



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**  
**MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE SISTEMAS – INGENIERÍA INDUSTRIAL**

Balanceo de una estación de manufactura mediante simulación y optimización para  
minimizar su costo de operación

**TESIS**  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

**PRESENTA:**  
FABIO DANIEL CHAVES ALMANZA

**TUTORA DE TESIS:**  
M. I. ANN GODELIEVE WELLENS PURNAL  
Facultad de Ingeniería

Ciudad Universitaria, México, D. F. agosto 2017

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: DRA. IDALIA FLORES DE LA MOTA  
Secretario: DRA. HÉRICA SÁNCHEZ LARIOS  
Vocal: M. I. ANN GODELIEVE WELLENS PURNAL  
1<sup>er</sup>. Suplente: DRA. ESTHER SEGURA PÉREZ  
2<sup>do</sup>. Suplente: DRA. AIDA HUERTAS BARRIENTOS

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: CIUDAD DE MÉXICO, D. F.

**TUTORA DE TESIS:**

M. I. ANN GODELIEVE WELLENS PURNAL

-----  
**FIRMA**

## **DEDICATORIA**

A mi madre que por su maravillosa bondad fue grandioso y trascendental testimonio de virtud y con su inmenso amor fue motor para emprender grandes iniciativas en mi vida.

## **AGRADECIMIENTO**

El autor del presente trabajo expresa su agradecimiento a la empresa metalmecánica objeto de la presente investigación por apostarle a iniciativas innovadoras de la ingeniería y brindar los medios necesarios para lograr el éxito de este proyecto, a mi tutora por sus importantes aportes a lo largo de esta experiencia académica, profesional y personal, a la universidad por permitirme este camino formativo de rigores, vivencias y satisfacciones, a mi madre y mi hermano por su amor, su motivación e impulso, y a la Comisión Nacional de Ciencia y Tecnología de México, Conacyt, por su gran apoyo para la culminación decorosa de la maestría.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

Dedicatoria	1
Agradecimiento	2
Índice de contenido	3
Índice de tablas	6
Índice de figuras	8
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>9</b>
Resumen	9
Objetivos	9
Objetivo general	9
Objetivos específicos	9
Justificación de la investigación	10
Alcance	10
Hipótesis	11
<b>CAPÍTULO 1: Antecedentes</b>	<b>13</b>
1.1. Actividad productiva de la empresa	13
1.2. Estación de soldadura por presión	16
1.3. Problemática	17
<b>CAPÍTULO 2: Marco teórico y metodológico</b>	<b>20</b>
2.1. Marco teórico	20
2.1.1. Simulación	20
2.1.1.1. Enfoque general del estudio de sistemas con simulación	25
2.1.1.2. Tipos de simulación	25
2.1.1.3. Ventajas de la simulación	27
2.1.1.4. Desventajas de la simulación	27
2.1.2. El problema de asignación	28
2.1.2.1. Definición	29
2.1.2.2. Características	30
2.1.2.3. Métodos de solución	32
2.1.3. Simulación y optimización	34
2.1.3.1. Contexto global de aplicaciones	34
2.1.3.2. Aplicaciones en el contexto local	35
2.1.3.3. Problema general de simulación y optimización	36
2.1.4. Marco conceptual	36
2.1.4.1. Simulación	36
2.1.4.2. Optimización	37
2.1.4.3. Producción	38
2.1.5. Conceptos estadísticos	38

2.1.5.1. Correlación	39
2.1.5.2. Independencia	39
2.1.5.3. Pruebas de corridas	39
2.1.5.4. Prueba de bondad de ajuste <i>Anderson-Darling</i>	39
2.1.5.5. Prueba de bondad de ajuste <i>Kolmogorov-Smirnov</i>	40
2.2. Diseño metodológico	40
2.2.1. Metodología de investigación	41
2.2.2. Estudio de simulación	42
2.2.3. Modelo general de asignación	44
2.2.4. Estrategias de ejecución del proyecto de investigación	45
<b>CAPÍTULO 3: Estudio de simulación</b>	<b>52</b>
3.1. Medidas de desempeño	52
3.2. Estudio de caso y selección de la muestra	54
3.3. Supuestos	57
3.4. Recolección y análisis de datos	61
3.5. Modelo conceptual	66
3.6. Validación del modelo conceptual	70
3.7. Programación del modelo de simulación	72
3.7.1. Entidad	73
3.7.2. Locaciones	74
3.7.3. Arribos	75
3.7.4. Procesamiento	76
3.7.5. Atributos	77
3.7.6. Variables	78
3.7.7. Recursos	79
3.7.8. Turno de trabajo	80
3.7.9. Lógica de programación	81
3.7.10. Reporte de resultados	82
3.8. Validación del modelo programado	83
3.9. Resultados de simulación de la situación actual	91
<b>CAPÍTULO 4: Modelo de asignación</b>	<b>93</b>
4.1. Formulación del modelo	93
4.1.1. Función objetivo	94
4.1.2. Restricciones	94
4.1.2.1. Procesamiento de lote por máquina	95
4.1.2.2. Cantidad de lotes por máquina	95
4.1.2.3. Variable binaria, no negatividad	95
4.1.3. Matriz de costos	96
4.2. Solución óptima	99

<b>CAPÍTULO 5: Experimentos y resultados</b>	106
5.1. Descripción de escenarios	106
5.1.1. Escenario 1: propuesta de ingeniería	106
5.1.2. Escenario 2: propuesta 1 del proveedor	110
5.1.3. Escenario 3: propuesta 2 del proveedor	112
5.1.4. Escenario 4: combinación de opciones	114
5.2. Análisis de resultados	116
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	123
Conclusiones	123
Recomendaciones	125
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	127
<b>ANEXOS</b>	131
<b>ANEXO 1. Modelación de datos</b>	132
A1.1 Modelación de las entradas	132
A1.1.1 Procedimiento de análisis de correlación e independencia	132
A1.1.2 Procedimiento para la aproximación de distribuciones de probabilidad	133
A1.1.3 Procedimiento de pruebas de bondad de ajuste	134
A1.1.4 Procedimiento de exportación de distribuciones a <i>Promodel®</i>	135
A1.2 Modelación de las salidas	136
<b>ANEXO 2. Resultados de la modelación de datos</b>	138

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1	Estrategias para la realización de la investigación	45
Tabla 3.1	Descripción de partes del caso de estudio	55
Tabla 3.2	Alternativas de procesamiento para el caso de estudio	59
Tabla 3.3	Distribuciones de probabilidad de los datos de entrada: tiempos unitarios de operación	63
Tabla 3.4	Distribuciones de probabilidad de los datos de entrada: traslados	64
Tabla 3.5	Lista de chequeo de validación del modelo conceptual	70
Tabla 3.6	Lista de chequeo de verificación del modelo programado	84
Tabla 3.7	Muestra preliminar del tiempo promedio de un lote en la estación simulada	86
Tabla 3.8	Tiempo promedio de un lote en la estación simulada para 16 réplicas	87
Tabla 3.9	Muestra de 20 tiempos de procesamiento de un lote en la estación real de trabajo	88
Tabla 3.10	Prueba $t$ para dos muestras suponiendo varianzas desiguales	90
Tabla 3.11	Tiempo de operación de las máquinas para la situación actual de la estación de trabajo (horas)	91
Tabla 4.1	Costos de operación de las máquinas para las alternativas de procesamiento del proyecto de estudio (MXN\$)	96
Tabla 4.2	Costos de mano de obra para las alternativas de procesamiento del proyecto de estudio (MXN\$)	97
Tabla 4.3	Matriz de costos de operación (MXN\$)	98
Tabla 4.4	Asignación óptima de la carga de trabajo para la situación actual	101
Tabla 4.5	Horas-máquina en la asignación óptima de la carga de trabajo para la situación actual	102
Tabla 4.6	Horas-trabajador en la asignación óptima de la carga de trabajo para la situación actual	102
Tabla 4.7	Costos de operación en la asignación óptima de la carga de trabajo para la situación actual (MXN\$)	103
Tabla 4.8	Tiempos y costos totales óptimos de la situación actual de estación de trabajo	103
Tabla 4.9	Capacidad utilizada y días programados óptimos de la situación actual de estación de trabajo	104
Tabla 5.1	Cambios en los rendimientos de operación para el escenario 1	107
Tabla 5.2	Tiempos unitarios de operación para el escenario 1	107
Tabla 5.3	Matriz de costos para el escenario 1 (MXN\$)	108
Tabla 5.4	Asignación óptima de la carga de trabajo para el escenario 1	108
Tabla 5.5	Horas-máquina en la asignación óptima de la carga de trabajo para el escenario 1	109
Tabla 5.6	Horas-trabajador en la asignación óptima de la carga de trabajo para el escenario 1	109
Tabla 5.7	Costos de operación en la asignación óptima de la carga de trabajo para el escenario 1 (MXN\$)	110



Tabla 5.8	Horas-máquina en la asignación óptima de la carga de trabajo para el escenario 2	111
Tabla 5.9	Horas-trabajador en la asignación óptima de la carga de trabajo para el escenario 2	111
Tabla 5.10	Costos de operación en la asignación óptima de la carga de trabajo para el escenario 2 (MXN\$)	112
Tabla 5.11	Horas-máquina en la asignación óptima de la carga de trabajo para el escenario 3	113
Tabla 5.12	Horas-trabajador en la asignación óptima de la carga de trabajo para el escenario 3	113
Tabla 5.13	Costos de operación en la asignación óptima de la carga de trabajo para el escenario 3 (MXN\$)	114
Tabla 5.14	Horas-máquina en la asignación óptima de la carga de trabajo para el escenario 4	110
Tabla 5.15	Horas-trabajador en la asignación óptima de la carga de trabajo para el escenario 4	115
Tabla 5.16	Costos de operación en la asignación óptima de la carga de trabajo para el escenario 4 (MXN\$)	115
Tabla 5.17	Resumen de resultados relacionados con el tiempo de operación	116
Tabla 5.18	Resumen de resultados relacionados con el costo de operación (MXN\$)	119

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Componentes metálicos de sillas de automóvil manufacturados en la empresa: ensambles de silla	14
Figura 1.2	Componentes metálicos de sillas de automóvil manufacturados en la empresa: ensambles interiores	15
Figura 1.3	Componentes metálicos de sillas de automóvil manufacturados en la empresa: ensambles de precisión	15
Figura 1.4	Ejemplo de máquinas de la estación de soldadura por presión	17
Figura 2.1	Enfoque general del estudio de sistemas con simulación	25
Figura 2.2	Taxonomía de modelos de sistemas	26
Figura 2.3	Diagrama metodológico	41
Figura 2.4	Metodología para el desarrollo de estudios de simulación	43
Figura 3.1	Modelo conceptual del estudio de simulación	69
Figura 3.2	Modelo de simulación en ejecución	72
Figura 3.3	Entidad del modelo de simulación	74
Figura 3.4	Locaciones del modelo de simulación	75
Figura 3.5	Arribos del modelo de simulación	76
Figura 3.6	Secuencia de procesamiento del modelo de simulación	77
Figura 3.7	Atributos del modelo de simulación	78
Figura 3.8	Variables del modelo de simulación	79
Figura 3.9	Recursos del modelo de simulación	80
Figura 3.10	Turno de trabajo del modelo de simulación	81
Figura 3.11	Herramienta de construcción de lógica de programación	82
Figura 3.12	Aplicación para el reporte de los resultados de simulación	83
Figura 4.1	Composición del costo en la ejecución del proyecto de estudio para la situación actual	104
Figura 4.2	Capacidad utilizada y remanente en la ejecución del proyecto de estudio para la situación actual	105
Figura 5.1	Tiempos de operación de las máquinas y de mano de obra (horas) días programados y capacidad utilizada	117
Figura 5.2	Tiempo promedio de un lote en el sistema (horas)	117
Figura 5.3	Costos de operación (MXN\$)	118
Figura 5.4	Costos de implementación de mejoras y ahorro bruto (MXN\$)	119
Figura 5.5	Ahorro neto y marginal de las implementaciones de mejora	120
Figura 5.6	(MXN\$)	121
	Procedimiento de ingreso de series datos en <i>Statfit</i> ®	121
Figura A.1	Procedimiento de análisis de correlación e independencia de	132
Figura A.2	datos	133
Figura A.3	Procedimiento para la aproximación de distribuciones de probabilidad	133
	Procedimiento de pruebas de bondad de ajuste K-S y A-D	134
Figura A.4	Procedimiento de exportación de distribuciones a <i>Promodel</i> ®	135
Figura A.5	Procedimiento para una prueba <i>t</i> de medias suponiendo	136
Figura A.6	varianzas desiguales	137

# INTRODUCCIÓN

## RESUMEN

El presente trabajo consiste en el balanceo de una estación de soldadura por presión en una empresa metalmeccanica, utilizando simulación para predecir el rendimiento de la estación compuesta de diez máquinas, para luego obtener la asignación óptima de la carga de trabajo que genere el costo mínimo de operación, de acuerdo con los requerimientos de la demanda y las necesidades de configuración de las máquinas. El tiempo de operación de cada máquina se relaciona principalmente con la configuración requerida para cada nuevo producto a manufacturar. Los equipos de producción e ingeniería de la empresa están interesados en saber cuál sería el mejor rendimiento de la estación de trabajo al menor costo para futuros proyectos, considerando posibles mejoras en las configuraciones de las máquinas. De esta manera, se desarrolló un modelo de simulación para predecir el rendimiento de la estación de soldadura por presión, obteniendo los parámetros necesarios para optimizar el tiempo de operación de la estación de trabajo y así minimizar su costo de operación.

## OBJETIVOS

### Objetivo general

Minimizar el costo de operación de la estación de soldadura por presión en una empresa metalmeccánica, por medio de un estudio de simulación y un modelo de optimización que conlleven a una asignación balanceada de la carga de trabajo.

### Objetivos específicos

1. Definir un modelo conceptual, determinar las condiciones de aleatoriedad del sistema real que se representarán en el modelo de simulación y establecer los parámetros que permitirán calcular la asignación óptima de la carga de trabajo.
2. Desarrollar el modelo programado de simulación que permita aumentar el entendimiento del funcionamiento de la estación de trabajo, para un proyecto determinado.

3. Formular un modelo de asignación de la carga de trabajo, que minimice los costos de utilización de las máquinas, sumados a los costos de la mano de obra de la estación de trabajo.
4. Analizar y evaluar posibles escenarios a llevar a cabo para mejorar el rendimiento y el costo de operación de la estación de trabajo de soldadura por presión, en comparación con sus condiciones actuales de operación.
5. Establecer una propuesta de mejora enfocada en decidir la asignación óptima de la carga de trabajo sobre las 10 máquinas de la estación de trabajo para el caso de estudio, considerando el escenario más favorable entre las alternativas de mejora analizadas.

## **JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

El presente estudio aporta una investigación de carácter explicativo, que tiene el fin de proponer una solución óptima a un problema real de la industria metalmeccánica, mediante la generación de criterios técnicos cuantitativos y cualitativos en el campo de la modelación y la simulación, demostrando así el impacto positivo en la producción y el consecuente beneficio económico para la empresa objeto de estudio. Lo anterior es un caso novedoso de simulación y optimización aplicado en el sector de metalmeccánica.

## **ALCANCE**

En primer lugar, la presente investigación abarca el desarrollo de un estudio de simulación de carácter discreto considerando la producción por lotes y un modelo combinatorio de asignación, para representar la estación de trabajo del proceso de soldadura por presión, que es considerado el cuello de botella de la producción metalmeccánica de partes para sillas de automóviles, la cual en esta empresa también incluye procesos de troquelado (corte, doblado, estampado, marcado y rasurado), y ensamble (soldadura por arco, por puntos, MIG/MAG y por presión).

En términos más específicos, los modelos de simulación y optimización representan la estación de trabajo de 10 máquinas de soldadura por presión de la planta, estudiando el caso de un proyecto para la manufactura de 839,000 piezas correspondientes a 10 tipos de partes nuevas. Por lo anterior, el modelo de

optimización es un modelo de asignación equilibrado. Se considera también en el caso de estudio la dedicación de 4 maquinistas y 1 almacenista en un turno diario de 8 horas, con dos descansos diarios de 15 minutos cada uno y 1.5 horas de capacitación por semana.

El estudio de simulación permite predecir los tiempos de operación de las máquinas y los tiempos requeridos de mano de obra en diferentes escenarios factibles y óptimos de la ejecución del proyecto de estudio, mientras que el modelo de asignación permite determinar la asignación óptima de la carga de trabajo al mínimo costo, para la estación de trabajo en esos escenarios factibles. Sistémicamente, la investigación implica una relación recíproca entre ambos modelos en la medida en que las salidas de uno son las entradas del otro y viceversa, hasta encontrar soluciones óptimas.

En segundo lugar, particularmente en el estudio de simulación la longitud de la simulación está asociada a la ejecución completa del proyecto, es decir corresponde a la manufactura del volumen total de piezas de los 10 tipos de partes (839,000 unidades), que requiere el cliente. Esta longitud de simulación se asocia a cada réplica de la ejecución del modelo; el número de réplicas es de 16 y se calcula en la validación estadística del modelo programado de simulación. Adicionalmente, la construcción del modelo de simulación está sujeta a las características que ofrece el software PROMODEL® utilizado para tal fin; la versión empleada permite incluir hasta 20 locaciones, 8 tipos de entidades, 8 tipos de recursos y 5 atributos.

En tercer lugar, es muy importante resaltar la insistencia de la empresa donde se desarrolla la presente investigación con respecto al cumplimiento de sus lineamientos internos de confidencialidad, especialmente en la reserva de la identidad de la organización, la de sus trabajadores, clientes y proveedores, de manera que se protejan sus intereses frente a la competencia y el mercado en general. En este mismo sentido, se restringe también el nivel de detalle sobre cuestiones y decisiones técnicas adoptadas por la empresa a lo largo de la investigación, ya que son parte del conocimiento especializado de los expertos de la organización que manejan el proceso operativo objeto de estudio.

