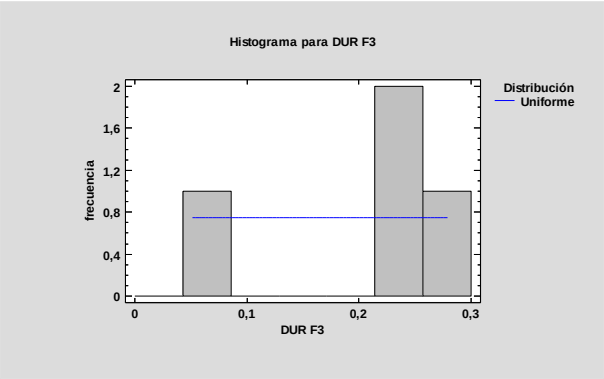

Figura 132. Distribución asociada a DUR F3.

Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - TEP E2

- Datos/Variable: TEP E2
- 35 valores con rango desde 0,32 a 872,11
- Distribución Ajustada: **Weibull.**
    - Forma=0, 681903.
    - Escala=142, 901

Este análisis muestra los resultados de ajustar una distribución Weibull a los datos de TEP E2. Los parámetros estimados para la distribución ajustada se muestran arriba.

Pruebas de Bondad-de-Ajuste para TEP E2

Prueba de Kolmogorov-Smirnov (véase Tabla 76).

	Weibull
DMAS	0,103873
DMENOS	0,125987
DN	0,125987
Valor-P	0,635

Tabla 76. Prueba de Kolgomorov-Smirnov para TEP E2.

Esta ventana muestra los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si TEP E2 puede modelarse adecuadamente con una distribución Weibull.

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que TEP E2 proviene de una distribución Weibull con 95% de confianza.

Comparación de Distribuciones Alternas

En este apartado se comparan diferentes distribuciones estadísiticas calculando el logaritmo de verosimilitud, para observer cuál es la que mas se asemeja a los datos introducidos (véase Tabla 77).

Distribución	*Parámetros Est.*	*Log Verosimilitud*	*KS D*
Gamma	2	-210,631	0,125962
Weibull	2	-211,699	0,125987
Birnbaum-Saunders	2	-215,539	0,374458
Exponencial	1	-216,087	0,183138
Loglogística	2	-216,793	0,141272
Lognormal	2	-217,496	0,220478
Valor Extremo Más Grande	2	-226,867	0,215563
Logística	2	-232,967	0,196466
Laplace	2	-233,147	0,30575
Normal	2	-235,181	0,212494
Uniforme	2	-236,969	0,489407
Gaussiana Inversa	2	-238,459	0,556018
Valor Extremo Más Chico	2	-245,436	0,286116
Pareto	1	-1,E9	0,37716

Tabla 77. Comparación entre distribuciones para TEP E2.

Esta tabla compara la bondad de ajuste cuando varias distribuciones se ajustan a TEP E2.

De acuerdo con el estadístico log verosimilitud, la distribución de mejor ajuste es la distribución Gamma, aunque se ha utilizado una distribución Weibull debido a que esxiste muy poca diferencia en la similitude (véase Figura 133).

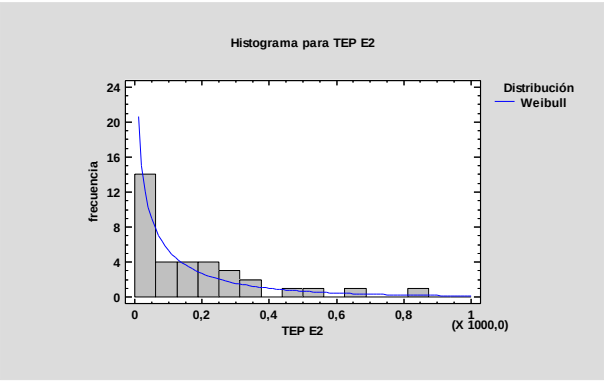

Figura 133. Distribución asociada a TEP E2.

Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - DUR E2

- Datos/Variable: DUR E2
- 35 valores con rango desde 0,0157 a 0,6698

- Distribución Ajustada: **Lognormal.**
  - Media= 0, 0120713.
  - Desviación estándar= 0, 133419.

Este análisis muestra los resultados de ajustar una distribución lognormal a los datos de DUR E2. Los parámetros estimados para la distribución ajustada se muestran arriba.

Pruebas de Bondad-de-Ajuste para DUR E2

Prueba de Kolmogorov-Smirnov (véase Tabla 78).

	Lognormal
DMAS	0,0887998
DMENOS	0,0684204
DN	0,0887998
Valor-P	0,945386

Tabla 78. Prueba de Kolgomorov-Smirnov para DUR E2.

Esta ventana muestra los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si DUR E2 puede modelarse adecuadamente con una distribución lognormal.

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que DUR E2 proviene de una distribución lognormal con 95% de confianza.

Comparación de Distribuciones Alternas

En este apartado se comparan diferentes distribuciones estadísiticas calculando el logaritmo de verosimilitud, para observer cuál es la que mas se asemeja a los datos introducidos (véase Tabla 79).

Distribución	*Parámetros Est.*	*Log Verosimilitud*	*KS D*
Gaussiana Inversa	2	43,2962	0,101757
Loglogística	2	42,7883	0,0661094
Lognormal	2	42,7517	0,0887998
Birnbaum-Saunders	2	42,4091	0,127793
Gamma	2	38,0831	0,159087
Weibull	2	37,5544	0,154276
Exponencial	1	37,4964	0,147501
Valor Extremo Más Grande	2	32,0008	0,149829
Laplace	2	28,6158	0,226981
Logística	2	23,6873	0,215681
Normal	2	16,4391	0,281334
Uniforme	2	14,8573	0,629976
Valor Extremo Más Chico	2	3,65308	0,330188
Pareto	1	-4,97E11	1,0

Tabla 79. Comparación entre distribuciones para DUR E2.

Esta tabla compara la bondad de ajuste cuando varias distribuciones se ajustan a DUR E2.