## **HIPÓTESIS**

La puesta en marcha del presente proyecto de investigación permite la aplicación sistémica de técnicas y tecnologías de la ingeniería industrial, como la modelación y la simulación, para mejorar el entendimiento del desempeño de una estación de

trabajo de soldadura por presión y así evaluar posibles escenarios a implementar en busca de un mayor rendimiento productivo, mediante la asignación óptima de la carga de trabajo para lograr el menor tiempo y por consiguiente el menor costo de operación.

# **CAPÍTULO 1**

## **ANTECEDENTES**

Siguiendo los lineamientos establecidos en las políticas de confidencialidad de la empresa, especialmente en relación con la reserva de la identidad de la organización, sus integrantes, sus clientes y sus proveedores, se presenta a continuación una descripción general del diagnóstico actual de su actividad productiva, su forma característica de operar y los problemas más relevantes que afronta, centrando luego la atención en el problema específico de la estación de soldadura por presión y las herramientas técnicas propuestas para lograr su resolución.

### **1.1. ACTIVIDAD PRODUCTIVA DE LA EMPRESA**

La empresa objeto de estudio en la presente investigación pertenece al sector de la producción metalmecánica de bienes, cuenta con más de 50 años de funcionamiento y su origen es extranjero. Tiene plantas de manufactura en el país de origen y en México, en vista del fuerte auge que la industria automotriz ha tenido en este país, ya que la mayor parte de los bienes que produce son componentes de sillas de automóviles. Las figuras 1.1, 1.2 y 1.3 muestran algunos ejemplos de estos componentes metálicos de sillas, manufacturados en la empresa.

Los clientes de la empresa son grandes multinacionales del sector automotriz de diversos orígenes, mientras que los proveedores de mantenimiento, configuración de las máquinas y elaboración de moldes de producción, son generalmente empresas locales.



Figura 1.1. Componentes metálicos de sillas de automóvil manufacturados en la empresa: ensambles de silla. Fuente: empresa metalmecánica (2016)





Figura 1.2. Componentes metálicos de sillas de automóvil manufacturados en la empresa: ensambles interiores. Fuente: empresa metalmecánica (2016)



Figura 1.3. Componentes metálicos de sillas de automóvil manufacturados en la empresa: ensambles de precisión. Fuente: empresa metalmecánica (2016)

La empresa se ha caracterizado por producir piezas metálicas con un alto nivel de calidad, lo cual le ha permitido generar cierto prestigio en el sector metalmecánico y ser preferida como proveedor por parte de grandes industrias automotrices de talla mundial.

Lograr este nivel de calidad en los productos es en gran medida consecuencia de un fuerte liderazgo y rigor en cuanto al cumplimiento de las políticas establecidas por la alta dirección, lo cual es característico de las empresas que como ésta fueron

gestadas como proyectos familiares. Esta condición del origen familiar de la empresa, ha beneficiado la calidad de los productos y resulta ser una ventaja en cuanto al manejo administrativo; la estructura organizacional tiende a ser horizontal y es menor la descentralización en la toma de decisiones. Sin embargo, esta misma circunstancia en ocasiones restringe la implementación de tecnologías y metodologías de avanzada, limitando la toma de decisiones a los criterios empíricos de los empleados más antiguos y generando renuencia frente al cambio de los paradigmas tradicionales de la organización.

De esta manera, los problemas más relevantes que la empresa afronta se centran en su parte operativa. Frente a altas demandas por parte de sus clientes, los modelos tradicionales son insuficientes para que la producción y logística puedan suministrar los volúmenes requeridos de partes en el tiempo adecuado. Ante este panorama se han identificado deficiencias logísticas en el manejo del material de empaque, pero más crítico aún es el lento ritmo de trabajo de la estación de soldadura por presión, que está generando retrasos en las demás operaciones y en general en el proceso global de producción.

Con el reciente ingreso de profesionales de gran bagaje académico y laboral, para cargos directivos de producción e ingeniería, se ha promovido un cambio cultural en la organización que ha permitido flexibilizar las viejas posturas de la forma tradicional de hacer las cosas, para adoptar nuevas metodologías de base científica y tecnológica que están optimizando el uso de los recursos y el rendimiento de los procesos.

## **1.2. ESTACIÓN DE SOLDADURA POR PRESIÓN**

Los procesos metalmecánicos empleados por la empresa para la producción son principalmente troquelados entre los que se incluye corte, doblado, estampado, marcado y rasurado, y procesos de ensamble como la soldadura por arco, por puntos, MIG/MAG y por presión. La soldadura es la unión de metales mediante la aplicación de calor o presión, con o sin la adición de otro metal apropiado. Específicamente, la soldadura por presión implica la aplicación tanto de calor como de presión, resultando en una macrodeformación del material base para producir coalescencia (Jeffus, 2011). El proceso de soldadura por presión se utiliza generalmente para fijar los pernos, tornillos, tuercas, remaches y/u otros elementos similares a partes metálicas más grandes, ensambles que se aprecian en las figuras 1.1, 1.2 y 1.3.

Esta actividad es una de las que mayor nivel de detalle requiere, y en consecuencia se ha convertido en el cuello de botella del proceso global de producción, siendo el proceso más lento que disminuye el rendimiento total de la planta. La infraestructura de la empresa para el proceso de soldadura por presión consiste en un conjunto de 10 máquinas relativamente nuevas, ninguna con más de 8 años de uso, provenientes de diferentes fabricantes y por consiguiente con diferentes necesidades de configuración y alistamiento.

La figura 1.4 muestra como ejemplo 2 máquinas representativas de las 10 máquinas de la estación de soldadura por presión que tienen una denominación alfanumérica y en su mayoría están ubicadas en el mismo sector de la planta, a una distancia aproximada de 50 metros de los almacenes de materiales y producto semiterminado.



Figura 1.4. Ejemplo de máquinas de la estación de soldadura por presión. Fuente: empresa metalmecánica (2016)

### 1.3. PROBLEMÁTICA

Dado el constante cambio en el diseño de los automóviles, los componentes deben ajustarse en consecuencia siguiendo las especificaciones definidas por los especialistas de diseño e ingeniería de las compañías de automóviles. Estas nuevas partes son manufacturadas por la fábrica metalmecánica y por cada parte se debe realizar una configuración especial de cada máquina, que usualmente consiste en elaborar el molde guía o nido de soldadura que fija la pieza a la máquina para el

procesamiento; además en la mayoría de casos se deben ajustar los cilindros o puntas de la máquina, generalmente la separación y posición entre ellas, lo cual resulta en dos o tres opciones de configuración de cada máquina.

Las 10 máquinas tiene especificaciones significativamente diferentes y no todas las partes nuevas pueden manufacturarse indistintamente en cada máquina, básicamente por restricciones asociadas con la obtención de los nidos de soldadura y el ajuste de las puntas, de manera que cada parte es factible de procesarse solo en algunas máquinas. De esta manera, dependiendo de los requerimientos de los clientes con respecto a la forma de las piezas, es posible configurar la máquina generalmente de dos o tres formas.

Por ejemplo, para unir dos tuercas a una lámina metálica, se podría operar la máquina una vez si se adhieren las dos tuercas al mismo tiempo, o dos veces si se adhiere una turca independientemente cada vez, dependiendo de qué tan adaptables son el nido de soldadura y las herramientas con relación a la forma de la pieza. Por supuesto, llevar a cabo la operación en dos pasos independientes incrementa el tiempo de operación además de generar un mayor gasto energético de la máquina y el trabajador, y en consecuencia el costo de operación de la estación de trabajo aumenta.

Así pues, como resultado de la ejecución de varios proyectos de la empresa se ha observado en la estación de soldadura por presión sobrecarga de trabajo en algunas máquinas y tiempos ociosos en otras, incurriendo en altos costos operativos y llevando a este proceso a ser el cuello de botella de la producción y por consiguiente el proceso crítico del cual depende el rendimiento global de la producción de la planta. De este problema surge la necesidad e importancia de la presente investigación a fin de balancear la estación de soldadura por presión, para mejorar su rendimiento y reducir los costos de operación.

De esta manera, a fin de aportar a la fábrica criterios de decisión significativos, la presente investigación propone la asignación de la carga de trabajo de un proyecto específico para balancear las máquinas de la estación de soldadura por presión, que genere un tiempo mínimo de operación y así un menor costo de operar la estación. Para lograr lo anterior, la capacidad utilizada de las máquinas es simulada mediante un modelo desarrollado en PROMODEL®, a partir de información de tomas de tiempos y datos históricos de la producción de partes similares para representar las condiciones actuales de la estación y diferentes escenarios correspondientes a posibles mejoras en la configuración de las máquinas.

Complementariamente, se formula en SOLVER® un modelo de programación lineal para balancear y optimizar la asignación de la carga de trabajo del proyecto, a fin de predecir la utilización óptima de las máquinas y los trabajadores de la estación de soldadura por presión, y así generar la configuración con el menor costo de operación de la estación para el proyecto de estudio.

## **CAPÍTULO 2**

### **MARCO TEÓRICO Y METODOLÓGICO**

De acuerdo con las herramientas técnicas propuestas para resolver el problema en la estación de soldadura por presión, en el presente capítulo se revisan los elementos teóricos necesarios para abordar y analizar el problema de interés. Asimismo, este capítulo presenta las bases metodológicas de estas herramientas técnicas para desarrollar una propuesta enfocada a la solución exitosa del problema.

#### **2.1 MARCO TEÓRICO**

##### **2.1.1 SIMULACIÓN**

La simulación ha demostrado ser una herramienta de mucha utilidad y por consiguiente muy usada en muy diversos campos del conocimiento. Actualmente, la modelación y la simulación son ampliamente usados en diferentes dominios de aplicación, desde la industria y la cadena de suministro hasta aplicaciones militares, aeroespaciales, de salud y bienestar, desde el diseño de sistemas complejos hasta el desarrollo de herramientas para la decisión (Longo, 2011). Permite modelar la alta complejidad de sistemas y procesos para lograr mejorar su entendimiento, control y desempeño, siendo muy favorable el costo bajo que asocia por permitir analizar escenarios sin tener que llevarlos a la práctica. Algunos tipos particulares de problemas para los cuales la simulación ha sido una herramienta muy útil y poderosa son:

- Diseño y análisis de sistemas de manufactura
- Evaluación de sistemas de armamento militar o sus requerimientos logísticos
- Determinación de los requerimientos de hardware o protocolos para redes de comunicación
- Determinación de los requerimientos de hardware y software para un sistema computarizado
- Diseño y operación de sistemas de transporte tales como aeropuertos, autopistas, metros y puertos
- Evaluación de diseños de organizaciones de servicio tales como call centers, restaurantes, hospitales y oficinas postales

- Reingeniería de procesos de negociación
- Determinación de políticas de pedido para un sistema de inventarios
- Análisis de sistemas financieros o económicos.

En el contexto de la industria y la cadena de suministro es significativamente compleja la continua necesidad de alcanzar niveles cada vez más altos de competitividad en el mercado global. En este escenario la modelación y la simulación son herramientas poderosas para el análisis, la investigación, examinación, observación y evaluación de sistemas reales de la industria y la logística (Longo, 2011).

Específicamente, en el sector de la manufactura la simulación ha cobrado gran importancia, con el incremento de la planeación y el control de la producción. Sobre este respecto, Jeon y Kim (2016) analizan que “el sector de la manufactura como un todo ha tenido importantes cambios en términos de escala, complejidad y tecnología a lo largo de las pasadas décadas, y esto aplica a la mayoría de industrias modernas de alta tecnología como es el caso de los dispositivos electrónicos, semiconductores, la industria automotriz y aeroespacial. A fin de mantener un nivel competitivo, los manufactureros tienen que generar productos de alta calidad a bajo costo, y al mismo tiempo mantener suficiente flexibilidad para afrontar eficientemente los cambios en la demanda de los consumidores. La planeación y el control de la producción (PPC por su sigla en inglés) es una pieza clave que le permite a los manufactureros ganar visión y control sobre todos los aspectos de las actividades de manufactura. PPC por si mismos constituyen un objeto de estudio, en el cual las técnicas de simulación han demostrado ser una de las más prácticas metodologías disponibles para investigar y evaluar aspectos de la manufactura.”

En este sentido, Jeon y Kim (2016) presentan el estado del arte de la aplicación de las técnicas de simulación en PPC, para demostrar su aplicabilidad a los tópicos de la manufactura moderna. Esta revisión incluye publicaciones de aplicaciones de simulación en manufactura desde 2002 hasta 2014, y cubre tres tipos de técnicas de simulación (dinámica de sistemas, simulación de eventos discretos y simulación basada en agentes), así como ocho aspectos de PPC (planeación de recursos de planta, planeación de capacidades, planeación de puestos, planeación de procesos, *scheduling*, manejo de inventario, diseño de procesos, compras y cadena de suministro).

De esta manera, en la revisión de la literatura se encuentra una gran cantidad de aplicaciones y usos de la simulación en el sector de la manufactura, dado que como se ha mencionado es una herramienta muy funcional y que implementarla tiene costos bajos. Con relación a la simulación de eventos discretos, Smith (2003) revisa y clasifica la literatura acerca del uso de simulación de eventos discretos en problemas de diseño y operación de sistemas de manufactura. Smith confirma que la simulación ha sido una herramienta ampliamente utilizada en el diseño y análisis de sistemas de manufactura por más de 30 años. Durante este periodo, la simulación ha demostrado ser una herramienta de análisis extremadamente útil, y varios cientos de artículos, *papers*, libros y conferencias se han enfocado directamente en este tema.

No obstante la marcada relevancia y utilización de la simulación en la industria manufacturera, el caso de simulación combinada con optimización específicamente en el sector de metalmeccánica es novedoso. Por este motivo, el presente trabajo se constituye en un pertinente precedente en el estudio de la manufactura metalmeccánica, desde la perspectiva de la simulación de eventos discretos y la optimización.

A continuación se revisan algunos enfoques de la definición de simulación y algunos aspectos fundamentales como el enfoque general del estudio de sistemas, la taxonomía de los modelos de sistemas y las ventajas y desventajas de la simulación.

Para comprender el concepto teórico del desarrollo de un estudio de simulación, se presentan algunas definiciones de simulación propuestas por diversos autores, de acuerdo con la publicación de Coss (2011):

- Shannon: Simulación es el proceso de diseñar y desarrollar un modelo de un sistema o proceso real y conducir experimentos con el propósito de entender el comportamiento del sistema o evaluar varias estrategias (dentro de límites impuestos por un criterio o conjunto de criterios) para la operación del sistema.
- Naylor: Simulación es una técnica numérica para conducir experimentos en una computadora digital. Estos experimentos comprenden ciertos tipos de relaciones matemáticas y lógicas, las cuales son necesarias para describir el comportamiento y la estructura de sistemas complejos del mundo real a través de largos periodos de tiempo.



- Maisel y Gnugnoli: Simulación es una técnica numérica para realizar experimentos en una computadora digital. Estos experimentos involucran ciertos tipos de modelos matemáticos y lógicos que describen el comportamiento de sistemas de negocios, económicos, sociales, biológicos, físicos o químicos a través de largos periodos de tiempo.

Adicionalmente, se citan otras dos discusiones en torno al concepto de simulación, destacadas en la literatura relacionada, las cuales son las deficiones empleadas en la presente investigación:

- Law (2015): Para estudiar un sistema científicamente la mayoría de las veces se configura un grupo de supuestos sobre su funcionamiento, los cuales usualmente toman la forma de relaciones matemáticas o lógicas y constituyen un modelo que es usado para lograr entendimiento de los correspondientes comportamientos del sistema. Si las relaciones que componen el modelo son suficientemente simples, es posible utilizar métodos matemáticos (como algebra, cálculo o teoría de la probabilidad) para obtener información exacta sobre las cuestiones de interés; esto se llama solución analítica. Sin embargo, muchos sistemas del mundo real son demasiado complejos para permitir que los modelos realistas sean evaluados analíticamente, y estos modelos deben ser estudiados por medio de simulación. En la simulación se usan ordenadores para evaluar un modelo numéricamente, y se recolectan datos a fin de estimar las características reales deseadas del modelo.
- Rodríguez & Bermúdez (1995): La simulación es una disciplina de la investigación de operaciones, mediante la cual se logra crear modelos que representan a sistemas del mundo real, especialmente en condiciones de aleatoriedad, sus reglas internas de funcionamiento, sus interacciones con el medioambiente y sus respuestas a diferentes estímulos (o entradas). La experimentación con el modelo de simulación tiene el objeto de entender y solucionar un problema específico que ha sido delimitado y comprendido por una organización. Los modelos, generalmente ejecutados en un computador, permiten comprimir o expandir el tiempo simulado para facilitar el análisis. Son importantes también las siguientes consideraciones para entender el concepto de simulación:

- Los modelos generados por la simulación son construidos de acuerdo con el problema específico que se quiere solucionar y dependen del equipo de personas que los diseña. Por lo tanto, pueden existir varios modelos de un sistema para el mismo problema. La simulación puede acelerar o hacer más lento el tiempo simulado de acuerdo con los objetivos de la simulación.
- La simulación permite entender un sistema, experimentar con sus entradas, predecir el comportamiento de las salidas, describir un sistema, evaluarlo y capacitar a las personas en su forma de operación.
- La simulación y sus modelos, como se conocen y usan hoy, se hace generalmente mediante el uso de computadoras u ordenadores digitales, razón por la cual se invoca con frecuencia como simulación digital y por la que requiere generalmente esfuerzos de diseño, programación y documentación en lenguajes de computadora.
- La simulación requiere del uso intensivo de técnicas matemáticas en general y estadísticas en particular.
- Por la variedad de campos de aplicación (sistemas de negocios, económicos, sociales, biológicos, físicos o químicos) en cada proyecto de simulación se requieren expertos en la materia objeto del estudio.
- El paradigma de la simulación es prever la respuesta del sistema a diferentes escenarios (¿qué pasaría si?).
- Un estudio de simulación puede ser costoso, pero debe responder las preguntas para las cuales fue desarrollado a un costo razonable, dentro del tiempo y costos pactados y sus productos deben ser válidos y validados.
- La simulación es una técnica de la Investigación de Operaciones, la cual a su vez es una rama interdisciplinaria de las matemáticas aplicadas.

### 2.1.1.1 Enfoque general del estudio de sistemas con simulación

El enfoque del estudio de sistemas es el fundamento que hace de la simulación una técnica efectiva y funcional con marcada relevancia. La figura 2.1 muestra el enfoque conceptual para conducir el estudio de un sistema a través de la simulación. Se infiere cómo la simulación permite una aproximación simplificada de un sistema real, ya que en vista de su complejidad y una especificación dinámica identificada, se puede elegir un paradigma que permita una abstracción resultante en una especificación simulable del sistema.

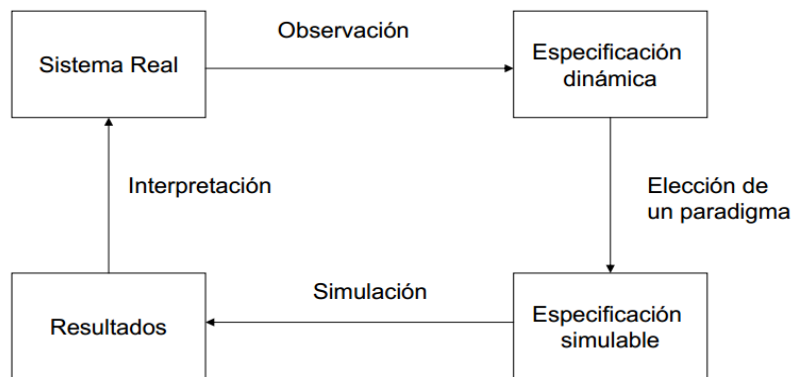


Figura 2.1. Enfoque general del estudio de sistemas con simulación. Fuente: Gómez & Cervantes (2012)

### 2.1.1.2 Tipos de simulación

La figura 2.2 presenta la clasificación de los modelos de sistemas en un contexto general, o lo que se denomina taxonomía de los modelos de sistemas. Para el caso del presente estudio, el modelo desarrollado es estocástico dinámico discreto, que corresponde a una simulación orientada a eventos discretos.

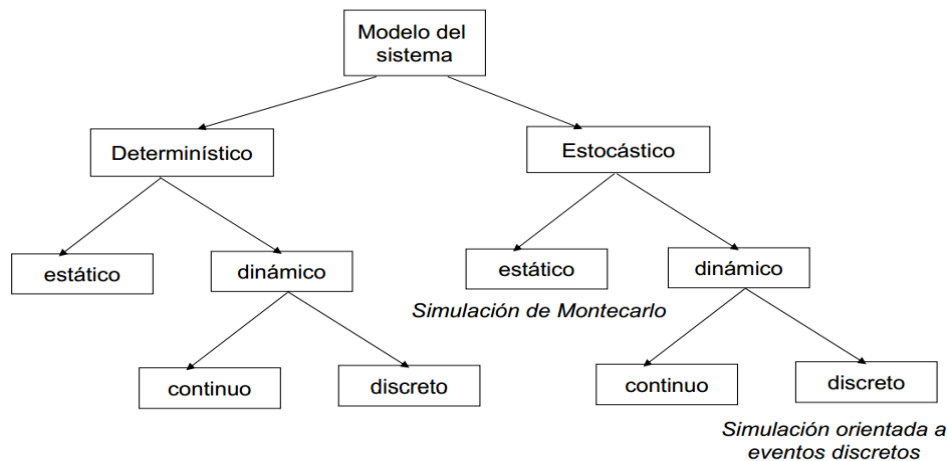


Figura 2.2. Taxonomía de modelos de sistemas. Fuente: Gómez & Cervantes (2012)

De acuerdo con esta taxonomía se observan tres categorías que relacionadas de múltiples maneras, caracterizan a la modelación y simulación de un sistema. Para definir cada categoría, es importante tener claridad sobre el tipo de simulación que se está abordando:

- Simulación estática vs. dinámica: ¿Juega el tiempo un papel en el modelo? La evolución temporal de las variables de estado es importante.
- Simulación de cambios continuos vs. cambios discretos: ¿Puede el “estado” cambiar continuamente o sólo cambiar en algunos instantes del tiempo? La evolución de las variables de estado ocurre asociada con eventos que se producen en determinados instantes de tiempo.
- Simulación determinística vs. estocástica: ¿Es todo cierto o existe incertidumbre? Al menos algunas variables de estado son aleatorias.

A la luz de lo anterior, es relevante revisar las ventajas y desventajas que se deben considerar para emprender un estudio de simulación. Por supuesto, dependiendo de las circunstancias de cada caso, se deben considerar unas más que otras y se tendrán diferentes cursos de acción que pueden mitigar las desventajas o potenciar las ventajas.

### **2.1.1.3 Ventajas de la simulación**

- En general la simulación se puede ver como un laboratorio de aprendizaje, fácil de modificar. Se puede experimentar con nuevos diseños sin que tengan que construirse.
- Específicamente mejora el funcionamiento de sistemas reales complejos, disminuye inversiones y gastos de operación, reduce el tiempo de desarrollo de un sistema, asegura que el sistema se comportará como se desea, permite conocer oportunamente hechos relevantes y efectuar cambios en el momento oportuno. A veces es lo único que se puede hacer para estudiar un sistema real (ya que no existe, se destruye y/o es muy caro).
- Un modelo de simulación puede ser más amplio y robusto con respecto a los cambios en las características de los parámetros de entrada que un modelo analítico que solo es válido bajo un conjunto de suposiciones.
- Brinda flexibilidad para modelar las cosas tal como son (no importa si son difíciles de explicar y complicadas).
- Permite comprender por qué, explorar posibilidades, diagnosticar problemas, modelar la incertidumbre (la única cosa segura es que nada es seguro).

### **2.1.1.4 Desventajas de la simulación**

Es importante tener presente que las desventajas de la simulación aplican o impactan en mayor o menor medida en una investigación dependiendo de cada caso. Adicionalmente, frente a cada una de estas desventajas existen medidas de contingencias que en la mayoría de casos permiten eliminarlas o mitigarlas.

- Construir modelos precisa conocimiento y entrenamiento especiales.
- Los resultados pueden ser difíciles de interpretar.
- En ocasiones son ignorados los factores humanos y tecnológicos.
- Puede resultar difícil verificar si los resultados son válidos (proceso de validación).

- Existe riesgo de poner demasiada confianza en los resultados de la simulación.
- Algunas veces técnicas mejores y más fáciles son pasadas por alto.

La relevancia actual de la simulación en la industria manufacturera, el fundamento del estudio de sistemas con simulación (donde radica dicha relevancia) y las ventajas de la simulación, son argumentos de base teórica que confirman que la simulación es un instrumento adecuado para abordar el problema en la fábrica metalmeccánica objeto de la presente investigación.

### **2.1.2 EL PROBLEMA DE ASIGNACIÓN**

Específicamente hablando sobre la implementación de modelos de asignación en problemas reales, en la revisión de la literatura se encuentran aplicaciones de estos modelos en diversos campos. En el caso de la industria, se observan aplicaciones en la cadena de suministro como el trabajo de Ruiz et al. (2012) que presenta un modelo de decisión para optimizar la asignación de la demanda a un grupo de proveedores, considerando las pérdidas esperadas debido a incumplimientos, costos de compra, costos imprevistos por faltas en las entregas de suministros y el costo de gestión de un conjunto de proveedores.

También, se encuentra un modelo de asignación aplicado en la cadena de abastecimiento (Pérez, 2006), que consiste en un software creado para precisar qué máquinas deben ser asignadas para los distintos pedidos proyectados de una empresa en un periodo determinado, de manera que se minimice el tiempo total de ejecución de los pedidos; el modelo es aplicable a todo sistema que requiera una programación asignando máquinas, personal, etc.

En el sector de la manufactura se encuentran aplicaciones como la propuesta de distribución en planta (Salazar et al., 2013), basado en un enfoque de dos fases para resolver el problema de conformación celular así como su distribución en planta para una pyme del sector metalmeccánico, comparando mediante el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) la perspectiva del grupo decisorio en la empresa respecto del tratamiento del flujo intercelular y de las distancias, obtenido por el uso de dos modelos de asignación para distribución en planta: el problema de asignación cuadrática (QAP) y el problema de asignación cuártica (QrAP).

Yendo un poco más allá, incursionando en metodologías de punta, se encuentra la aplicación de técnicas heurísticas en un problema de formación de lotes de fabricación en un sistema de manufactura flexible (Medina et al., 2009), para la asignación específica de operaciones y herramientas a máquinas.

### 2.1.2.1 Definición

Teniendo en cuenta que el problema de asignación es actualmente muy utilizado en aplicaciones de diversa índole, es importante discutir un poco acerca de la definición de este tipo de problema. El problema de asignación es uno de los ejemplos fundamentales de los problemas combinatorios en investigación de operaciones, y consiste en encontrar una correspondencia perfecta de mínimo peso en un grafo bipartita ponderado (Brualdi, 2006).

De acuerdo con Brualdi la forma original del problema fue publicada en 1941 por Frank Hitchcock, y consiste en que existe un número de agentes igual a un número de tareas, de manera que cualquier agente puede ser asignado para desarrollar cualquier tarea, contrayendo algún costo que puede variar según el agente y la tarea asignados. Es necesario, para desarrollar todas las tareas, asignar un solo agente a cada tarea para que el costo de asignación sea minimizado.

El problema de asignación es de tipo lineal y presenta una estructura similar al modelo de transporte, pero la oferta en cada origen y la demanda en cada destino son de valor uno. La restricción importante para cada agente es que debe ser asignado a una sola tarea.

La definición matemática formal del problema de asignación lineal es la siguiente y se resume en la ecuación (1): dados dos conjuntos,  $A$  y  $T$  de igual tamaño, juntos con una función de peso  $C: A \times T \rightarrow R$ , encontrar una biyección  $f: A \rightarrow T$  que minimice la función de costo:

$$\sum_{a \in A} C(a, f(a)) \quad (1)$$

Normalmente la función de peso es vista como una matriz cuadrada de valores reales  $C$ , por lo que la función de costos adopta la forma que se presenta en la ecuación (2):

$$\sum_{a \in A} C_{a,f(a)} \quad (2)$$

El problema de asignación es lineal porque esta función de costos a optimizar y todas las restricciones contienen solo términos lineales. Adicionalmente, el teorema fundamental de la asignación define que si a todos los elementos de una fila o de una columna de una matriz de costos se le suma o se le resta una cantidad constante, la asignación óptima no varía.

### 2.1.2.2 Características

Con el fin de ampliar los conceptos del problema de asignación, se describen a continuación las características más relevantes del problema, tomando como referencia la publicación de Taha (2012). El modelo de asignación clásico se ocupa de compaginar a los trabajadores (con diversas habilidades) con los trabajos. Presumiblemente, la variación de la habilidad afecta el costo de completar un trabajo. La meta es determinar la asignación de costo mínimo de los trabajadores a los trabajos. El modelo de asignación general con  $n$  trabajadores y  $n$  trabajos está representado en la ecuación 3.

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (3)$$

El elemento  $c_{ij}$  representa el costo de asignar el trabajador  $i$  al trabajo  $j$  ( $i$  y  $j = 1, 2, \dots, n$ ). Además la variable de decisión  $x_{ij}$  solo toma los valores cero y uno, por lo cual el modelo de asignación es binario.

No se pierde la generalidad al suponer que la cantidad de trabajadores y la de los trabajos son iguales, porque siempre podemos agregar trabajadores o trabajos ficticios para satisfacer esta suposición.

El modelo de asignación es un caso especial del modelo de transporte, donde los trabajadores representan los orígenes y los trabajos representan los destinos. La oferta (demanda) en cada origen (destino) es igual a 1. El costo de “transportar” al trabajador  $i$  al trabajo  $j$  es  $c_{ij}$ . De hecho, el modelo de asignación puede resolverse de forma directa como un modelo de transporte (o como un problema de programación lineal regular, usando el método simplex). Sin embargo, el hecho de que la oferta y la demanda sean iguales a 1 conduce al desarrollo de un algoritmo



de solución simple llamado método húngaro. Aunque este método parece totalmente ajeno al modelo de transporte, en realidad el algoritmo tiene su origen en el método simplex, al igual que el modelo de transporte.

De esta manera, un problema lineal de asignación puede ser representado de diferentes formas, a saber, que pueden ser complementarias entre si:

- **Modelo de programación lineal:** en este caso se plantea un modelo lineal donde la función objetivo es la definida en la ecuación (3) y la principal restricción es realizar una asignación uno a uno. Este modelo se resuelve con el clásico método simplex, entre otros métodos, para encontrar una solución factible y óptima, considerando la ocurrencia de resultados como soluciones múltiples, solución no acotada o que el problema no tenga solución.
- **Matriz de costos:** es la matriz cuadrada de  $n \times n$ , donde cada elemento representa el costo de asignar el  $n$ -simo trabajador al  $n$ -simo trabajo. Es la tabla donde se identifica, se evalúa y se cuantifica los beneficios económicos, costos y riesgos de los productos/servicios, después de definir la necesidad, el alcance y el alineamiento estratégico de los productos/servicios, y evaluando el beneficio total de la propiedad. Con la matriz de costos se demuestra el valor económico de la realización del producto/servicio asociado.
- **Tabla de transporte:** se puede utilizar esta forma de representar el problema de asignación por ser un caso especial del problema de transporte. Esta tabla es una matriz en la que las filas representan los orígenes, fuentes o trabajadores y las columnas los destinos, tareas o trabajos. Registra los coeficientes de costo como referencia para encontrar la solución iterando a partir de una solución inicial.

Adicionalmente, es importante mencionar algunas consideraciones relevantes acerca del problema de asignación. Cuando la oferta (trabajadores) y la demanda (trabajos) son desiguales y se asigna un trabajo o un trabajador, el costo asociado debe ser cero para mantener la condición de equilibrio entre oferta y demanda. El problema de maximización es aquel en el que la respuesta a cada asignación es una utilidad en vez de un costo; cada trabajador asocia un beneficio por la realización de cada trabajo. Los problemas con asignación inaceptable son aquellos que involucran asignaciones de entrada inaceptables, las cuales consisten en

valores arbitrarios muy grandes (si el problema es de minimización) que conduzcan a restringir la asignación.

### **2.1.2.3 Métodos de solución**

Acerca de los métodos de solución de los problemas de asignación, el método simplex es el más común y adecuado para resolverlos por tratarse de problemas de programación lineal, y junto con el método húngaro también muy reconocido, se ha observado que resuelven los problemas combinatorios de asignación en tiempo acotado por una expresión polinomial. Un complemento al método húngaro es el método de Flood, que se utiliza cuando el inicial no arroja soluciones. Otros algoritmos incluyen adaptaciones del algoritmo de subasta. Burkard et al. (2012) exponen una revisión detallada sobre los problemas de asignación. A continuación se presentan una breve descripción de los métodos más reconocidos y usados, con base en las definiciones propuestas por los autores citados; el método simplex (Taha, 2012), el método húngaro (Taha, 2012) y el método de Flood (Burkard et al., 2012).

#### Método simplex

Este proceso que se repite una y otra vez, siempre inicia en un punto extremo de la región factible que normalmente es el origen y en cada iteración se mueve a otro punto extremo adyacente hasta llegar a la solución óptima. Los pasos del método simplex son los siguientes:

1. Llevar el modelo del problema de asignación a la forma estándar, sumando o restando variables artificiales de holgura o de exceso, para expresar las restricciones como igualdades.
2. Determinar una solución básica factible inicial igualando las  $n-m$  variables (básicas) a cero (iniciar en el vértice correspondiente al origen).
3. Seleccionar entre las variables no básicas la variable de entrada que al incrementar su valor pueda mejorar el valor en la función objetivo. Cuando no exista esta situación, la solución actual es la óptima; si no, ir al siguiente paso.
4. Seleccionar la variable de salida de las variables básicas actuales.

5. Determinar la nueva solución al hacer la variable de entrada básica y la variable de salida no básica, ir al paso 3 (actualizar, siguiente iteración).

### Método húngaro

1. Encontrar el elemento más pequeño en cada fila de la matriz de costos  $n \times n$ . Construir una nueva matriz restando a cada costo el mínimo de cada fila. En esta nueva matriz identificar el mínimo costo de cada columna. Construir la matriz de costos reducidos, que se obtiene restando de cada costo el mínimo de cada columna.
2. Trazar el número mínimo de líneas que se requieren para cubrir todos los ceros en la matriz de costos reducidos. Si se necesitan  $n$  líneas para cubrir todos los ceros, se tiene una solución óptima entre los ceros cubiertos de la matriz. Si se requieren menos de  $n$  líneas para cubrir todos los ceros, se debe continuar con el paso 3. El número de líneas para cubrir los ceros es igual a la cantidad de asignaciones que hasta ese momento se pueden realizar.
3. Encontrar el menor elemento diferente de cero (llamado  $k$ ) en la matriz de costos reducidos, que no está cubierto por las líneas dibujadas en el paso 2, después restar  $k$  de cada elemento no cubierto de la matriz de costos reducidos y sumar  $k$  a cada elemento de la matriz de costos reducidos cubierto por dos líneas (intersecciones). Por último se debe regresar al paso 2.
4. En caso de no encontrar una solución factible con los pasos anteriores se debe aplicar entonces este:
  - Trazar el número mínimo de líneas horizontales y verticales en la última matriz reducida que cubrirá todas las entradas cero.
  - Seleccionar el elemento no cubierto más pequeño y restarlo de todos los elementos no cubiertos, después sumarlo a todos los elementos en la intersección de dos líneas.
  - Si no es posible encontrar una asignación factible entre las entradas cero resultantes, se debe repetir este paso, de lo contrario regresar al paso 3 para determinar la asignación óptima.