De acuerdo con el estadístico log verosimilitud, la distribución de mejor ajuste es la distribución Gaussiana Inversa, aunque se ha utilizado una distribución Lognormal debido a que Witness carece de la distribución Gaussiana Inversa (véase Figura 134).

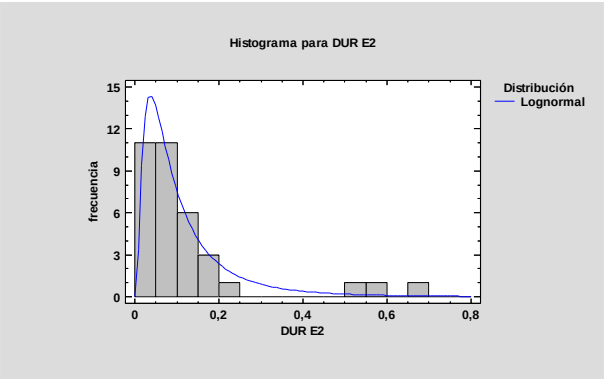

Figura 134. Distribución asociada a DUR E2.

Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - TEP F2

- Datos/Variable: TEP F2
- 42 valores con rango desde 0,07 a 2210,52
- Distribución Ajustada: **Lognormal.**
    - Media= 242, 524.
    - Desviación estándar= 5716, 11

Este análisis muestra los resultados de ajustar una distribución lognormal a los datos de TEP F2. Los parámetros estimados para la distribución ajustada se muestran arriba.

Pruebas de Bondad-de-Ajuste para TEP F2

Prueba de Kolmogorov-Smirnov (véase Tabla 80).

	Lognormal
DMAS	0,0972934
DMENOS	0,109328
DN	0,109328
Valor-P	0,696995

Tabla 80. Prueba de Kolgomorov-Smirnov para TEP F2.

Esta ventana muestra los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si TEP F2 puede modelarse adecuadamente con una distribución lognormal.

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que TEP F2 proviene de una distribución lognormal con 95% de confianza.

Comparación de Distribuciones Alternas

En este apartado se comparan diferentes distribuciones estadísiticas calculando el logaritmo de verosimilitud, para observer cuál es la que mas se asemeja a los datos introducidos (véase Tabla 81).

Distribución	*Parámetros Est.*	*Log Verosimilitud*	*KS D*
Lognormal	2	-195,69	0,109328
Loglogística	2	-196,76	0,117475
Weibull	2	-196,805	0,0942408
Birnbaum-Saunders	2	-198,969	0,139804
Gamma	2	-201,375	0,141879
Gaussiana Inversa	2	-211,651	0,371465
Exponencial	1	-238,933	0,413736
Laplace	2	-266,775	0,448594
Valor Extremo Más Grande	2	-267,079	0,277815
Logística	2	-280,173	0,367363
Normal	2	-305,371	0,378781
Uniforme	2	-323,44	0,823159
Pareto	1	-1,E9	0,238095
Valor Extremo Más Chico	<sin ajuste>		

Tabla 81. Comparación entre distribuciones para TEP F2.

Esta tabla compara la bondad de ajuste cuando varias distribuciones se ajustan a TEP F2.

De acuerdo con el estadístico log verosimilitud, la distribución de mejor ajuste es la distribución lognormal (véase Figura 135).

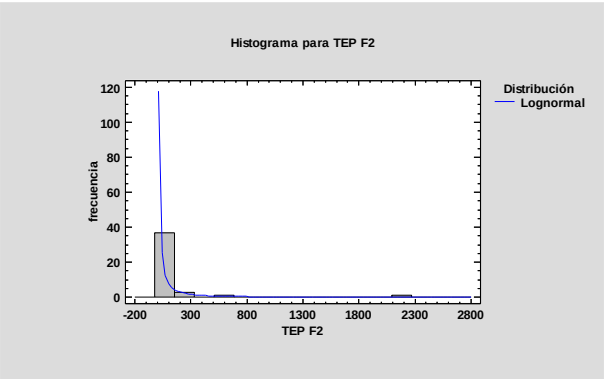

Figura 135. Distribución asociada a TEP F2.

Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - DUR F2

- Datos/Variable: DUR F2
- 43 valores con rango desde 0,0103333 a 0,441167
- Distribución Ajustada: **Lognormal.**
    - Media= 0, 0840625.
    - Desviación estándar= 0, 0636293.

Este análisis muestra los resultados de ajustar 2 distribuciones a los datos en DUR F2. Los parámetros estimados de las distribuciones ajustadas se muestran arriba.

Pruebas de Bondad-de-Ajuste para DUR F2

Prueba de Kolmogorov-Smirnov (véase Tabla 82).

	Lognormal	*Normal*
DMAS	0,0807693	0,209092
DMENOS	0,0798087	0,195611
DN	0,0807693	0,209092
Valor-P	0,941775	0,046574

Tabla 82. Prueba de Kolgomorov-Smirnov para DUR F2.

Esta ventana muestra los resultados de las pruebas realizadas para determinar si DUR F2 puede ser modelada adecuadamente por varias distribuciones.

Valores-P menores que 0,05 indicarían que DUR F2 no proviene de la distribución seleccionada con 95% de confianza.

Comparación de Distribuciones Alternas

En este apartado se comparan diferentes distribuciones estadísiticas calculando el logaritmo de verosimilitud, para observer cuál es la que mas se asemeja a los datos introducidos (véase Tabla 83).

Distribución	*Parámetros Est.*	*Log Verosimilitud*	*KS D*
Loglogística	2	73,8887	0,0642293
Lognormal	2	72,728	0,0807693
Gaussiana Inversa	2	71,8865	0,0909377
Birnbaum-Saunders	2	71,5015	0,0902551
Gamma	2	69,0174	0,129205
Valor Extremo Más Grande	2	67,8766	0,136193
Weibull	2	66,2836	0,135545
Laplace	2	63,1196	0,180717
Exponencial	1	62,7512	0,24074
Logística	2	59,7649	0,157097
Normal	2	49,6598	0,209092
Uniforme	2	36,2075	0,616365
Valor Extremo Más Chico	2	30,3573	0,322689
Pareto	1	-4,97E11	1,0

Tabla 83. Comparación entre distribuciones para DUR F2.