### Método de Flood

Este método es utilizado en aquellos casos donde no se ha podido hacer una asignación óptima después de haber aplicado el método húngaro. Consta de los siguientes pasos:

1. Señalar todas las filas que no tienen una asignación.
2. Señalar todas las columnas que tengan un cero en la columna señalada.
3. Señalar todas las filas que tienen una asignación en las columnas indicadas.
4. Repetir estos pasos hasta que no pueda señalarse más columnas o filas. Dibujar una línea por cada fila no señalada y por cada columna sí señalada.
5. Encontrar el mínimo valor de los elementos no cubiertos y restarlo a todos los elementos no cubiertos, y sumar este valor a cada elemento que se encuentre en la intersección de una línea horizontal con una línea vertical.
6. Realizar la asignación como en el método húngaro.

## **2.1.3 SIMULACIÓN Y OPTIMIZACIÓN**

### **2.1.3.1 Contexto global de aplicaciones**

Con relación a la aplicación conjunta de técnicas de simulación y optimización, lo más encontrado en la revisión de la literatura corresponde al campo de los procesos químicos, como por ejemplo los trabajos de Scenna et al. (2015), Puigjaner et al. (2006), Rodríguez et al. (2005) y Scenna (2009); así como en finanzas por ejemplo en la selección de portafolios (Torres et al., 2004) y la elaboración de modelos financieros (Gutierrez, 2009). Además, se encuentran aplicaciones en áreas de muy diversa índole, como por ejemplo la simulación y optimización de una planta de separación y estabilización de gas y condensados (Pan-Echeverría et al., 2009), y la optimización de sistemas logísticos mediante simulación basada en redes de Petri coloreadas (Narcizo et al., 2005).

Adicionalmente, se observan otros ejemplos como la optimización de los ensayos clínicos de fármacos mediante simulación de eventos discretos, su modelización,

validación, verificación y la mejora de la calidad de sus datos (Monleón, 2005), los algoritmos de optimización estructural basados en simulación genética (Cerroloza et al., 1996), la simulación matemática y optimización del secado de productos agropecuarios con aire natural y energía solar (Domínguez et al., 1983), y la simulación, optimización y resultados experimentales del prototipo de máquina de absorción de LiBr/H<sub>2</sub>O de doble efecto condensada por aire (Marcos, 2008). Sin embargo, no es fácil de encontrar en la literatura una aplicación conjunta de simulación y optimización en el sector de la manufactura, menos particularmente para el caso de la industria metalmecánica.

Por otra parte, Fu, Glover y April (2005) presentan una revisión general de los principales enfoques encontrados en la literatura acerca del uso conjunto de la simulación y optimización, incluyendo referencias del estado del arte, una comparación de *software* comercial y algunos ejemplos de aplicaciones reales. Se destaca como fundamento conceptual del uso conjunto de la simulación y optimización, el enfoque como problema general de optimización, donde la función objetivo a optimizar depende de parámetros que no están directamente disponibles sino que deben ser estimados mediante simulación.

### **2.1.3.2 Aplicaciones en el contexto local**

En el contexto local de México, donde opera la empresa objeto de estudio, se observan aplicaciones importantes en simulación y optimización. Lara (2016) realiza una aplicación logística de simulación y optimización para una estrategia de distribución de vacunas contra la A (H1N1), y Villareal (2011) propone la simulación y optimización de la cadena de suministro con programación lineal entera mixta.

Son destacables además dos aplicaciones relacionadas con la infraestructura de transporte de la Universidad Nacional Autónoma de México, la optimización de buses para el sistema Pumabus usando programación estocástica (Dorantes, 2013) y la localización óptima de ambulancias en Ciudad Universitaria empleando simulación (Vindel, 2015).

Adicionalmente en el campo de la producción, García (2013) propone una metodología para la planeación de la producción utilizando simulación y programación entera, que aplica como estudio de caso en una pyme del sector manufacturero del cuero y el calzado.

### 2.1.3.3 Problema general de simulación y optimización

Desde el enfoque de Fu, Glover y April (2005) el problema general de simulación y optimización consiste en encontrar una configuración de los parámetros controlables que minimice una función objetivo dada, esto es:

$$\min J(\theta), \theta \in \emptyset$$

Donde  $\theta \in \emptyset$  representa el vector de variables de entrada,  $J(\theta)$  es la función objetivo (escalar) y  $\emptyset$  es el conjunto de restricciones, el cual debe ser explícitamente dado o implícitamente definido.

El supuesto en la concepción del modelo de simulación y optimización es que  $J(\theta)$  no está directamente disponible y por consiguiente debe ser estimado mediante simulación, es decir, los resultados del estudio de simulación proveen  $\hat{J}(\theta)$  que es una estimación aproximada de  $J(\theta)$ . La forma más común para  $J$  es una expectativa, como se muestra en la ecuación (4):

$$J(\theta) = E[L(\theta, w)] \quad (4)$$

Donde  $w$  representa una iteración o réplica de la simulación, y  $L$  es la medida de desempeño. Esta forma de la función objetivo es muy general, por lo que puede incluir probabilidades con el uso de funciones indicadoras.

### 2.1.4 MARCO CONCEPTUAL

A fin de contextualizar acerca de los términos y conceptos técnicos involucrados en la investigación, específicamente relacionados con simulación, optimización y producción, se presentan a continuación definiciones generales de los términos más relevantes:

#### 2.1.4.1 Simulación

Las siguientes deficiones están basadas en los conceptos expuestos por Law (2015).

- Entidad: objeto u elemento centro de interés para el sistema considerado. Puede ser dinámica o estática.

- **Atributo:** propiedad de una entidad. Son valores que caracterizan a una entidad.
- **Estado:** conjunto de variables necesario para describir o caracterizar el sistema en cualquier instante, considerando los objetivos del estudio. La evolución de las variables de estado puede ser continua o producirse en determinados eventos.
- **Evento:** ocurrencia instantánea de algo que puede cambiar el estado del sistema. Se llaman endógenos a aquellos que ocurren en el sistema considerado, y exógenos los que ocurren en el entorno que afecta al sistema.
- **Recurso:** es una entidad que proporciona servicio a las entidades dinámicas. Puede servir a una o varias entidades dinámicas al mismo tiempo.
- **Reloj de simulación:** es una variable que proporciona el valor actual del tiempo simulado.

#### **2.1.4.2 Optimización**

- **Complejidad computacional:** es la teoría que se enfoca en la cantidad de recursos requeridos para resolver un problema determinado. Se centra en la clasificación de los problemas computacionales de acuerdo a su dificultad inherente, y en la relación entre dichas clases de complejidad. Un problema se cataloga como "inherentemente difícil" si su solución requiere de una cantidad significativa de recursos computacionales como tiempo y memoria, sin importar el algoritmo utilizado (Arora et al., 2009).

Las siguientes deficiones están basadas los conceptos expuestos por Taha (2012).

- **Función objetivo:** en un modelo de optimización es la ecuación a ser optimizada, usando técnicas de programación lineal o no lineal.
- **Restricción:** en un modelo de optimización es la expresión matemática que limita el conjunto de soluciones factibles del problema.

- Región factible: es el conjunto de todas las soluciones factible del modelo, limitado por las restricciones del problema.
- Solución factible: es la que satisface todas las restricciones del modelo.
- Solución óptima: es la solución factible que da el valor más favorable de la función objetivo.

#### **2.1.4.3 Producción**

- Sistema de producción: es cualquier actividad que toma un insumo y lo transforma en una salida o producto con valor inherente (Sipper, 2011).
- Cuello de botella: en un sistema de producción, es la operación que limita la salida (Sipper, 2011), y de esta manera limita el ritmo de todo el sistema.
- Capacidad instalada: es la capacidad máxima del sistema de producción prevista en el diseño del mismo, disminuida por las necesidades de mantenimiento de los medios de trabajo (Kalenatic, 2001).
- Capacidad disponible: es la capacidad instalada disminuida por los días de trabajo no laborales en el período de tiempo considerado (año, mes), las horas de ausentismo, los tiempos por pérdidas organizacionales y las pérdidas de tiempo por razones de fuerza mayor, teniendo en cuenta el número de turnos y las horas por turno (Kalenatic, 2001).
- Capacidad utilizada: representa la utilización real del sistema de producción en un determinado período de tiempo (Kalenatic, 2001).

#### **2.1.5 CONCEPTOS ESTADÍSTICOS**

A continuación se presenta también una breve discusión sobre los conceptos estadísticos que se emplean en el desarrollo del estudio de simulación, especialmente en el modelamiento de los datos.



### **2.1.5.1 Correlación**

En probabilidad y estadística la correlación indica la fuerza y la dirección de una relación lineal y proporcionalidad entre dos variables estadísticas. Se considera que dos variables cuantitativas están correlacionadas cuando los valores de una de ellas varían sistemáticamente con respecto a los valores homónimos de la otra. La correlación entre dos variables no implica, por sí misma, ninguna relación de causalidad (Montgomery et al., 2006).

### **2.1.5.2 Independencia**

En teoría de probabilidades, se dice que dos sucesos aleatorios son independientes entre sí cuando la probabilidad de cada uno de ellos no está influida porque el otro suceso ocurra o no, es decir, cuando ambos sucesos no están relacionados (Montgomery et al., 2006).

### **2.1.5.3 Pruebas de corridas**

Son pruebas estadísticas que se utilizan para determinar secuencias, patrones sistemáticos, cambios secuenciales, etc., que denoten tendencias predecibles en una serie de datos, para establecer su independencia y sus patrones de aleatoriedad (Montgomery et al., 2006). Dos pruebas de corridas reconocidas son la prueba arriba y debajo de la media, y “turning points”.

### **2.1.5.4 Prueba de bondad de ajuste *Anderson-Darling***

El estadístico de *Anderson-Darling* (AD) mide qué tan bien los datos siguen una distribución particular. Por lo general, mientras mejor se ajusta la distribución a los datos, menor será el estadístico AD (Montgomery et al., 2006).

El estadístico AD se utiliza para calcular el valor  $p$  para la prueba de bondad del ajuste, la cual le permite determinar qué distribución se ajusta mejor a una serie de datos. El estadístico AD también se utiliza para probar si una muestra de datos proviene de una población con una distribución específica. Las hipótesis para la prueba de *Anderson-Darling* son:

$H_0$ : Los datos siguen una distribución especificada.

$H_1$ : Los datos no siguen una distribución especificada.

Si el valor  $p$  para la prueba de *Anderson-Darling* es inferior al nivel de significancia seleccionado, se concluye que los datos no siguen la distribución especificada.

#### **2.1.5.5 Prueba de bondad de ajuste *Kolmogorov-Smirnov***

En estadística, la prueba de *Kolmogórov-Smirnov* (KS) es una prueba no paramétrica que determina la bondad de ajuste de dos distribuciones de probabilidad entre sí (Montgomery et al., 2006).

Conviene tener en cuenta que la prueba *Kolmogórov-Smirnov* es más sensible a los valores cercanos a la mediana que a los extremos de la distribución. La prueba de *Anderson-Darling* proporciona igual sensibilidad con valores extremos.

## **2.2 DISEÑO METODOLÓGICO**

El presente trabajo se cimienta en la metodología de la investigación propuesta por Sampieri, Fernández y Lucio (2007). Además, el desarrollo del estudio de simulación de la estación de trabajo se fundamenta en la metodología de simulación propuesta por Law (2015) y complementariamente el problema de asignación óptima se basa en el modelo general expuesto por Fu, Glover y April (2005). La combinación de estos componentes metodológicos se ilustra en el diagrama metodológico presentado en la figura 2.3.



Figura 2.3. Diagrama metodológico. Fuente: propia (2016)

A continuación se describen de manera breve los elementos metodológicos propuestos por los autores mencionados, que se adoptan para llevar a cabo la investigación en la estación de soldadura por presión de la fábrica metalmeccánica.

### 2.2.1 METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

En primer lugar, Sampieri et al. (2007) describen dos enfoques para realizar el proceso investigativo, uno llamado cualitativo que utiliza la recolección de datos sin medición numérica, donde no necesariamente se aprueban hipótesis, las variables a medir no son controlables ni manipulables y utiliza técnicas de observación como entrevistas, discusiones y revisión de documentos entre otros.

El otro enfoque es el cuantitativo que utiliza tanto para la recolección de datos como para la aprobación de las hipótesis, la medición numérica y el análisis estadístico, con el fin de establecer patrones de comportamiento y probar teorías. Además este

enfoque ofrece la posibilidad de generalizar los resultados, otorga control sobre los fenómenos, implica generar réplicas y además facilita la comparación de resultados.

En línea con lo anterior, de acuerdo con la naturaleza de un estudio de simulación y optimización, la presente investigación tiene un enfoque cuantitativo y por ello se han adoptado las fases planteadas por los autores que se enuncian a continuación. Estas fases se incorporan a la investigación, no contradiciendo sino por el contrario complementando los demás elementos metodológicos de la investigación, en materia de simulación y optimización:

1. Desarrollo de una idea o tema
2. Planteamiento del problema: objetivos, preguntas de investigación y justificación del estudio
3. Revisión de la literatura y desarrollo del marco teórico
4. Visualización del alcance de la investigación: exploratoria, descriptiva, correlacional o explicativa
5. Formulación de hipótesis y definición de variables
6. Desarrollo del diseño de investigación
7. Definición y selección de la muestra
8. Recolección de datos
9. Análisis de los datos
10. Elaboración del reporte de investigación

### **2.2.2 ESTUDIO DE SIMULACIÓN**

En segundo lugar, el presente proceso de investigación involucra un estudio de simulación que se basa en la metodología propuesta por Law (2015). Esta metodología incluye no solo la construcción del modelo de simulación, sino además otras etapas relevantes para llevar a cabo un completo estudio. En la figura 2.4 se presenta la metodología, que por su consistencia y efectividad ha tenido gran aceptación en el ámbito académico y de aplicación.

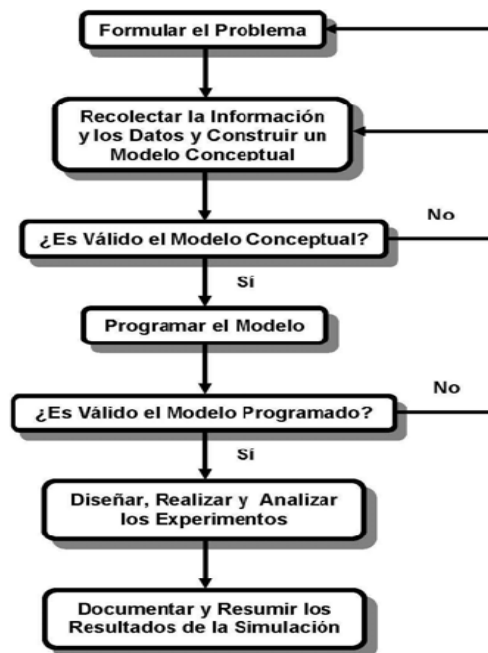


Figura 2.4. Metodología para el desarrollo de estudios de simulación. Fuente: Simulation, modeling and analysis. Law (2015)

- Paso 1. Formular el problema: aquí es de vital importancia que el problema sea proporcionado por quien requiere solucionarlo (el cliente) y el analista de simulación debe asegurarse de entenderlo claramente. Se deben considerar las preguntas a responder con el estudio, así como el objeto general, los objetivos específicos y las medidas de desempeño de análisis.
- Paso 2. Recolectar la información, los datos y construir un modelo conceptual: los datos deben permitir definir específicamente los parámetros del modelo, por lo que además de datos numéricos se deben consultar procedimientos, manuales y otras fuentes documentales, así como realizar tomas de tiempos y registros fotográficos si es necesario. El modelo conceptual es un “boceto en papel” de lo que será el modelo programado, y debe ser el resultado del consenso entre todos los involucrados en el proyecto.
- Paso 3. ¿Es válido el modelo conceptual?: es mandatoria la revisión de los miembros del proyecto para verificar si el modelo es suficiente para describir el sistema real en el nivel de detalle deseado, y si por ende responde a los

objetivos del estudio. Si el modelo no es suficiente se deben retomar los pasos 1 y/o 2.

- Paso 4. Programación del modelo: la programación del modelo conceptual se debe llevar a cabo en un lenguaje especial, que varía su complejidad de acuerdo al software de simulación utilizado, desde herramientas básicas como Excel, pasando por software genérico para simular una amplia gama de procesos y sistemas como Arena, Promodel o Simul8, y hasta software especializado como Simwalk para simular transporte, entre muchos otros.
- Paso 5. Validar el modelo programado: esta etapa cobra notable importancia porque se constata la fidelidad del modelo programado con el modelo conceptual y con la realidad, y por ello dependiendo de la validez del modelo, las decisiones que se tomen sobre el sistema real tienen menor o mayor impacto. Aquí se deben comparar las medidas de desempeños arrojadas por el modelo con las observadas en el sistema real.
- Paso 6. Diseñar, conducir y analizar experimentos: se debe establecer cuestiones tácticas como la longitud de corrida o duración de la simulación y el número de corridas. Adicionalmente, se preparan y se revisan estadísticamente los diferentes escenarios que permiten responder a las preguntas de la investigación.
- Paso 7. Documentar y presentar los resultados de la simulación: en este paso se debe obtener una base documental de la preparación y ejecución del proyecto, incluyendo el modelo conceptual, la descripción detallada de la programación, los resultados y conclusiones.

### **2.2.3 MODELO GENERAL DE ASIGNACIÓN**

En tercer lugar, de acuerdo con lo descrito en la sección 2.1.3.3, la investigación incorpora el enfoque de Fu, Glover y April (2005) donde el problema general de optimización consiste en encontrar una configuración de los parámetros controlables que minimice una función objetivo dada:

$$\min J(\theta), \theta \in \emptyset$$

De esta manera, en el caso de estudio  $\theta \in \emptyset$  representa la variable de entrada en términos del costo de operación que depende de los tiempos de operación de las máquinas y de la mano de obra requerida en la estación de trabajo para el proyecto de estudio,  $J(\theta)$  es la función objetivo escalar correspondiente a la sumatoria de los costos de operación y  $\emptyset$  es el conjunto de restricciones, que está explícitamente definido en los supuestos concertados con la organización.

Efectivamente en la concepción del modelo de simulación y optimización  $J(\theta)$  no está directamente disponible y por consiguiente debe ser estimada mediante simulación; es decir, los resultados del estudio de simulación proveen  $\hat{J}(\theta)$  que es una estimación aproximada de  $J(\theta)$ . En el caso de estudio:

$$\hat{J}(\theta) = f(\hat{K}(\theta)) \quad (5)$$

Donde  $\hat{K}(\theta)$  es función de tiempos de operación tanto de las máquinas como de la mano de obra, que permite estimar la función de costos  $\hat{J}(\theta)$ . La forma más común para  $J$  es una expectativa en función del número de réplicas  $w$  y la medida de desempeño  $L$ , en este caso el tiempo de operación, como se muestra en la ecuación (4).

Esta forma de la función de costos en el caso de estudio incluye probabilidades con el uso de funciones indicadoras, es decir distribuciones de probabilidad que se incluyen en la programación del modelo de simulación para representar la variabilidad de los tiempos unitarios de operación en la estación de trabajo, según las posibles configuraciones de las máquinas para procesar las partes requeridas en el proyecto de estudio.

## **2.2.4 ESTRATÉGIAS DE EJECUCIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

En esta sección se describen las actividades programadas para el desarrollo del presente proceso investigativo, desde el diagnóstico del problema hasta la socialización de los resultados de la investigación. Se relacionan además las estrategias que permitieron el logro de todas y cada una de estas actividades, así como los participantes esperados en cada una y los recursos necesarios.

Tabla 2.1. Estrategias para la realización de la investigación. Fuente: propia (2016)

ID	ACTIVIDAD	ESTRATEGIAS	PARTICIPANTES	RECURSOS
1	<b>Diagnóstico del problema</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Realizar varios recorridos en planta para observar de primera mano el proceso de manufactura en la estación de trabajo.</li> <li>• Entrevistar a los operarios y supervisores de la estación, así como a mandos medios de Ingeniería y al directivo de Producción.</li> <li>• Concertar con la empresa un caso de estudio que puede corresponder a un proyecto próximo a ejecutar por parte de la fábrica.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Investigador</li> <li>• Equipo de trabajo de la estación de soldadura por presión</li> <li>• Representantes de Ingeniería</li> <li>• Directivo de Producción</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elementos de protección personal</li> <li>• Ordenador</li> <li>• Cámara fotográfica</li> </ul>
2	<b>Definición y propuesta de solución</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Definir las herramientas ingenieriles más pertinentes para abordar el problema identificado.</li> <li>• Realizar una presentación tanto a los directivos pertinentes de la empresa, como al equipo de trabajo de la estación de soldadura por presión, sobre la solución propuesta a realizar mediante la investigación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Investigador</li> <li>• Equipo de trabajo de la estación de soldadura por presión</li> <li>• Representantes de Ingeniería</li> <li>• Directivo de Producción</li> <li>• Otro personal pertinente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sala de reuniones</li> <li>• Ordenador</li> <li>• Proyector</li> </ul>



ID	ACTIVIDAD	ESTRATEGIAS	PARTICIPANTES	RECURSOS
3	<b>Levantamiento de información requerida para el estudio</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Realizar varias visitas a la estación de trabajo para observar su desempeño.</li> <li>• Realizar toma de tiempos.</li> <li>• Entrevistas con los colaboradores operativos y administrativos pertinentes.</li> <li>• Suministro de información física y digital por parte de la empresa.</li> <li>• Interacción continua vía telefónica y digital con la empresa.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Investigador</li> <li>• Equipo de trabajo de la estación de soldadura por presión</li> <li>• Representantes de Ingeniería</li> <li>• Directivo de Producción</li> <li>• Otro personal pertinente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elementos de protección personal</li> <li>• Ordenador</li> <li>• Cronómetro</li> <li>• Cámara fotográfica</li> <li>• Medios de comunicación (Internet, teléfono)</li> </ul>
4	<b>Elaboración y validación del modelo conceptual</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A partir de la información recopilada, levantar el modelo conceptual, es decir el modelo sobre papel del modelo de simulación que será programado en software especializado.</li> <li>• Realizar reuniones con los directivos y personal pertinente de la empresa para revisar, ajustar, concertar y aprobar la versión definitiva del modelo conceptual.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Investigador</li> <li>• Equipo de trabajo de la estación de soldadura por presión</li> <li>• Representantes de Ingeniería</li> <li>• Directivo de Producción</li> <li>• Otro personal pertinente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ordenador</li> <li>• Sala de reuniones</li> <li>• Proyector</li> </ul>

ID	ACTIVIDAD	ESTRATEGIAS	PARTICIPANTES	RECURSOS
5	<b>Definición de los supuestos / restricciones, las medidas de desempeño y los parámetros de simulación y optimización</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Concertar en una reunión con el personal pertinente de la empresa los supuestos / restricciones de los modelos y las medidas de desempeño que se desean estudiar.</li> <li>• A partir de estas medidas establecer los parámetros y variables de los modelos de simulación y optimización.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Investigador</li> <li>• Equipo de trabajo de la estación de soldadura por presión</li> <li>• Representantes de Ingeniería</li> <li>• Directivo de Producción</li> <li>• Otro personal pertinente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sala de reuniones</li> <li>• Ordenador</li> <li>• Proyector</li> </ul>
6	<b>Programación del modelo de simulación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Llevar a cabo la modelación de los datos recopilados mediante el software StatFit®, para establecer su validez estadística.</li> <li>• Desarrollar a partir de la información recopilada el modelo concertado con la empresa, en el software comercial PROMODEL®.</li> <li>• Acudir a la empresa en caso de requerir información adicional.</li> <li>• Realizar pruebas de escritorio para verificar el correcto funcionamiento del modelo programado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Investigador</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ordenador</li> <li>• Software StatFit®</li> <li>• Software PROMODEL®</li> <li>• Información recopilada</li> </ul>

ID	ACTIVIDAD	ESTRATEGIAS	PARTICIPANTES	RECURSOS
7	<b>Validación del modelo programado</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plantear y ejecutar pruebas estadísticas para validar el funcionamiento del modelo programado, con relación al comportamiento real de la estación de trabajo.</li> <li>• Realizar varias reuniones con los directivos y personal pertinente de la empresa para revisar, ajustar y aprobar la versión definitiva del modelo de simulación programado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Investigador</li> <li>• Equipo de trabajo de la estación de soldadura por presión</li> <li>• Representantes de Ingeniería</li> <li>• Directivo de Producción</li> <li>• Otro personal pertinente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sala de reuniones</li> <li>• Ordenador</li> <li>• Proyector</li> </ul>
8	<b>Formulación y validación del modelo de asignación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A partir de la información recopilada, y de los resultados del modelo de simulación formular y elaborar el modelo de asignación óptima de la carga de trabajo, en el software Solver - MS Excel®.</li> <li>• Realizar una reunión con los directivos y personal pertinente de la empresa para revisar y aprobar el modelo desarrollado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Investigador</li> <li>• Equipo de trabajo de la estación de soldadura por presión</li> <li>• Representantes de Ingeniería</li> <li>• Directivo de Producción</li> <li>• Otro personal pertinente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ordenador</li> <li>• Software Solver - MS Excel®</li> <li>• Sala de reuniones</li> <li>• Proyector</li> </ul>

ID	ACTIVIDAD	ESTRATEGIAS	PARTICIPANTES	RECURSOS
9	<b>Experimentación: establecer y analizar escenarios, analizar y validar los resultados finales</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>De acuerdo con los resultados de simulación y optimización obtenidos para el caso de estudio, establecer en consenso con el personal pertinente de la empresa los escenarios posibles que afronta la fábrica como alternativas de configuración de las máquinas (u otras circunstancias simulables), a fin de revisar estos escenarios en el modelo.</li> <li>Analizar los resultados obtenidos.</li> <li>Establecer conclusiones y recomendaciones.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Investigador</li> <li>Equipo de trabajo de la estación de soldadura por presión</li> <li>Representantes de Ingeniería</li> <li>Directivo de Producción</li> <li>Proveedores</li> <li>Otro personal pertinente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ordenador</li> <li>Sala de reuniones</li> <li>Proyector</li> </ul>
10	<b>Documentar el proyecto de investigación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Generar un repositorio de información y documentarlo en la tesis correspondiente, a lo largo de toda la ejecución del proyecto de investigación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Investigador</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ordenador</li> <li>Información recopilada</li> <li>Retroalimentación de la empresa</li> <li>Retroalimentación de la academia</li> </ul>
11	<b>Socializar los resultados de la investigación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Realizar reuniones y capacitaciones tanto con el personal operativo de la estación de trabajo como con el personal directivo y administrativo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Investigador</li> <li>Equipo de trabajo de la estación de soldadura por presión</li> <li>Representantes de Ingeniería</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sala de reuniones</li> <li>Ordenador</li> <li>Proyector</li> </ul>

ID	ACTIVIDAD	ESTRATEGIAS	PARTICIPANTES	RECURSOS
		relacionado con la investigación, a fin de socializar los resultados parciales y finales.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Directivo de Producción</li> <li>• Otro personal pertinente</li> </ul>	

## **CAPÍTULO 3**

### **ESTUDIO DE SIMULACIÓN**

De acuerdo con la metodología propuesta por Law (2015) que se describe en la sección 2.2.2, en el presente capítulo se desarrolla la mayoría de las etapas de un estudio de simulación y las demás se incluyen en otros capítulos. Así pues, la primera etapa se desarrolla con el planteamiento de la problemática (sección 1.3), los objetivos de la investigación (introducción), las preguntas a responder con el estudio y las medidas de desempeño de interés (sección 3.1). La segunda etapa corresponde a la recolección y análisis de datos (sección 3.4), en complemento del planteamiento de los supuestos (sección 3.3), la definición del estudio de caso y la selección de la muestra (sección 3.2), así como la construcción del modelo conceptual (sección 3.5). La tercera etapa corresponde a la validación del modelo conceptual (sección 3.6), la cuarta etapa a la programación del modelo (sección 3.7) y la quinta corresponde a la validación del modelo programado (sección 3.8).

La sexta etapa del estudio se desarrolla en el capítulo 5 con el diseño, ejecución y análisis de experimentos, y la séptima etapa que corresponde a la documentación del estudio y la presentación de los resultados y conclusiones, está plasmada a lo largo de la presente tesis.

#### **3.1 MEDIDAS DE DESEMPEÑO**

Durante la realización de las primeras visitas a la fábrica metalmeccánica para observar la situación que se presentaba en el proceso de manufactura de los componentes de sillas de automóviles y así diagnosticar con claridad el problema a abordar, se identificó en primer lugar que la estación de soldadura por presión constituía el cuello de botella del proceso ya que presentaba un tiempo global de operación mayor al de los demás procesos de fabricación y ensamble, acumulaba trabajo según los cronograma trazados y retrasaba las etapas posteriores de la producción.

Además, se identificó que dado que la configuración de las máquinas es específica para cada nueva parte a manufacturar, la decisión sobre qué máquina configurar para la elaboración de cada parte se basaba solo en la experiencia del personal más antiguo que opera la estación de trabajo; y en ocasiones, además del represamiento del trabajo se observaba un alto grado de inactividad de algunas

máquinas de la estación. En este sentido, se evidenció que se carecía de mejores criterios técnicos para decidir una configuración que lograra un mayor rendimiento de la estación de soldadura por presión.

Por lo anterior, el primer paso fue enfocar la atención en esta estación de trabajo que constituía el cuello de botella del proceso de manufactura. En segundo lugar, junto con el personal de ingeniería y producción se estableció que el problema estaba restringido por el hecho de disponer solo de 4 maquinistas para la operación de las 10 máquinas de la estación y 1 almacenista para el traslado del producto en proceso y del producto semiterminado desde el almacén de materiales hasta la estación de trabajo y desde ésta hasta el almacén de producto semiterminado, respectivamente. Este personal labora de lunes a viernes en un turno diario de 8 horas con algunos descansos y recesos para capacitación.

De esta manera, se plantearon en consenso las siguientes preguntas que motivaron al desarrollo de un estudio de simulación como una herramienta técnica necesaria en la presente investigación: ¿es posible mejorar el tiempo de operación o la capacidad utilizada de la estación de soldadura por presión, para disminuir el represamiento del trabajo? ¿Se puede mejorar el tiempo de procesamiento de un lote de piezas del mismo tipo en la estación de soldadura por presión? ¿Cuánto disminuirá el costo de operación de la estación de soldadura por presión si mejora el tiempo de utilización de sus recursos, específicamente las máquinas y el personal asignado?

Estas cuestiones iniciales dieron lugar a la definición de las siguientes medidas de desempeño que se monitorean en el modelo de simulación para analizar el comportamiento de la estación de trabajo y así responder a las inquietudes planteadas, validando las condiciones actuales de desempeño y evaluando posibles escenarios para adoptar el mejor curso de acción que aumenta los beneficios para la estación de soldadura por presión y para la fábrica:

- **Tiempo de operación de cada máquina de soldadura por presión:** esta medida del desempeño de cada máquina se obtiene para la situación actual de la estación a partir de datos de toma de tiempos que con determinado tratamiento estadístico se utilizan en la configuración del modelo de simulación. Sobre esta medida recae gran interés ya que junto con el tiempo de utilización de la mano de obra se calcula el costo de operación, el cual constituye el parámetro en la formulación del modelo de la asignación óptima de la carga de trabajo.

- **Tiempo promedio de permanencia de un lote en la estación:** este es el tiempo promedio empleado por la estación de trabajo para manufacturar un lote, que corresponde al volumen total de un mismo tipo de parte (incluyendo los correspondientes traslados), y es una medida que soporta la toma de decisiones en la evaluación de los diferentes escenarios propuestos para la mejora del rendimiento de la estación. Adicionalmente, esta medida es utilizada para llevar a cabo la validación estadística del modelo programado de simulación.
  
- **Tiempo total de operación de la estación de soldadura (capacidad utilizada):** este tiempo corresponde al tiempo empleado por todas las máquinas de la estación de trabajo para procesar la demanda total de un grupo de partes asociado al proyecto de estudio. Corresponde también a la capacidad utilizada de la estación de trabajo que al compararse con la capacidad disponible permite determinar el rendimiento de la estación en las condiciones actuales y en los posibles escenarios a evaluar.
  
- **Tiempo total de mano de obra:** este tiempo corresponde al tiempo empleado por los trabajadores operativos (maquinistas y almacenista) asignados a la estación de soldadura por presión para la ejecución del proyecto de estudio. Sobre esta medida recae gran interés ya que junto con el tiempo de operación de las máquinas se calcula el costo de operación, el cual constituye el parámetro en la formulación del modelo de la asignación óptima de la carga de trabajo.

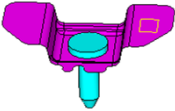




### **3.2 ESTUDIO DE CASO Y SELECCIÓN DE LA MUESTRA**


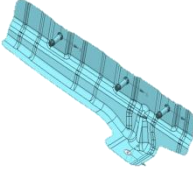
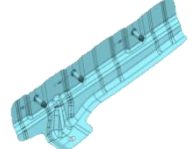
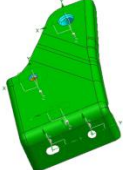

Con el objetivo de focalizar la investigación, destacar su gran importancia y significancia y también obtener resultados puntuales que constituyan un referente preciso del desempeño de la estación de soldadura por presión, se eligió un proyecto clave para la empresa próximo a ejecutarse con un importante cliente de talla mundial en el sector automotriz. De esta manera, la investigación permite planificar la configuración óptima de la estación de trabajo que logre un alto rendimiento a un costo mínimo y así genere el mayor nivel de servicio en la ejecución del proyecto, para satisfacer o superar los requisitos y expectativas del cliente.