Esta tabla compara la bondad de ajuste cuando varias distribuciones se ajustan a DUR F2.

De acuerdo con el estadístico log verosimilitud, la distribución de mejor ajuste es la distribución Loglogística, aunque se ha utilizado una ditribución Lognormal debido a que Witness carece de una distribución Loglogísitica (véase Figura 136).

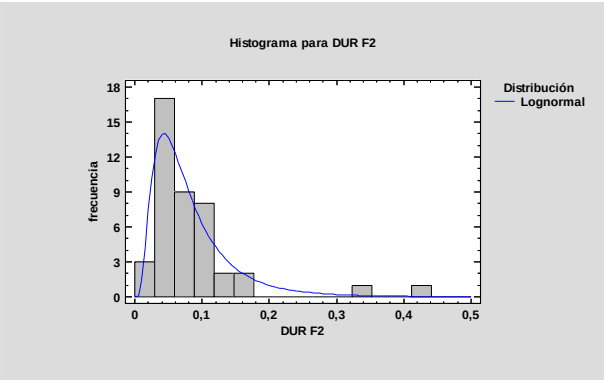

Figura 136. Distribución asociada a DUR F2.

Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - TEP G2

- Datos/Variable: TEP G2
- 109 valores con rango desde 0,0 a 734,06
- Distribución Ajustada: **Exponencial.**
    - Media= 57, 8999.

Este análisis muestra los resultados de ajustar una distribución exponencial a los datos de TEP G2. Los parámetros estimados para la distribución ajustada se muestran arriba.

Pruebas de Bondad-de-Ajuste para TEP G2

Prueba de Kolmogorov-Smirnov (véase Tabla 84).

	Exponencial
DMAS	0,297349
DMENOS	0,076225
DN	0,297349
Valor-P	8,51284E-9

Tabla 84. Prueba de Kolgomorov-Smirnov para TEP G2.

Esta ventana muestra los resultados de pruebas realizadas para determinar si TEP G2 puede modelarse adecuadamente con una distribución exponencial.

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es menor a 0,05, se puede rechazar la idea de que TEP G2 proviene de una distribución exponencial con 95% de confianza, pero como se mostrará a continuación, es la distribución que mas se ajusta a los datos introducidos.

Comparación de Distribuciones Alternas

En este apartado se comparan diferentes distribuciones estadísiticas calculando el logaritmo de verosimilitud, para observer cuál es la que mas se asemeja a los datos introducidos (véase Tabla 85).

Distribución	*Parámetros Est.*	*Log Verosimilitud*	*KS D*
Exponencial	1	-551,4	0,297349
Valor Extremo Más Grande	2	-606,582	0,22379
Laplace	2	-619,487	0,389521
Logística	2	-632,263	0,280472
Normal	2	-654,752	0,278818
Uniforme	2	-719,246	0,678041
Lognormal	2	-1,E9	0,223362
Weibull	2	-1,E9	0,78889
Gamma	2	-1,E9	1,0
Pareto	1	-1,E9	0,787458
Gaussiana Inversa	2	-4,97E11	0,990826
Loglogística	2	-4,97E11	
Birnbaum-Saunders	<sin ajuste>		
Valor Extremo Más Chico	<sin ajuste>		

Tabla 85. Comparación entre distribuciones para TEP G2.

Esta tabla compara la bondad de ajuste cuando varias distribuciones se ajustan a TEP G2.

De acuerdo con el estadístico log verosimilitud, la distribución de mejor ajuste es la distribución exponencial (véase Figura 137).

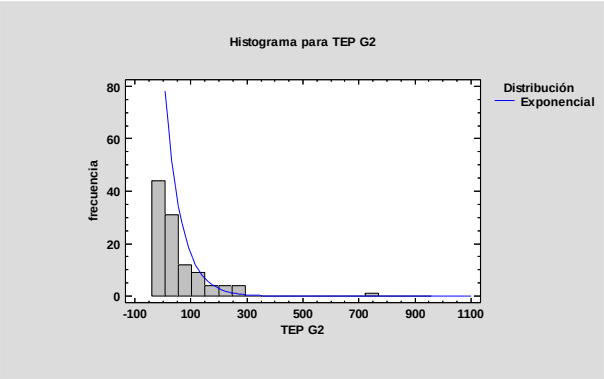

Figura 137. Distribución asociada a TEP G2.

Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - DUR G2

- Datos/Variable: DUR G2
- 110 valores con rango desde 0,00955 a 1,03838
- Distribución Ajustada: **Lognormal.**
  - Media= 0, 102943.
  - Desviación estándar= 0, 106409.

Este análisis muestra los resultados de ajustar una distribución lognormal a los datos de DUR G2. Los parámetros estimados para la distribución ajustada se muestran arriba.

Pruebas de Bondad-de-Ajuste para DUR G2

Prueba de Kolmogorov-Smirnov (véase Tabla 86).

	Lognormal
DMAS	0,0619017
DMENOS	0,0471386
DN	0,0619017
Valor-P	0,793204

Tabla 86. Prueba de Kolgomorov-Smirnov para DUR G2.

Esta ventana muestra los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si DUR G2 puede modelarse adecuadamente con una distribución lognormal.

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que DUR G2 proviene de una distribución lognormal con 95% de confianza.

Comparación de Distribuciones Alternas

En este apartado se comparan diferentes distribuciones estadísiticas calculando el logaritmo de verosimilitud, para observer cuál es la que mas se asemeja a los datos introducidos (véase Tabla 87).