El proyecto consiste en la manufactura de diez tipos de partes metálicas, componentes de sillas para diferentes modelos de automóviles. El directivo de Producción de la fábrica metalmeccánica definió en el acuerdo de nivel de servicio con el cliente que la operación unitaria crítica del proceso es la soldadura por presión y se espera que el volumen total de piezas del proyecto se procese en un tiempo máximo de 3 meses en esta estación de trabajo. En la estación de soldadura por presión se realiza una operación unitaria, que consiste en la fijación de tuercas, tonillos y pernos soldables a cada pieza metálica; cada tipo de parte tiene requerimientos específicos sobre la cantidad de tuercas, tornillo o pernos a fijar, así como la ubicación y la tolerancia asociada. La tabla 3.1 presenta el volumen determinado de unidades (demanda) de cada tipo de parte, así como su descripción y el diseño de ingeniería suministrados por el cliente:

Tabla 3.1. Descripción de partes del caso de estudio. Fuente: empresa metalmeccánica (2016)

ID	Parte	Descripción	Diseño	Volumen (piezas)
1	67360 5NA0A	BRKT ASSY HEATER MTG		79,000
2	80995 5NA0A	BOLT PLATE		316,000
3	80994 5NA2A	BOLT PLATE ASSY RH		79,000
4	80995 5NA2A	BOLT PLATE ASSY LH		79,000
5	80994- 5NA1A	BOLT PLATE ASSY RH		79,000

ID	Parte	Descripción	Diseño	Volumen (piezas)
6	80995 5NA1A	BOLT PLATE ASSY LH		79,000
7	788B5 5NA0A	BRKT ASSY- BMPR SIDE MTG, LH		32,000
8	788B4 5NA0A	BRKT ASSY- BMPR SIDE MTG, RH		32,000
9	76680 5NM0A	ANCH ASSY- SEAT BELT, RR PLR RH		32,000
10	76681 5NM0A	ANCH ASSY- SEAT BELT, RR PLR LH		32,000

Además de la elección de un proyecto a ejecutar (para predecir un desempeño óptimo de la estación de trabajo), también es necesario establecer las líneas base o el panorama actual de la estación. Para tal fin, sin contravención de los lineamientos de su política de confidencialidad, la empresa permitió la toma de 50 tiempos unitarios de operación en cada una de las máquinas de la estación de trabajo, y también la toma de 50 tiempos unitarios en los desplazamientos realizados para trasladar el producto en proceso desde el almacén de materiales hasta la estación de trabajo, así como el traslado del producto procesado desde ésta hasta el almacén de productos semiterminado. Según se detalla posteriormente, estos tiempos son sometidos a tratamiento estadístico para determinar las distribuciones de probabilidad requeridas en la configuración del modelo de simulación.

Adicionalmente, para la validación estadística del modelo programado de simulación la empresa proporcionó 146 datos históricos del tiempo de procesamiento de un lote en la estación de soldadura por presión, durante la producción de partes metálicas similares a las del proyecto de estudio, específicamente componentes de sillas de automóviles fabricados en proyectos ejecutados entre los años 2010 a 2016, con el mismo cliente y con otros del sector automotriz.

De acuerdo con la norma de muestreo ANSI/ASQ Z1.4, el tamaño de la muestra estadísticamente representativa de esta población de 146 tiempos de procesamiento de un lote, considerando un nivel general de inspección II en muestreo normal, es de 20 tiempos (ANSI, 2003). Como se describe posteriormente, para efectos de validación estadística esta muestra se compara con una muestra de tiempos de permanencia de un lote en el sistema que arroja el modelo de simulación y que corresponde al número de réplicas.

### **3.3 SUPUESTOS**

Es importante observar que todo modelo, no solo de simulación, es una abstracción simplificada de la realidad, en la medida en que ésta se caracteriza por ser ampliamente compleja inclusive en las situaciones que parezcan ser más triviales. Por esta razón, para desarrollar el modelo de una situación o de un sistema real es necesario establecer una serie de supuestos que permitan la simplificación de la realidad para lograr una abstracción aproximada de la situación o sistema estudiado. Por supuesto, se espera que el modelo sea lo más aproximado posible a la situación o sistema real y a la vez que no sea tan complejo que dificulte su construcción, entendimiento y manejo.

En el caso del modelo de simulación de la estación de soldadura por presión, se acordaron con la fábrica los siguientes supuestos que simplifican el complejo comportamiento de la estación, pero a la vez conllevan a una adecuada aproximación que permite responder a las preguntas de la investigación y lograr con precisión los objetivos, en términos de analizar el rendimiento de la estación de soldadura para posteriormente hacer una asignación óptima de la carga de trabajo, y así lograr el mejor tiempo de operación que redunde en el menor costo de producción:

1. El estudio consiste en una simulación de carácter discreto, considerando que la única entidad que se incluye en el modelo es el lote de producto, que entra

al sistema como producto en proceso y sale como producto semiterminado (piezas con pernos, tornillos y tuercas fijadas). Esta abstracción no dista mucho de la realidad ya que el sistema de información de la fábrica permite trazar la equivalencia de un lote de materiales hasta su transformación en un lote de producto terminado. A la vez, un lote de producto se compone de un volumen entero de unidades a manufacturar. En el modelo el lote de producto asocia el atributo “tipo de parte” que permiten distinguir entre los 10 tipos de partes que tiene el proyecto de estudio, y así se representa con fidelidad el proceso productivo de la estación de soldadura.

2. El enfoque del modelo de simulación se centra en el rendimiento de la estación de soldadura por presión, en términos del tiempo de operación de las máquinas o capacidad utilizada con respecto a su capacidad disponible. Para cada nuevo proyecto de la fábrica es incierto cual será el rendimiento óptimo de la estación de trabajo por diferentes motivos. Por una parte, cada nuevo proyecto trae consigo la manufactura de nuevas partes, en este caso componentes de sillas de automóviles de acuerdo con los nuevos modelos y diseños generados por las fábricas automotrices conforme a la demanda del mercado. Así, cada nueva parte implica la elaboración de un molde o nido de soldadura específico que debe adaptarse mediante una configuración especial a cada máquina de soldadura por presión.

Por ejemplo si a una pieza se le deben fijar dos tuercas y un tornillo, dependiendo de cómo se elabore el nido de producción y cuantas puntas tenga la máquina, se puede necesitar accionar la máquina una vez para fijar las tuercas y luego otra vez para fijar el tornillo (después de reacomodar la pieza), o accionar la máquina una sola vez para fijar las tuercas y el tornillo al mismo tiempo (lo cual sería un rendimiento óptimo).

Por otra parte, el rendimiento de la estación de trabajo está estrechamente relacionado con su capacidad disponible en términos de horas máquinas por año, que a su vez está restringida por las horas efectivas laboradas diariamente (según el número de turnos, la cantidad de horas por turno y los tiempos inactivos).

3. Considerando que existen diversas alternativas de configuración de cada máquina para procesar cada nueva parte y que probar cada configuración representa un costo significativo para la empresa, el directivo de Producción tomó las siguientes decisiones que cobran gran importancia en la

configuración del modelo de simulación y en la formulación del modelo combinatorio de asignación:

- El volumen total de cada tipo de parte se debe procesar en una sola máquina.
- Se deben hacer pruebas de configuración en cinco máquinas, para procesar cada tipo de parte.
- Una máquina puede procesar máximo dos tipos de partes.

De acuerdo con estas restricciones, los ingenieros del área de Ingeniería y Producción establecieron las condiciones de operación de la estación, con las 50 alternativas que consideraron más viables para la configuración de las máquinas según los tipos de partes a procesar para el proyecto de estudio, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3.2. Alternativas de procesamiento para el caso de estudio. Fuente: empresa metalmecánica (2016)

Parte		Máquina									
		M-12	S-57	S-58	S-67	S-78	S-81	S-82	S-84	S-85	S-86
1	67360 5NA0A		X		X			X	X	X	
2	80995 5NA0A	X		X		X	X				X
3	80994 5NA2A	X			X		X			X	X
4	80995 5NA2A	X			X		X			X	X
5	80994-5NA1A		X	X	X				X		X
6	80995 5NA1A		X	X	X				X		X
7	788B5 5NA0A	X		X		X		X	X		
8	788B4 5NA0A	X		X		X		X	X		
9	76680 5NM0A		X			X	X	X		X	
10	76681 5NM0A		X			X	X	X		X	

Esto quiere decir que por ejemplo el volumen total de la parte 1 (67360 5NA0A) puede ser procesado en la máquina S-57, S-67, S-82, S-84 o S-85 (solo en una de ellas), por supuesto en cada una con un tiempo unitario de operación diferente. Además la máquina M-12 puede procesar la parte 2 (80995 5NA0A), 3 (80994 5NA2A), 4 (80995 5NA2A), 7 (788B5 5NA0A) u 8 (788B4 5NA0A), dos de ellas o ninguna.

4. Se asume como única entidad del modelo de simulación el lote de producción, que consiste en el volumen total de unidades de un mismo tipo de parte. De esta manera, los tamaños de lote en el proyecto de estudio son de 32,000; 79,000 y 316,000, según se presenta en la tabla 3.1. El lote de producto entra a la estación de soldadura por presión como lote de producto en proceso y sale de ella como lote de producto semiterminado, el cual consiste en el volumen total de piezas de un mismo tipo a todas las cuales se les han fijado los pernos, tornillos y/o tuercas soldables que se requieren por especificación.
5. Por restricciones de almacenamiento en el área de la estación de trabajo, se asume que el traslado del producto en proceso desde el almacén de materiales hasta la estación de trabajo, lo realiza el almacenista por cada 1,000 unidades a manufacturar, por lo tanto un lote de producto requiere varios traslados para ser procesado en su totalidad. La misma condición aplica para el traslado del lote de producto semiterminados (piezas ya procesadas en la estación), hasta el almacén de productos semiterminados.
6. Las medidas de desempeño a monitorear con el modelo de simulación son tiempos de operación, por lo cual el cálculo de los costos de operación de la estación de trabajo corresponde a la estimación de los parámetros en la formulación del modelo combinatorio de asignación. Sin embargo, los resultados de la asignación óptima de la carga de trabajo a partir de los costos, deben ser analizados en el modelo de simulación.
7. Se asume de entrada toda la capacidad disponible de la estación de trabajo para el proyecto de estudio, lo cual no dista mucho de la realidad ya que para la empresa este proyecto tiene la mayor prioridad por tratarse del cliente más importante para la compañía. La capacidad no utilizada en el caso de estudio queda disponible para el resto de proyectos y requerimientos de producción que tiene la estación de soldadura por presión.
8. Aunque la configuración que se realiza sobre cada máquina es crucial en el tiempo de operación y el rendimiento de la misma, el tiempo destinado a configurar y alistar la máquina se considera despreciable ya que en cada máquina se procesan máximo dos tipos de partes (según disposiciones de la empresa), es decir que máximo se realizarán dos alistamientos de cada máquina y en total diez alistamientos para toda la estación de trabajo (uno

por cada tipo de parte) durante la ejecución completa del proyecto objeto de estudio.

9. Como decisión de la empresa, al proyecto de estudio se asigna 4 maquinistas para la operación de las 10 máquinas de soldadura por presión y 1 almacenista para realizar los correspondientes traslados del producto en proceso y del producto semiterminado. Este número de trabajadores es constante a lo largo de toda la investigación.
  
10. La capacidad disponible se calcula solo en términos de horas máquina, ya que el enfoque de la investigación se centra en la variabilidad del rendimiento de las máquinas por los múltiples factores y alternativas de configuración. La capacidad disponible en términos de horas hombre no se utiliza ya que los recursos de mano de obra son constantes en el caso de estudio. Como se mencionó, la utilización de la mano de obra se considera en la estimación de los costos como parámetro del modelo combinatorio de asignación de la carga de trabajo.

### **3.4 RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS**

De acuerdo con lo mencionado en la sección 3.2, se realizaron tomas de tiempos sobre el procesamiento de cada pieza en la estación de soldadura por presión y sobre los traslados del producto en proceso desde el almacén de materiales hasta la estación de soldadura y de ésta hasta el almacén de productos semiterminados. De esta manera, se cuenta con estos dos tipos de datos de tiempo que deben ser tratados estadísticamente para utilizarlos en la configuración del modelo de simulación. En torno a esta información recopilada en la planta metalmeccánica, es necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones:

1. Cada una de las 50 tomas de tiempo unitario de operación corresponde al procesamiento de una pieza metálica en cada máquina de soldadura por presión factible, e incluye los siguientes movimientos realizados por el maquinista:
  - a. Tomar una pieza metálica de una canasta de productos en procesos.
  - b. Ubicar la pieza metálica en el molde de soldadura de la máquina.
  - c. Tomar de una canasta de materiales la cantidad requerida de pernos, tornillos o tuercas según cada tipo de parte.

- d. Ubicar sobre la pieza metálica la cantidad requerida de pernos, tornillos o tuercas según cada tipo de parte. Este movimiento tiene una gran variabilidad en las condiciones reales de la estación de trabajo de acuerdo con la configuración previa que se haya realizado en la máquina, por lo cual es uno de los principales factores que se quiere predecir con el modelo de simulación.
- e. Accionar la máquina para la fijación de los pernos, tornillos o tuercas a la pieza metálica mediante presión y soldadura.
- f. Tomar la pieza con los pernos, tornillos o tuercas fijadas y ubicarla en una canasta de producto terminado.

Por lo anterior, cada toma de tiempo unitario está dada en segundos. En vista de que el modelo de simulación se configura en horas, los tiempos unitarios de operación se convierten a horas.

2. De acuerdo con los supuestos, el traslado del producto en proceso desde el almacén de materiales hasta la estación de soldadura por presión no se realiza por un lote completo de producción, ya que son cantidades muy grandes de piezas; en el proyecto de estudio los tamaños de lote varían entre 32,000 y 316,000 piezas. Se hace énfasis en que un traslado en condiciones reales incluye en promedio 1,000 unidades y su duración tiene una condición de aleatoriedad dada por factores cotidianos de movilidad en la planta de manufactura, por lo cual se estima a partir de una muestra de 50 tomas de tiempos. Lo anterior es también aplicable al traslado del producto procesado desde la estación de trabajo al almacén de productos semiterminados. Estos tiempos están dados en segundos y para su inclusión en el modelo de simulación se convierten a horas.
3. El tratamiento estadístico de los tiempos unitarios de operación y los tiempos de traslado permite considerar la condición de aleatoriedad que caracteriza a estos datos. Para tal fin se utilizó el software StatFit®<sup>1</sup> para obtener distribuciones de probabilidad que definen el comportamiento de estos tiempos; estas distribuciones se utilizan en la programación de la lógica del modelo de simulación. El tratamiento estadístico de los datos incluye la realización de análisis de correlación e independencia, pruebas de corridas

---

<sup>1</sup> Stat::Fit. Version 2. Statistically fit software ©. copyright 1995-2001. geer mountain software corp. Versión 2.0.10.1.



y las pruebas de bondad de ajuste *Kolmogorov-Smirnov* y *Anderson-Darling* para verificar la validez de las distribuciones de probabilidad ajustadas para estas series de tiempo. En el anexo 1 Modelación de datos, se muestra cómo se utilizó StatFit® para dichos fines. Además en el anexo 2 se presentan los resultados completos de su tratamiento estadístico, mediante esta herramienta. Las tablas 3.3 y 3.4 presentan las distribuciones de probabilidad ajustadas para las 50 series de tiempo de operación unitaria asociadas a las alternativas de procesamiento, así como los dos traslados de materiales y productos incluidos en el modelo.

Tabla 3.3. Distribuciones de probabilidad de los datos de entrada: tiempos unitarios de operación. Fuente: propia (2016)

TIEMPO UNITARIO DE OPERACIÓN		DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD AJUSTADA (HORAS)	TIEMPO UNITARIO DE OPERACIÓN		DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD AJUSTADA (HORAS)
Parte 1	S57	Exponential (3.3e-003, 3.91e-003)	Parte 6	S57	Normal (5.4e-003, 1.03e-003)
	S67	Exponential (3.2e-003, 3.35e-003)		S58	Normal (5.19e-003, 1.01e-003)
	S82	Lognormal (2.22e-003, -6.48, 0.262)		S67	Normal (5.19e-003, 1.01e-003)
	S84	Normal (3.99e-003, 4.13e-004)		S84	Lognormal (4.03e-003, -6.49, 0.368)
	S85	Lognormal (2.22e-003, -6.45, 0.228)		S86	Normal (5.53e-003, 5.53e-004)
Parte 2	M12	Lognormal (2.71e-003, -5.93, 0.838)	Parte 7	M12	Lognormal (2.22e-003, -5.46, 0.727)
	S58	Uniform (3.2e-003, 4.5e-003)		S58	Exponential (3.2e-003, 4.e-003)
	S78	Normal (5.37e-003, 1.01e-003)		S78	Lognormal (3.35e-003, -6.75, 0.824)
	S81	Lognormal (2.57e-003, -5.89, 0.352)		S82	Exponential (3.5e-003, 1.57e-003)
	S86	Normal (5.41e-003, 1.11e-003)		S84	Lognormal (-7.76e-003, -4.22, 0.117)
Parte 3	M12	Lognormal (6.25e-003, -6.24, 1.13)	Parte 8	M12	Lognormal (2.22e-003, -5.51, 0.75)
	S67	Exponential (6.3e-003, 2.36e-003)		S58	Uniform (4.6e-003, 9.8e-003)
	S81	Lognormal (-8.04e-003, -4.29, 6.89e-002)		S78	Lognormal (5.67e-003, -5.84, 0.641)
	S85	Lognormal (3.16e-003, -6.24, 0.479)		S82	Lognormal (2.71e-003, -5.86, 0.874)
	S86	Normal (5.49e-003, 1.04e-003)		S84	Lognormal (5.52e-003, -5.72, 0.609)
Parte 4	M12	Lognormal (3.97e-003, -6.46, 0.313)	Parte 9	S57	Lognormal (4.5e-003, -5.33, 0.565)
	S67	Normal (5.37e-003, 1.06e-003)		S78	Exponential (6.3e-003, 3.14e-003)
	S81	Lognormal (2.52e-003, -6.45, 0.368)		S81	Lognormal (5.11e-003, -5.58, 0.614)
	S85	Lognormal (3.41e-003, -6.38, 0.629)		S82	Lognormal (2.22e-003, -6.45, 0.258)

TIEMPO UNITARIO DE OPERACIÓN		DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD AJUSTADA (HORAS)	TIEMPO UNITARIO DE OPERACIÓN		DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD AJUSTADA (HORAS)
	S86	Lognormal (2.64e-003, -6.48, 0.454)		S85	Normal (6.78e-003, 2.97e-003)
Parte 5	S57	Lognormal (2.82e-003, -6.02, 0.701)	Parte 10	S57	Lognormal (4.35e-003, -5.29, 0.493)
	S58	Exponential (3.5e-003, 2.09e-003)		S78	Lognormal (3.84e-003, -5.14, 0.443)
	S67	Lognormal (3.75e-003, -6.85, 0.85)		S81	Lognormal (3.71e-003, -6.51, 0.555)
	S84	Normal (5.36e-003, 1.07e-003)		S82	Exponential (3.9e-003, 1.44e-003)
	S86	Lognormal (3.65e-003, -6.83, 0.757)		S85	Uniform (4.2e-003, 7.2e-003)

Tabla 3.4. Distribuciones de probabilidad de los datos de entrada: traslados.  
Fuente: propia (2016)

TRASLADO		DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD AJUSTADA (HORAS)
Desde almacén de materiales	Hasta estación de trabajo	Lognormal (-0.475, -0.329, 4.95e-002)
Desde estación de trabajo	Hasta almacén de semiterminados	Lognormal (4.e-003, -1.43, 0.156)

4. Para poder analizar los resultados de tiempo de operación obtenidos en términos de rendimiento de la estación de soldadura por presión, se hace relevante conocer la capacidad disponible de la estación de trabajo. Además es importante contar con la capacidad instalada como referente importante para la empresa. A continuación se desarrolla el enfoque de Kalenatic (2001) para el cálculo de estas capacidades:

### Capacidad instalada

$$CI = \sum_{i=1}^m n_i * DC * HD - G_i \quad (6)$$

Donde:

- $n_i$ : Cantidad de puestos de trabajo del tipo “i”
- $m$ : Puestos de trabajo agrupados por tipo;  $i = 1, 2 \dots m$
- $DC$ : Días corrientes (365 días)
- $HD$ : Horas por día (24 horas)

- $G_i$ : Pérdidas estándar totales por mantenimiento de todos los puestos de trabajo activos en el sistema. A su vez, para el cálculo de estas pérdidas es válida la expresión:

$$G_i = \sum_{i=1}^m n_i * g_i \quad (7)$$

Donde:

- $g_i$ : Pérdidas estándar por mantenimiento preventivo y correctivo de los puestos de trabajo tipo "i".