Distribución	*Parámetros Est.*	*Log Verosimilitud*	*KS D*
Loglogística	2	152,181	0,0540778
Lognormal	2	152,035	0,0619017
Gaussiana Inversa	2	151,859	0,0807163
Birnbaum-Saunders	2	149,691	0,0939898
Gamma	2	138,574	0,106691
Weibull	2	135,998	0,11716
Exponencial	1	135,44	0,142533
Valor Extremo Más Grande	2	123,627	0,106982
Laplace	2	110,914	0,202005
Logística	2	99,6975	0,181498
Normal	2	64,6074	0,23689
Uniforme	2	-3,1268	0,743785
Pareto	1	-4,97E11	1,01439
Valor Extremo Más Chico	<sin ajuste>		

Tabla 87. Comparación entre distribuciones para DUR G2.

Esta tabla compara la bondad de ajuste cuando varias distribuciones se ajustan a DUR G2.

De acuerdo con el estadístico log verosimilitud, la distribución de mejor ajuste es la distribución Loglogística, aunque se ha utilizado una Lognormal debido a que Witness carece de una distribucióm Loglogística (véase Figura 138) .

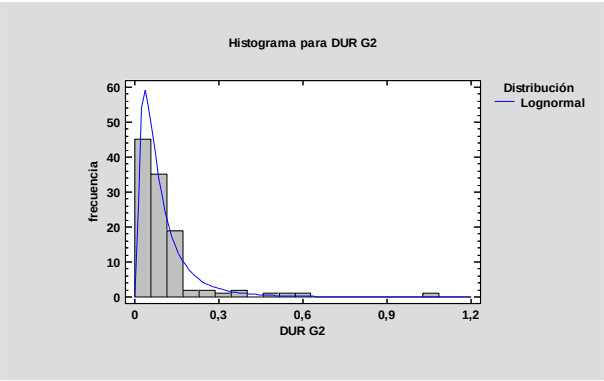

Figura 138. Distribución asociada a DUR G2.

Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - TEP G0

- Datos/Variable: TEP G0
- 10 valores con rango desde 0,27 a 2206,68

- Distribución Ajustada: **Weibull.**
  - Forma= 0, 486603.
  - Escala= 335, 206.

Este análisis muestra los resultados de ajustar una distribución Weibull a los datos de TEP G0. Los parámetros estimados para la distribución ajustada se muestran arriba.

Pruebas de Bondad-de-Ajuste para TEP G0

Prueba de Kolmogorov-Smirnov (véase Tabla 88).

	Weibull
DMAS	0,147203
DMENOS	0,138774
DN	0,147203
Valor-P	0,981864

Tabla 88. Prueba de Kolgomorov-Smirnov para TEP G0.

Esta ventana muestra los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si TEP G0 puede modelarse adecuadamente con una distribución Weibull.

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que TEP G0 proviene de una distribución Weibull con 95% de confianza.

Comparación de Distribuciones Alternas

En este apartado se comparan diferentes distribuciones estadísiticas calculando el logaritmo de verosimilitud, para observer cuál es la que mas se asemeja a los datos introducidos (véase Tabla 89).

Distribución	*Parámetros Est.*	*Log Verosimilitud*	*KS D*
Birnbaum-Saunders	2	-68,0312	0,304313
Gamma	2	-68,0643	0,126877
Weibull	2	-68,6437	0,147203
Lognormal	2	-70,049	0,197605
Loglogística	2	-70,1234	0,157923
Exponencial	1	-73,5544	0,259961
Uniforme	2	-76,9912	0,483676
Valor Extremo Más Grande	2	-77,8442	0,223803
Gaussiana Inversa	2	-78,2925	0,583306
Laplace	2	-79,4925	0,307904
Logística	2	-79,8705	0,243746
Normal	2	-80,0617	0,251127
Valor Extremo Más Chico	2	-82,1072	0,274625
Pareto	1	-1,E9	0,330607

Tabla 89. Comparación entre distribuciones para TEP G0.

Esta tabla compara la bondad de ajuste cuando varias distribuciones se ajustan a TEP G0.

De acuerdo con el estadístico log verosimilitud, la distribución de mejor ajuste es la distribución Birnbaum-Saunders, aunque se ha utilizado una distribución Weibull debido a que Witness carece de la distribución Birnbaum-Saunders (véase Figura 139).

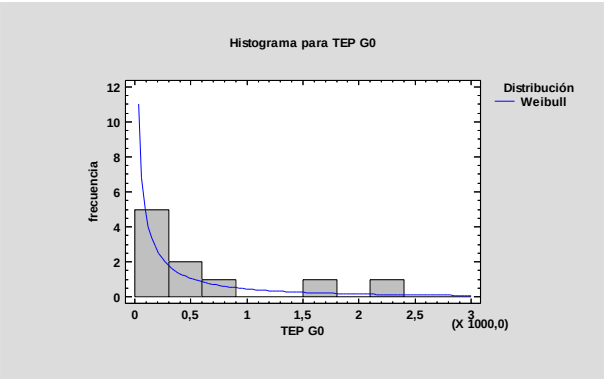

Figura 139. Distribución asociada a TEP G0.

Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - DUR GO

- Datos/Variable: DUR GO
- 11 valores con rango desde 0,00625 a 0,0908667
- Distribución Ajustada= **Uniforme.**
    - Límite inferior= 0, 00625.
    - Límite superior= 0, 0908667.

Este análisis muestra los resultados de ajustar una distribución Uniforme a los datos de DUR GO. Los parámetros estimados para la distribución ajustada se muestran arriba.

Pruebas de Bondad-de-Ajuste para DUR GO

Prueba de Kolmogorov-Smirnov (véase Tabla 90).

	Uniforme
DMAS	0,22567
DMENOS	0,0909091
DN	0,22567
Valor-P	0,629755

Tabla 90. Prueba de Kolgomorov-Smirnov para DUR G0.

Esta ventana muestra los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si DUR GO puede modelarse adecuadamente con una distribución Uniforme.

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que DUR GO proviene de una distribución Uniforme con 95% de confianza.

Comparación de Distribuciones Alternas

En este apartado se comparan diferentes distribuciones estadísiticas calculando el logaritmo de verosimilitud, para observer cuál es la que mas se asemeja a los datos introducidos (véase Tabla 91).

Distribución	*Parámetros Est.*	*Log Verosimilitud*	*KS D*
Uniforme	2	27,1659	0,22567
Weibull	2	24,6861	0,144361
Gamma	2	24,5377	0,133382
Birnbaum-Saunders	2	24,2188	0,169201
Lognormal	2	23,9658	0,148957
Gaussiana Inversa	2	23,9095	0,18042
Valor Extremo Más Grande	2	23,9049	0,158207
Loglogística	2	23,6198	0,138447
Normal	2	23,5791	0,184847
Exponencial	1	23,4002	0,15576
Logística	2	23,0361	0,180163
Valor Extremo Más Chico	2	22,8871	0,198558
Laplace	2	21,9411	0,182327
Pareto	1	-4,97E11	1,0

Tabla 91. Comparación entre distribuciones para DUR G0.

Esta tabla compara la bondad de ajuste cuando varias distribuciones se ajustan a DUR GO.

De acuerdo con el estadístico log verosimilitud, la distribución de mejor ajuste es la distribución Uniforme (véase Figura 140).

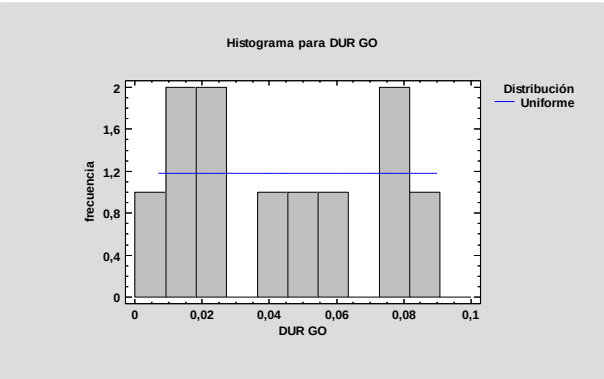

Figura 140. Distribución asociada a DUR G0.

Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - TEP G1

- Datos/Variable: TEP G1
- 109 valores con rango desde 0,03 a 2210,61
- Distribución Ajustada: **Weibull.**
    - Forma= 0, 445927.
    - Escala= 28, 6463.

Este análisis muestra los resultados de ajustar una distribución Weibull a los datos de TEP G1. Los parámetros estimados para la distribución ajustada se muestran arriba.

Pruebas de Bondad-de-Ajuste para TEP G1

Prueba de Kolmogorov-Smirnov (véase Tabla 92).

	Weibull
DMAS	0,0535808
DMENOS	0,0552646
DN	0,0552646
Valor-P	0,893219

Tabla 92. Prueba de Kolgomorov-Smirnov para TEP G1.

Esta ventana muestra los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si TEP G1 puede modelarse adecuadamente con una distribución Weibull.

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que TEP G1 proviene de una distribución Weibull con 95% de confianza.

Comparación de Distribuciones Alternas

En este apartado se comparan diferentes distribuciones estadísiticas calculando el logaritmo de verosimilitud, para observer cuál es la que mas se asemeja a los datos introducidos (véase Tabla 93).

Distribución	Parámetros Est.	Log Verosimilitud	KS D
Weibull	2	-487,187	0,0552646
Lognormal	2	-488,214	0,0961396
Birnbaum-Saunders	2	-488,267	0,147145
Loglogística	2	-491,486	0,0877486
Gamma	2	-493,89	0,101178
Gaussiana Inversa	2	-536,781	0,401427
Exponencial	1	-581,835	0,384187
Valor Extremo Más Grande	2	-648,252	0,267227
Laplace	2	-653,414	0,431003
Logística	2	-678,758	0,33246
Normal	2	-747,585	0,370451
Uniforme	2	-839,41	0,839674
Pareto	1	-1,E9	0,247706
Valor Extremo Más Chico	<sin ajuste>		

Tabla 93. Comparación entre distribuciones para TEP G1.

Esta tabla compara la bondad de ajuste cuando varias distribuciones se ajustan a TEP G1.

De acuerdo con el estadístico log verosimilitud, la distribución de mejor ajuste es la distribución Weibull (véase Figura 141).

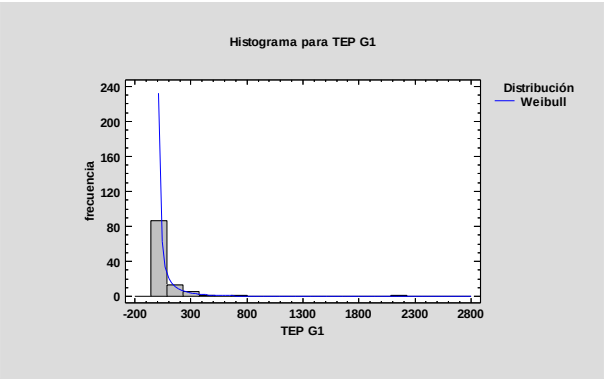

Figura 141. Distribución asociada a TEP G1.

Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - DUR G1

- Datos/Variable: DUR G1
- 110 valores con rango desde 0,0012 a 7,26622
- Distribución Ajustada: **Lognormal.**
  - Media= 0, 119044.
  - Desviación estándar= 0, 133414.

Este análisis muestra los resultados de ajustar una distribución lognormal a los datos de DUR G1. Los parámetros estimados para la distribución ajustada se muestran arriba.

Pruebas de Bondad-de-Ajuste para DUR G1

Prueba de Kolmogorov-Smirnov (véase Tabla 94).

	Lognormal
DMAS	0,120163
DMENOS	0,0984841
DN	0,120163
Valor-P	0,0834583

Tabla 94. Prueba de Kolgomorov-Smirnov para DUR G1.

Esta ventana muestra los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si DUR G1 puede modelarse adecuadamente con una distribución lognormal.

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que DUR G1 proviene de una distribución lognormal con 95% de confianza.