De acuerdo con la fábrica, se dedican en promedio 24 horas anuales al mantenimiento preventivo y correctivo de cada máquina de la estación de trabajo. Así, sustituyendo en la ecuación (7) se tiene:

$$G_i = \sum_{i=1}^1 10 * 24$$

$$G_1 = 10 * 24 = 240 \text{ horas/año}$$

Por consiguiente de acuerdo con la ecuación (6) la capacidad instalada de la estación de soldadura por presión es:

$$CI = \sum_{i=1}^1 10 * 365 * 24 - 240$$

$$CI = 87,360 \text{ horas/año}$$

### Capacidad disponible

$$CD = \sum_{i=1}^m (n_i * DH * HT * NT) - (G_1 + G_2 + G_3 + G_4) \quad (8)$$

Donde:

- $DH$ : Días hábiles en el año que labora el puesto de trabajo tipo "i" (255 días/año en México)

- *HT*: Número de horas por turno que labora el puesto de trabajo tipo “i” (8 horas/turno en la fábrica)
- *NT*: Número de turnos de trabajo que labora el puesto de trabajo del tipo “i” según las condiciones de producción (1 turno en la fábrica)
- *G<sub>1</sub>*: Pérdidas estándar por mantenimiento preventivo y correctivo (horas/año)
- *G<sub>2</sub>*: Pérdidas estándar totales por la no asistencia de los trabajadores debido a vacaciones, incapacidades, permisos y otras ausencias justificadas y no justificadas (horas/año)
- *G<sub>3</sub>*: Pérdidas estándar totales por factores externos organizacionales en el proceso de producción (horas/año)
- *G<sub>4</sub>*: Pérdidas estándar totales por factores externos naturales, técnicos y económicos que conducen a paradas y esperas en los puestos de trabajo y que no dependen de los productores, sino de causas de fuerza mayor (falta de energía eléctrica, agua, etc.) (horas/año)

La empresa considera que sus pérdidas estándar por los factores *G<sub>2</sub>*, *G<sub>3</sub>* y *G<sub>4</sub>*, corresponden a un promedio de 30 horas al mes, es decir 360 horas al año, en su mayoría asociadas a capacitación, pausas activas, vacaciones, incapacidades y permisos. Por consiguiente de acuerdo con la ecuación (8) la capacidad disponible de la estación de trabajo es:

$$CD = \sum_{i=1}^1 (10 * 255 * 8 * 1) - (240 + 360)$$

$$CD = 19,800 \text{ horas/año}$$

### 3.5 MODELO CONCEPTUAL

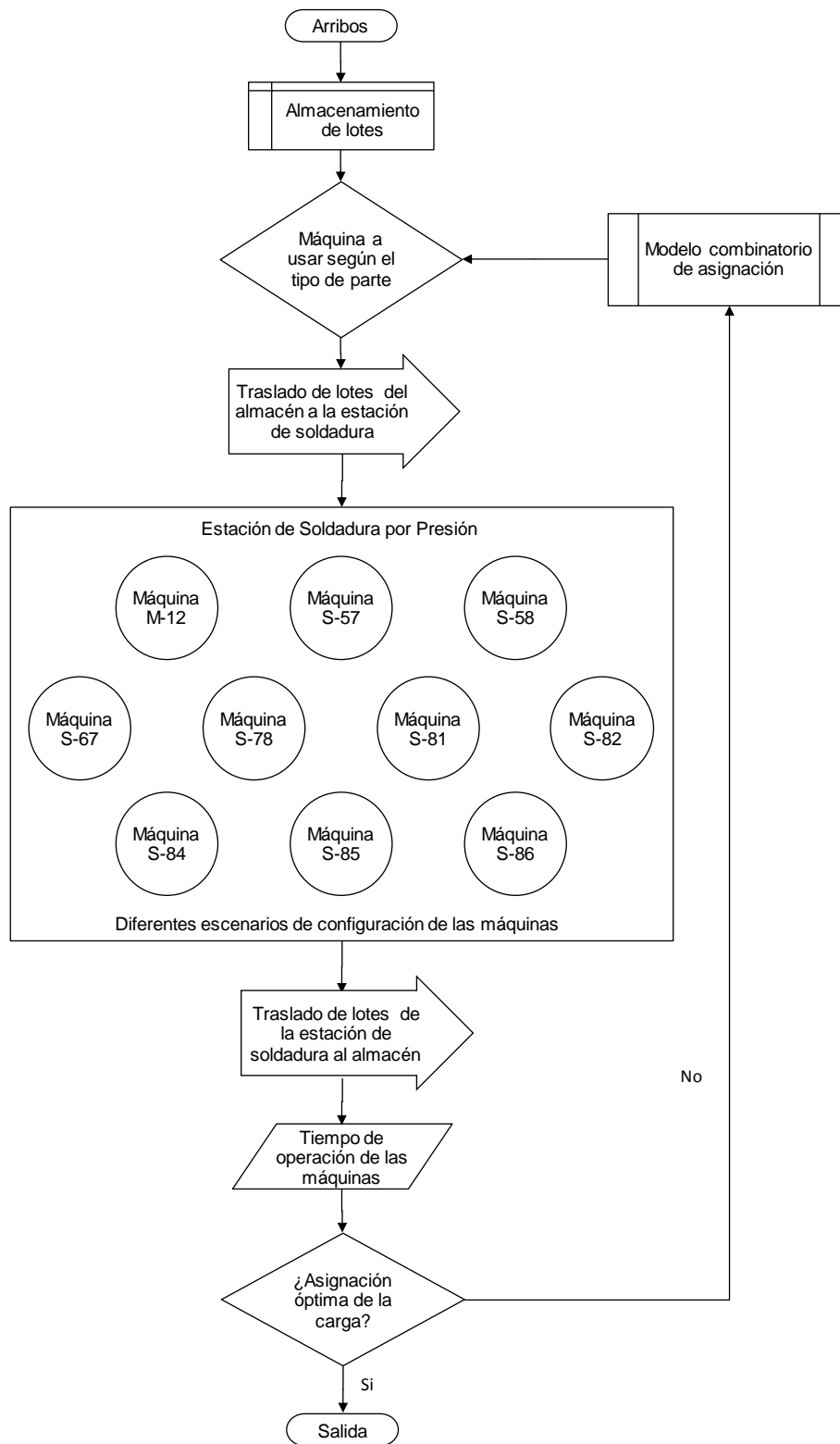
A partir de la información recolectada en la empresa, entre lo que se incluye la revisión de procedimientos estándar de operación, así como la observación del proceso productivo durante el trabajo de campo y el conocimiento y la experiencia de varios integrantes de la organización plasmados en diversas entrevistas a ingenieros de las áreas de producción, ingeniería y logística, y a supervisores, maquinistas y almacenistas, se formuló el modelo conceptual del estudio de simulación, como una representación inicial del comportamiento de la estación de trabajo de soldadura por presión. En este modelo se ha utilizado la estructura y los

símbolos de un diagrama de flujo, que además se combinan con algunos símbolos para diagramas de proceso definidos por la ASME<sup>2</sup>. La figura 3.1 presenta el modelo conceptual junto con las convenciones de los símbolos utilizados.

Conceptualmente el proceso de manufactura en la estación de soldadura por presión comienza con el almacenamiento de los lotes de producto en proceso, que según se ha descrito en la sección 3.4 corresponden al volumen total de unidades a manufacturar de un mismo tipo de parte, los cuales por supuesto asocian las cantidades requeridas de pernos, tornillos y/o tuercas a ser fijados. Luego, se presenta la decisión sobre la asignación de cada lote a una sola de las máquinas de soldadura por presión de la estación, de acuerdo con las alternativas de procesamiento presentadas en la tabla 3.2.

---

<sup>2</sup> American Society of Mechanical Engineers (Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos).



### Convenciones



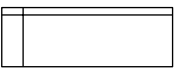

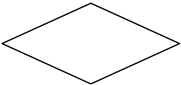

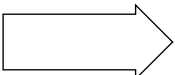

Símbolo	Descripción	Símbolo	Descripción
	Arribos y salida (de los lotes), o inicio y terminación (del proceso)		Proceso (hace referencia a la estación de trabajo). Asocia rendimiento productivo
	Almacenamiento interno en la fábrica (de lotes)		Operación (hace referencia a la operación unitaria de soldadura por presión). Asocia tiempo de operación
	Decisión (hace referencia a la asignación de la carga de trabajo)		Datos (hace referencia a la generación de datos de rendimiento)
	Traslado o transporte (de lotes). Asocia tiempo de desplazamiento		Proceso predefinido (hace referencia al programa lineal de asignación)

Figura 3.1. Modelo conceptual del estudio de simulación. Fuente: propia (2016)

Posteriormente, se realiza el traslado del producto en proceso desde el almacén de materiales hasta la estación de trabajo, que como se ha mencionado se hace por cantidades de 1,000 unidades cada vez y está a cargo del almacenista disponible para el proyecto de estudio. Una vez en la estación de trabajo, el producto en proceso pasa por la máquina asignada donde un maquinista realiza la operación de fijación de los pernos, tornillos y/o tuercas a cada pieza (efectuando los movimientos descritos en la sección 3.3) según el requerimiento de cada parte y de acuerdo con la configuración previa de cada máquina. Las piezas manufacturadas son trasladadas al almacén de productos semiterminados, nuevamente en las cantidades de unidades establecidas y por parte del almacenista.

Los últimos pasos del modelo conceptual hacen referencia al flujo de los datos requeridos para el análisis y decisión de la mejor asignación, de modo que ya no consideran flujo físico de productos. Cuando se han procesado los lotes completos en la estación de trabajo, se observa el resultado del tiempo de operación de cada máquina, correspondiente a la capacidad utilizada o específicamente la cantidad de horas de operación de cada máquina para procesar el lote asignado.

Las primeras corridas del modelo de simulación incluyen todas las alternativas de procesamiento definidas en la tabla 3.2; estas corridas arrojan el tiempo de operación de cada alternativa que luego se usa para calcular la matriz de costos asociados y así desarrollar el modelo de asignación óptima, como se describe en el siguiente capítulo. Una vez conocida la asignación óptima se configura de nuevo el modelo de simulación para obtener el tiempo de operación óptimo o la mínima capacidad utilizada, y así el menor costo.

Este ciclo de información entre el modelo de simulación y el modelo de asignación, se representan en el modelo conceptual con el bucle de retroalimentación originado en la decisión final sobre si se trata de la asignación óptima, y en caso no afirmativo conlleva al proceso predefinido de asignación y luego vuelve a correr la simulación de la estación con una nueva asignación de la carga de trabajo.

### 3.6 VALIDACIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL

En primer lugar, la validación del modelo conceptual tuvo lugar en la fábrica metalmecánica con la presencia de un representante de Ingeniería y el personal operativo asignado a la estación de soldadura por presión, corroborando que las etapas y las características esenciales del proceso se mantuvieran fieles a la realidad y que la simplificación no omitiera los aspectos relevantes de la producción de piezas soldadas.

Posteriormente, el modelo conceptual se validó con el directivo de Producción en varias reuniones llevadas a cabo en la fábrica, constatando la fidelidad del modelo como representación del sistema real, la estación de soldadura por presión. En estas reuniones se diligenció una lista de chequeo de validación del modelo conceptual (Mesa, 2011), como sugerencia del investigador para otorgar mayor confiabilidad al modelo esbozado, la cual se presenta en la tabla 3.5. Conforme a las respuestas registradas en la lista de chequeo, el modelo conceptual es una representación válida de la estación de soldadura por presión, para los objetos de análisis y para responder a las preguntas de la investigación.

Tabla 3.5. Lista de chequeo de validación del modelo conceptual. Fuente: propia (2016)

Proceso que define si el Modelo Conceptual representa al Sistema para sus objetos de análisis	SI / NO	Observaciones
¿El diagrama de flujo corresponde al sistema real con los supuestos y objetos de estudio?	SI	
¿Cuál es el rango de datos en que pueden variar las entradas del sistema?	--	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Operación unitaria</u>: 11.5 a 57.6 seg (0.0032 a 0.0160 horas)</li> <li>• <u>Traslado 1</u>: 11 a 18 min (0.18 a 0.30 horas)</li> </ul>



Proceso que define si el Modelo Conceptual representa al Sistema para sus objetos de análisis	SI / NO	Observaciones
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Traslado 2</u>: 7 a 16 min (0.12 a 0.27 horas)</li> </ul>
¿Los parámetros conceptualizados corresponden a la realidad del sistema?	SI	
¿El modelo conceptual es entendido por alguien diferente a quien lo desarrolló?	SI	
¿Están definidas todas las variables de interés?	SI	
¿Cuál es el recorrido de las entidades y cuál es su transformación?	--	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Almacén de materiales – Estación de trabajo – Almacén de semiterminados</li> <li>• Lote de producto en proceso – ensamble de soldadura por presión – lote de producto procesado</li> </ul>
¿Están conceptualizados todos los supuestos?	SI	
¿Se conocen los valores históricos de las medidas de desempeño?	SI	Del tiempo promedio de procesamiento de un lote.

Es importante mencionar los principales cambios realizados en el modelo conceptual como resultado de la validación, a saber:

- Incluir los traslados del producto en proceso y del producto procesado, desde el correspondiente almacén hasta la estación de trabajo y viceversa, por considerar que el tiempo empleado en esta actividad genera un impacto en el rendimiento global de la estación de soldadura por presión, en sinergia con los demás operaciones del proceso general de producción de la fábrica, y con mayor razón por tratarse de la operación cuello de botella.
- Generar el ciclo de retroalimentación de información, haciendo referencia al modelo combinatorio de asignación como un proceso predefinido, ya que pragmáticamente y desde un punto de vista sistémico se presenta una

relación de interdependencia y complemento entre ambos modelos, para lograr alcanzar los objetivos de la investigación.

### 3.7 PROGRAMACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN

Para la programación del modelo de simulación se utiliza el software PROMODEL® Versión 7.5.0.299, instalado en un ordenador portátil Samsung Serie 7 Chronos con procesador Intel Core i5-3210M, CPU de 2.50 GHz y sistema operativo de 64 bits Windows 7 Home Premium. Siguiendo la metodología adoptada con relación a la realización de un estudio de simulación, el modelo conceptual consituye el diseño del modelo programado.

De esta manera, la programación del modelo de simulación requirió la creación de 1 entidad, 11 locaciones, 2 atributos, 13 variables, 5 recursos de dos tipos diferentes, 1 documento externo y el planteamiento de la lógica de programación como característica especial de la experiencia y el conocimiento del realizador de la presente investigación. La figura 3.2 ilustra el modelo de simulación en ejecución. Sobre este último aspecto, en la programación del modelo de simulación son destacables los algoritmos que permiten representar con fidelidad el comportamiento de la estación de soldadura por presión, como factor clave para lograr análisis acertados a lo largo de la investigación.