Comparación de Distribuciones Alternas

En este apartado se comparan diferentes distribuciones estadísiticas calculando el logaritmo de verosimilitud, para observer cuál es la que mas se asemeja a los datos introducidos (véase Tabla 95).

Distribución	*Parámetros Est.*	*Log Verosimilitud*	*KS D*
Loglogística	2	147,43	0,0617814
Lognormal	2	134,62	0,120163
Gaussiana Inversa	2	106,109	0,188831
Weibull	2	100,677	0,21568
Birnbaum-Saunders	2	95,9621	0,217044
Gamma	2	89,2841	0,263109
Exponencial	1	87,3448	0,286827
Laplace	2	49,1711	0,279424
Valor Extremo Más Grande	2	48,3553	0,280276
Normal	2	-114,678	0,405377
Uniforme	2	-218,138	0,926603
Logística	2	-322,962	0,495838
Pareto	1	-4,97E11	2,18654
Valor Extremo Más Chico	<sin ajuste>		

Tabla 95. Comparación entre distribuciones para DUR G1.

Esta tabla compara la bondad de ajuste cuando varias distribuciones se ajustan a DUR G1.

De acuerdo con el estadístico log verosimilitud, la distribución de mejor ajuste es la distribución Loglogística, aunque se ha utilizado una distribución Lognormal debido a que el Witness carece de la distribución Loglogísitca (véase Figura 142).

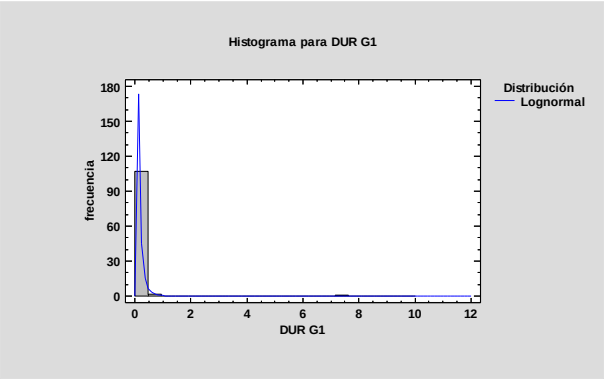

Figura 142. Distribución asociada a DUR G1.

Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - TEP H0

- Datos/Variable: TEP H0
- 6 valores con rango desde 0,35 a 6070,15
- Distribución Ajustada: **Lognormal.**
    - Media= 45795, 4.
    - Desviación estándar= 1, 46166E8

Este análisis muestra los resultados de ajustar una distribución lognormal a los datos de TEP H0. Los parámetros estimados para la distribución ajustada se muestran arriba.

Pruebas de Bondad-de-Ajuste para TEP H0

Prueba de Kolmogorov-Smirnov (véase Tabla 96).

	Lognormal
DMAS	0,264781
DMENOS	0,177632
DN	0,264781
Valor-P	0,794213

Tabla 96. Prueba de Kolgomorov-Smirnov para TEP H0.

Esta ventana muestra los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si TEP H0 puede modelarse adecuadamente con una distribución lognormal.

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que TEP H0 proviene de una distribución lognormal con 95% de confianza.

Comparación de Distribuciones Alternas

En este apartado se comparan diferentes distribuciones estadísiticas calculando el logaritmo de verosimilitud, para observer cuál es la que mas se asemeja a los datos introducidos (véase Tabla 97).

Distribución	*Parámetros Est.*	*Log Verosimilitud*	*KS D*
Lognormal	2	-32,3386	0,264781
Gaussiana Inversa	2	-32,4923	0,342037
Loglogística	2	-32,5848	0,260626
Weibull	2	-32,87	0,266315
Gamma	2	-33,3908	0,273073
Exponencial	1	-47,9117	0,643906
Laplace	2	-52,0674	0,494253
Uniforme	2	-52,2665	0,769643
Valor Extremo Más Grande	2	-52,4068	0,418343
Logística	2	-54,1998	0,380692
Normal	2	-54,8345	0,444836
Valor Extremo Más Chico	2	-56,3483	0,444375
Pareto	1	-1,E9	0,5
Birnbaum-Saunders	<sin ajuste>		

Tabla 97. Comparación entre distribuciones para TEP H0.

Esta tabla compara la bondad de ajuste cuando varias distribuciones se ajustan a TEP H0.

De acuerdo con el estadístico log verosimilitud, la distribución de mejor ajuste es la distribución Lognormal (véase Figura 143).

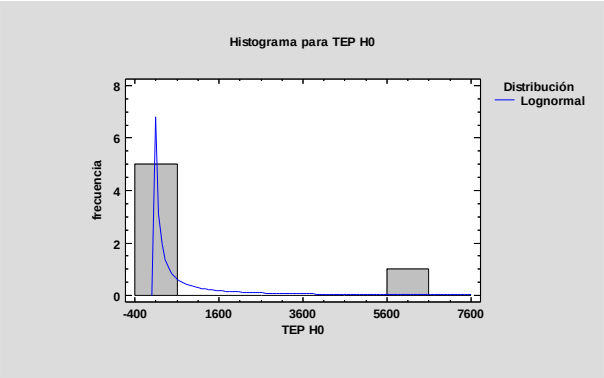

Figura 143. Distribución asociada a TEP H0.

Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - DUR H0

- Datos/Variable: DUR H0
- 6 valores con rango desde 0,0341333 a 0,31595
- Distribución Ajustada: **Uniforme.**
    - Límite inferior= 0, 0341333.

- Límite superior= 0, 31595.

Este análisis muestra los resultados de ajustar una distribución Uniforme a los datos de DUR H0. Los parámetros estimados para la distribución ajustada se muestran arriba.

Pruebas de Bondad-de-Ajuste para DUR H0

Prueba de Kolmogorov-Smirnov (véase Tabla 98).

	Uniforme
DMAS	0,379532
DMENOS	0,166667
DN	0,379532
Valor-P	0,356084

Tabla 98. Prueba de Kolgomorov-Smirnov para DUR H0.

Esta ventana muestra los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si DUR H0 puede modelarse adecuadamente con una distribución Uniforme.

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que DUR H0 proviene de una distribución Uniforme con 95% de confianza.

Comparación de Distribuciones Alternas

En este apartado se comparan diferentes distribuciones estadísiticas calculando el logaritmo de verosimilitud, para observer cuál es la que mas se asemeja a los datos introducidos (véase Tabla 99).

Distribución	*Parámetros Est.*	*Log Verosimilitud*	*KS D*
Uniforme	2	7,59899	0,379532
Birnbaum-Saunders	2	7,17623	0,181774
Gaussiana Inversa	2	7,15963	0,182066
Lognormal	2	6,92189	0,159516
Gamma	2	6,78605	0,193894
Weibull	2	6,7022	0,192371
Loglogística	2	6,64724	0,170125
Exponencial	1	6,28598	0,23243
Valor Extremo Más Grande	2	6,1704	0,219119
Normal	2	5,32621	0,213308
Logística	2	5,27265	0,199977
Laplace	2	4,91746	0,227653
Valor Extremo Más Chico	2	4,43133	0,222266
Pareto	1	-4,97E11	1,0

Tabla 99. Comparación entre distribuciones para DUR H0.

Esta tabla compara la bondad de ajuste cuando varias distribuciones se ajustan a DUR H0.

De acuerdo con el estadístico log verosimilitud, la distribución de mejor ajuste es la distribución Uniforme (véase Figura 144).

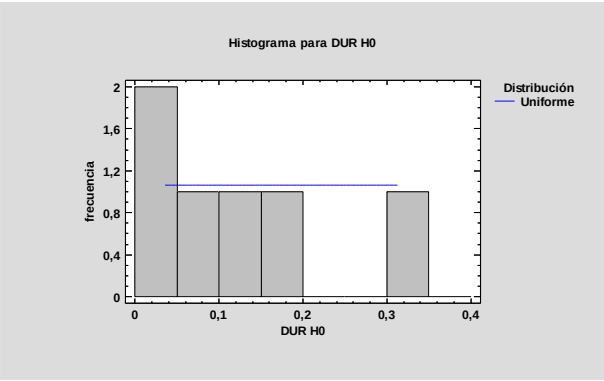

Figura 144. Distribución asociada a DUR H0.

Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - TdLL C

- Datos/Variable: TdLL C
- 11 valores con rango desde 0,0127778 a 0,0158333
- Distribución Ajustada: **Exponencial** .
  - Media= 0, 0105.

Este análisis muestra los resultados de ajustar una distribución Exponencial a los datos de TdLL C. Los parámetros estimados para la distribución ajustada se muestran arriba.

Pruebas de Bondad-de-Ajuste para TdLL C

Prueba de Kolmogorov-Smirnov (véase Tabla 100).

	Exponencial
DMAS	0,305976
DMENOS	0,615461
DN	0,615461
Valor-P	0,000480699

Tabla 100. Prueba de Kolgomorov-Smirnov para TdLL C.

Esta ventana muestra los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si TdLL C puede modelarse adecuadamente con una distribución Exponencial. Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es menor a 0,05, se puede rechazar la idea de que TdLL C proviene de una distribución Uniforme con 95% de confianza, pero

debido a los pocos datos obtenidos con el cronometraje, se utiliza la distribución que mejor se asemeja a los tiempos de llegada.

Comparación de Distribuciones Alternas

En este apartado se comparan diferentes distribuciones estadísiticas calculando el logaritmo de verosimilitud, para observer cuál es la que mas se asemeja a los datos introducidos (véase Tabla 101).

Distribución	*Parámetros Est.*	*Log Verosimilitud*	*KS D*
Valor Extremo Más Grande	2	67,6427	0,228837
Laplace	2	67,4607	0,247218
Loglogística	2	65,7031	0,207876
Logística	2	65,0838	0,210552
Uniforme	2	63,6987	0,65
Gaussiana Inversa	2	63,4745	0,32625
Birnbaum-Saunders	2	63,4741	0,326257
Lognormal	2	63,4567	0,325401
Gamma	2	63,2272	0,329418
Normal	2	62,6848	0,335397
Weibull	2	59,6528	0,35518
Valor Extremo Más Chico	2	58,8212	0,366583
Exponencial	1	36,4622	0,615461
Pareto	1	-4,97E11	1,0

Tabla 101. Comparación entre distribuciones para TdLL C.

Esta tabla compara la bondad de ajuste cuando varias distribuciones se ajustan a TdLL C.

De acuerdo con el estadístico log verosimilitud, la distribución de mejor ajuste es la distribución del Valor Extremo más grande, aunque se ha utilizado la Exponencial por los motivos anteriormente expuestos (Véase Figura 145).

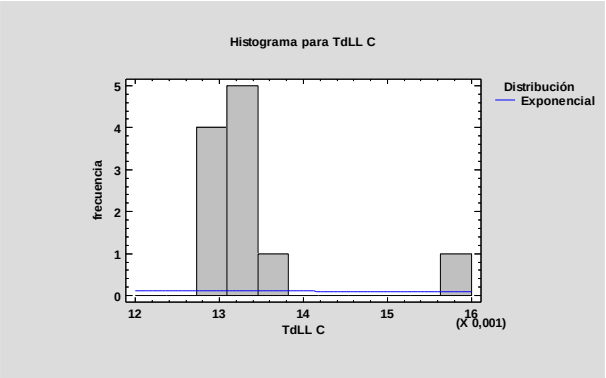

Figura 145. Distribución asociada a TdLL C.

Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - TdLL D

- Datos/Variable: TdLL D
- 11 valores con rango desde 0,0122222 a 0,0154306
- Distribución Ajustada: **Exponencial.**
    - Exponencial= 0 0105.

Este análisis muestra los resultados de ajustar una distribución Exponencial a los datos de TdLL D. Los parámetros estimados para la distribución ajustada se muestran arriba.

Pruebas de Bondad-de-Ajuste para TdLL D

Prueba de Kolmogorov-Smirnov (véase Tabla 102).

	Exponencial
DMAS	0,32052
DMENOS	0,593933
DN	0,593933
Valor-P	0,000852373

Tabla 102. Prueba de Kolgomorov-Smirnov para TdLL D.

Esta ventana muestra los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si TdLL D puede modelarse adecuadamente con una distribución Exponencial.

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es menor a 0,05, se puede rechazar la idea de que TdLL D proviene de una distribución Uniforme con 95% de confianza, pero debido a los pocos datos obtenidos con el cronometraje, se utiliza la distribución que mejor se asemeja a los tiempos de llegada.

Comparación de Distribuciones Alternas

En este apartado se comparan diferentes distribuciones estadísiticas calculando el logaritmo de verosimilitud, para observer cuál es la que mas se asemeja a los datos introducidos (véase Tabla 103).

Distribución	*Parámetros Est.*	*Log Verosimilitud*	*KS D*
Uniforme	2	63,162	0,396537
Valor Extremo Más Grande	2	58,7384	0,28964
Gaussiana Inversa	2	58,6096	0,29061
Birnbaum-Saunders	2	58,6095	0,290611
Gamma	2	58,584	0,290333
Lognormal	2	58,5797	0,279101
Normal	2	58,5008	0,278159
Weibull	2	58,2321	0,278504
Valor Extremo Más Chico	2	58,0362	0,273786
Loglogística	2	57,9162	0,277575
Logística	2	57,8638	0,275775
Laplace	2	56,6847	0,346359
Exponencial	1	36,3056	0,593933
Pareto	1	-4,97E11	1,0

Tabla 103. Comparación entre distribuciones para TdLL D.

Esta tabla compara la bondad de ajuste cuando varias distribuciones se ajustan a TdLL D.

De acuerdo con el estadístico log verosimilitud, la distribución de mejor ajuste es la distribución Uniforme, aunque se ha utilizado la Exponencial por los motivos anteriormente expuestos (Figura 146).

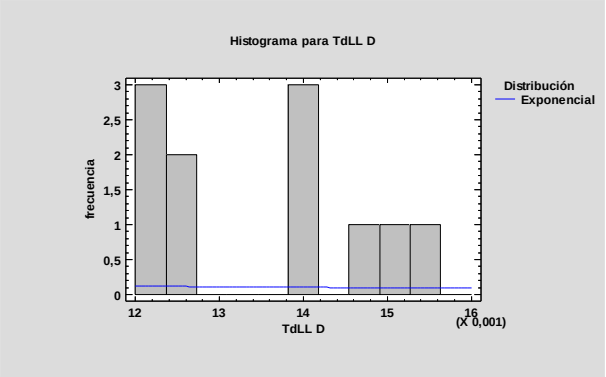

Figura 146. Distribución asociada a TdLL D.

Ajuste de Distribuciones (Ajuste de Datos No Censurados) - TdLL AB

- Datos/Variable: TdLL AB
- 11 valores con rango desde 0,0019 a 0,0026
- Distribución Ajustada: **Normal.**
  - Media= 0,00228485.
  - Desviación tipica= 0,000209424.

Este análisis muestra los resultados de ajustar una distribución Normal a los datos de TdLL AB. Los parámetros estimados para la distribución ajustada se muestran arriba.

Pruebas de Bondad-de-Ajuste para TdLL AB

Prueba de Kolmogorov-Smirnov (véase Tabla 104).

	Normal
DMAS	0,109392
DMENOS	0,256113
DN	0,256113
Valor-P	0,475515

Tabla 104. Prueba de Kolgomorov-Smirnov para TdLL AB.

Esta ventana muestra los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si TdLL AB puede modelarse adecuadamente con una distribución Normal.

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que TdLL AB proviene de una distribución Uniforme con 95% de confianza.

Comparación de Distribuciones Alternas

En este apartado se comparan diferentes distribuciones estadísiticas calculando el logaritmo de verosimilitud, para observer cuál es la que mas se asemeja a los datos introducidos (véase Tabla 105).

Distribución	*Parámetros Est.*	*Log Verosimilitud*	*KS D*
Uniforme	2	79,9087	0,298701
Weibull	2	78,476	0,204524
Valor Extremo Más Chico	2	78,4055	0,190959
Laplace	2	78,3407	0,227273
Normal	2	78,0743	0,256113
Gamma	2	77,9308	0,268694
Logística	2	77,9048	0,225615
Birnbaum-Saunders	2	77,8332	0,274383
Gaussiana Inversa	2	77,8328	0,274407
Lognormal	2	77,8071	0,271917
Loglogística	2	77,6796	0,234863
Valor Extremo Más Grande	2	76,8222	0,298931
Exponencial	1	55,896	0,564633
Pareto	1	-4,97E11	1,0

Tabla 105. Comparación entre distribuciones para TdLL AB.

Esta tabla compara la bondad de ajuste cuando varias distribuciones se ajustan a TdLL AB.

De acuerdo con el estadístico log verosimilitud, la distribución de mejor ajuste es la distribución Uniforme, pero se ha introducido una Normal para añadir mayor variabilidad (véase Figura 147).

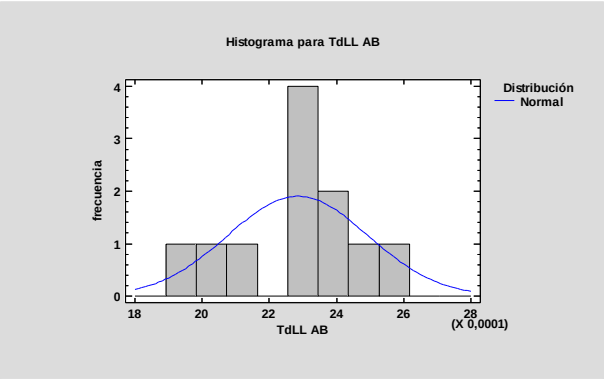

Figura 147. Distribución asociada a TdLL AB.