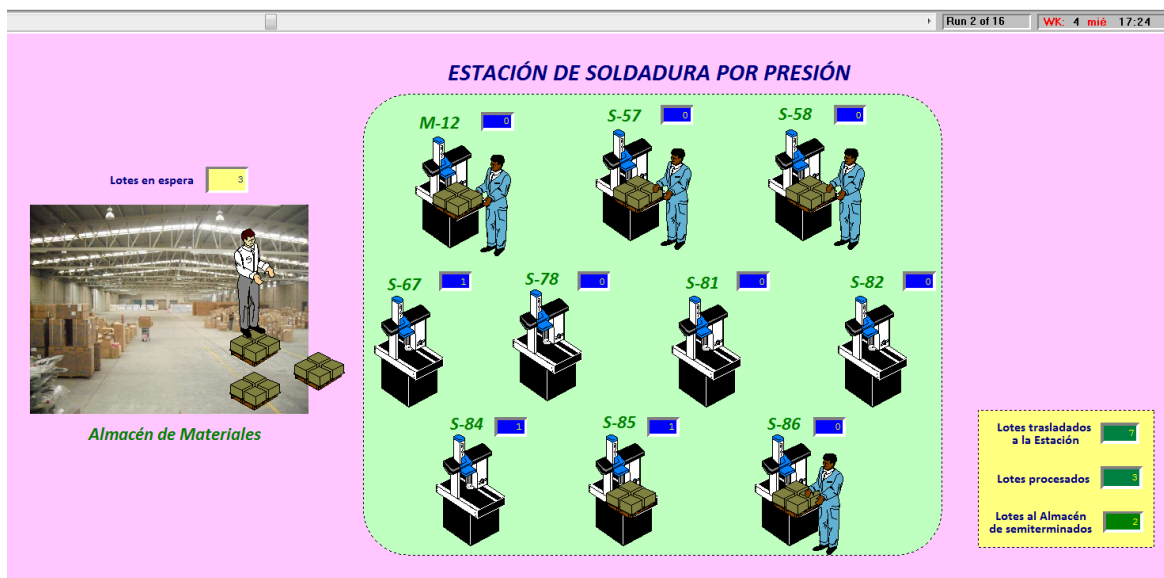


Figura 3.2. Modelo de simulación en ejecución. Fuente: propia (2016)

PROMODEL® es un software genérico de simulación que permite desarrollar modelos de muy diversas índoles, no se especializa en algún tipo en particular, por lo cual ofrece múltiples funciones y utilidades como son macros, subrutinas, arreglos, distribuciones de usuario, animador 3D, editor de gráficas, editor de turnos de trabajo y modelación de datos (StatFit®), entre otras. Sin embargo, de acuerdo con las necesidades de la investigación, su alcance y las limitaciones de disponibilidad de información por las políticas de confidencialidad de la empresa, se han empleado solo algunas de ellas. En investigaciones futuras se puede considerar aprovechar estas bondades del software en posibles ampliaciones del modelo desarrollado o en nuevos modelos a desarrollar.

A continuación se describe e ilustra cómo se construyeron los diferentes componentes del modelo de simulación mediante este versátil software.

### **3.7.1 ENTIDAD**

La figura 3.3 muestra la gráfica de un “pallet” empleada para representar la entidad del modelo, y cómo es su configuración. El nombre genérico asignado es “Lote de producto”. La velocidad de 50 metros por minuto (mpm) la asigna Promodel por defecto pero no es un parámetro de interés que incida en el modelo, ya que en la lógica de programación se consideran las distribuciones de probabilidad que definen los diferentes traslados de los lotes de producto. Así pues, las estadísticas sobre la actividad de la entidad se basan en series de tiempo.

Tanto para la entidad como para las locaciones, recursos, atributos, procesamiento y demás componentes del modelo de simulación, se documentaron notas descriptivas y aclaratorias en los campos que brinda el software, como un principio de la realización de la investigación para asegurar el entendimiento del modelo.

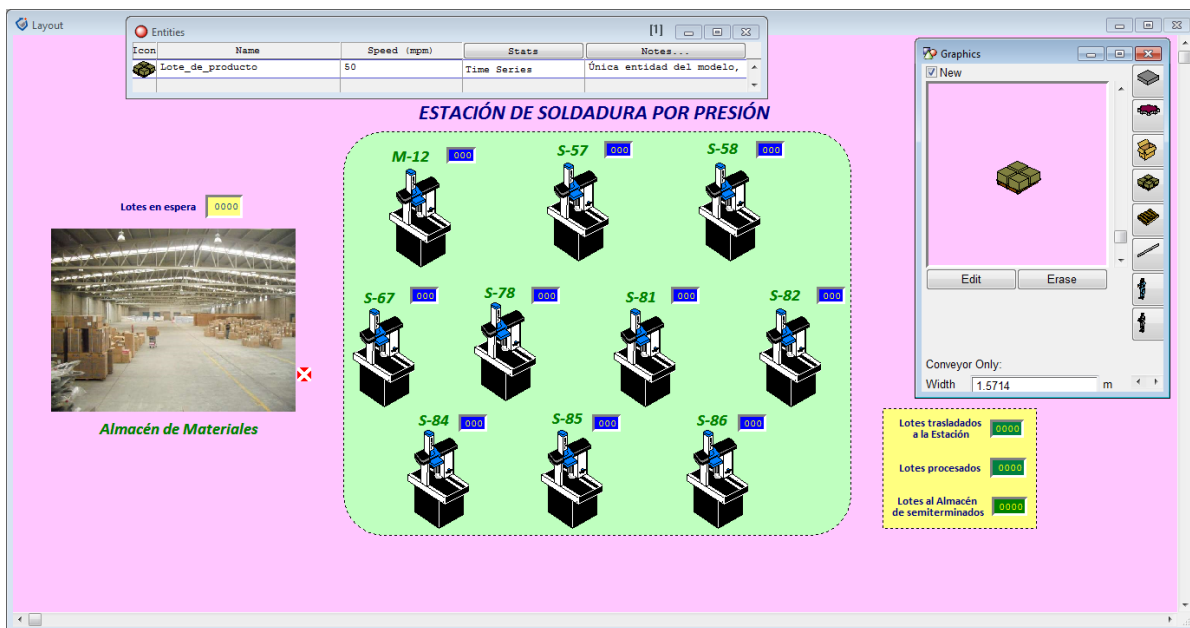


Figura 3.3. Entidad del modelo de simulación. Fuente: propia (2016)

### 3.7.2 LOCACIONES

Como se observa en la figura 3.4 las locaciones del modelo de simulación corresponden a las 10 máquinas de soldadura por presión de la estación de trabajo y el almacén de materiales, para la cual se importó una imagen real.

Aunque se consideran los tiempos de los traslados del producto procesado de la estación de trabajo hasta el almacén de productos semiterminados, no es necesario incluir éste último como locación del modelo porque corresponde a la salida. Se asume que los almacenes tienen la capacidad para albergar 30 lotes, y cada una de las máquinas de soldadura por presión tiene la capacidad de operación de 1 lote a la vez, de acuerdo con los supuestos.

La figura 3.4 muestra la configuración de las locaciones en el modelo. Las máquinas no asocian tiempos de inactividad (downtimes, DTs), ya que según lo descrito en los supuestos del modelo el tiempo de los alistamientos de máquina es despreciables por la cantidad de alistamientos requeridos en el proyecto de estudio. Es importante considerar en la construcción del modelo que el almacén de materiales no representa una fila sino un área de suministro, lo cual asume fundamentos matemáticos diferentes. El software asocia la fila con los conceptos de la teoría de líneas de espera, donde el abastecimiento de entidades es de una a

la vez, mientras que el área de espera o suministro asocia el concepto de poder abastecer entidades a las locaciones subsiguientes de manera simultánea.

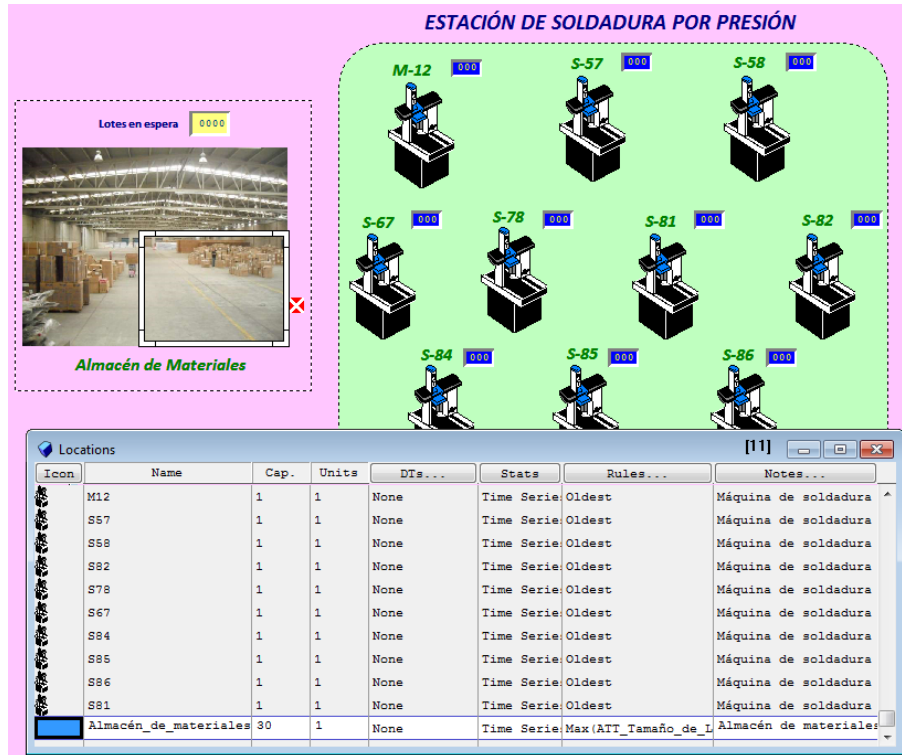


Figura 3.4. Locaciones del modelo de simulación. Fuente: propia (2016)

### 3.7.3 ARRIBOS

Los arribos configurados en el modelo consisten en los 10 lotes de producto del proyecto de estudio correspondientes a los 10 tipos de partes requeridas. Cada lote de producto entra al sistema como producto en proceso y asocia 2 atributos que son el “tipo de parte” y el “tamaño de lote”. El primero permite direccionar cada lote a la máquina de soldadura definida según las alternativas de procesamiento planteadas inicialmente o a las asignaciones óptimas que se obtengan con el modelo lineal combinatorio, en relación con la situación actual y con los escenarios a evaluar. El segundo atributo corresponde al volumen de unidades requerido por cada tipo de parte, para el caso de estudio.

La figura 3.5 ilustra la configuración de los arribos en el modelo de simulación, que define para cada uno la entidad que entra al sistema, la locación a la que llega, en

qué cantidad cada vez que llega, el momento de llegada (puede configurarse con una fecha exacta, pero en el caso de estudio interesa el número de semana, el día de la semana y la hora de acuerdo con la programación del turno de trabajo que se describe posteriormente), la cantidad de ocurrencias, la frecuencia de llegadas de cada entidad y la lógica de programación donde se definen los valores de los atributos, en este caso de estudio.

Entity...	Location...	Qty Each...	First Time...	Occurrences	Frequency	Logic...	Disabl
Lote_de_producto	Almacén_de_materiales	1	Wk 1, Mon @ 09:00	1	1	ATT_Tipo_de_Parte = 10	No
Lote_de_producto	Almacén_de_materiales	1	Wk 1, Mon @ 09:00	1	1	ATT_Tipo_de_Parte = 10	No
Lote_de_producto	Almacén_de_materiales	1	Wk 1, Mon @ 09:00	1	1	ATT_Tipo_de_Parte = 10	No
Lote_de_producto	Almacén_de_materiales	1	Wk 1, Mon @ 09:00	1	1	ATT_Tipo_de_Parte = 10	No
Lote_de_producto	Almacén_de_materiales	1	Wk 1, Mon @ 09:00	1	1	ATT_Tipo_de_Parte = 10	No
Lote_de_producto	Almacén_de_materiales	1	Wk 1, Mon @ 09:00	1	1	ATT_Tipo_de_Parte = 10	No
Lote_de_producto	Almacén_de_materiales	1	Wk 1, Mon @ 09:00	1	1	ATT_Tipo_de_Parte = 10	No
Lote_de_producto	Almacén_de_materiales	1	Wk 1, Mon @ 09:00	1	1	ATT_Tipo_de_Parte = 10	No
Lote_de_producto	Almacén_de_materiales	1	Wk 1, Mon @ 09:00	1	1	e_lote = 32000	No

Figura 3.5. Arribos del modelo de simulación. Fuente: propia (2016)

Adicionalmente, es indispensable considerar que dado que el almacén de materiales es un área de suministro y no una fila, se aplica a esta locación una regla de abastecimiento que consiste en priorizar el suministro de los lotes de acuerdo con el máximo valor del atributo “tamaño de lote”, es decir se trasladan a la estación de soldadura por presión primero los lotes de mayor volumen de unidades (ver la configuración del almacén de materiales en la figura 3.4). Lo anterior con el fin de optimizar el rendimiento de la estación de trabajo.

### 3.7.4 PROCESAMIENTO

En la programación del modelo de simulación es fundamental definir la secuencia de actividades que se realizan sobre la entidad, esto se logra trazando la ruta que sigue el lote de producto por las diferentes locaciones, durante el proceso. La figura 3.6 ilustra cómo se logró lo anterior, siguiendo con fidelidad lo establecido en el modelo conceptual. Las flechas indican la secuencia del proceso, que también

asocia lógica de programación de lo que ocurre en las locaciones y de los movimientos de los lotes entre ellas.

La entrada de los lotes al sistema es la llegada al almacén de materiales y la salida se cumple cuando ya se han procesado los lotes y el almacenista los retira de la estación de trabajo para trasladarlos al almacén de semiterminados.

El criterio para que un lote vaya a una máquina específica de la estación de soldadura por presión inicialmente depende de las alternativas de procesamiento planteadas por la empresa, y posteriormente depende de las asignaciones que resulten de la aplicación del modelo lineal combinatorio, lo cual está definido en la lógica de programación.

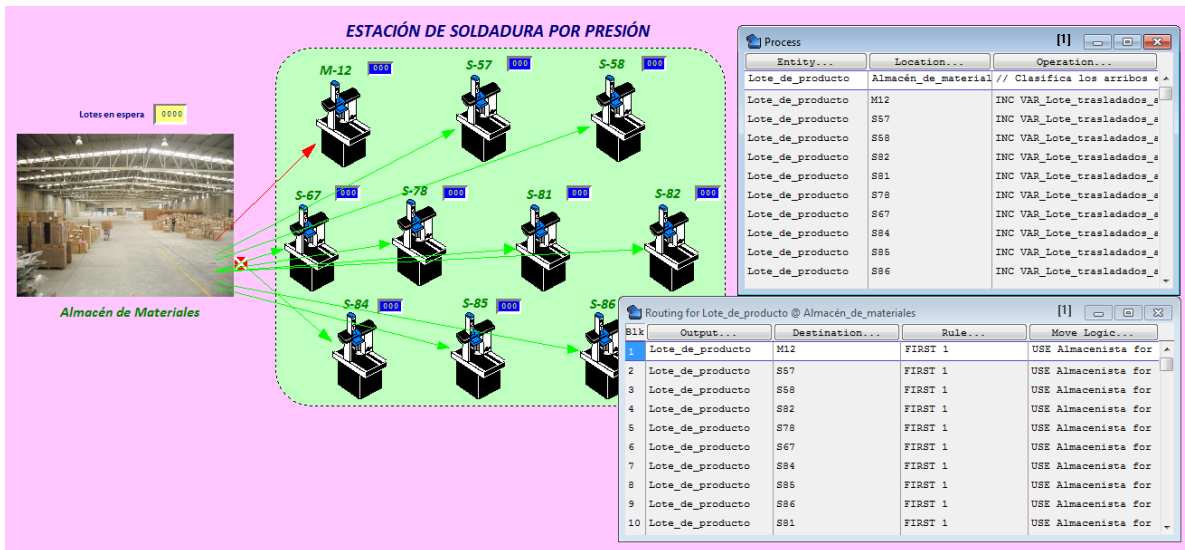


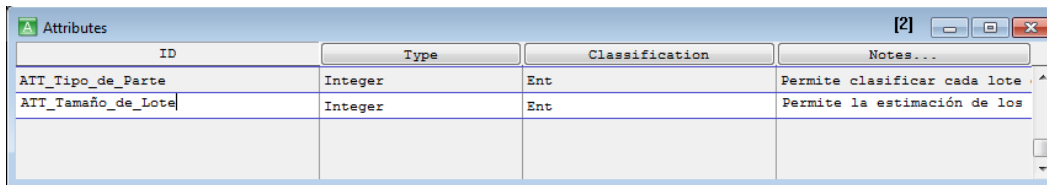
Figura 3.6. Secuencia de procesamiento del modelo de simulación. Fuente: propia (2016)

### 3.7.5 ATRIBUTOS

Los atributos son características cuantificables de las entidades y de las locaciones. Los atributos facilitan la creación de la lógica de programación, brindando flexibilidad en la modelación para lograr representar fielmente el comportamiento de un sistema real, manejando hasta cierto grado la complejidad del mismo. Por restricción de la versión empleada de PROMODEL® máximo se pueden crear 5 atributos en el modelo; sin embargo, en la construcción del modelo de simulación para el caso de

estudio solo fueron necesarios 2 atributos asociados a la única entidad, el “tipo de parte” y el “tamaño de lote”, a los cuales se asignan valores en la configuración de los arribos.

En este caso de estudio, los dos atributos toman valores enteros, pero el software permite también crear atributos con valores reales. Para las locaciones no fue necesario asociar atributos. La figura 3.7 muestra la tabla de atributos del modelo de la estación de soldadura por presión y su configuración.



ID	Type	Classification	Notes...
ATT_Tipo_de_Parte	Integer	Ent	Permite clasificar cada lote
ATT_Tamaño_de_Lote	Integer	Ent	Permite la estimación de los

Figura 3.7. Atributos del modelo de simulación. Fuente propia (2016)

### 3.7.6 VARIABLES

Por su parte las variables permiten cuantificar y visualizar valores de interés a monitorear durante la ejecución del modelo de simulación y en los resultados finales. En este caso de estudio existe interés en conocer la cantidad de lotes que esperan en el almacén de materiales, los lotes que se entregan a la estación de trabajo, los lotes procesados en cada máquina y en la estación de trabajo, y los lotes trasladados al almacén de semiterminados, para lo cual se crearon 13 variables.

El incremento de las variables se visualiza en tiempo real durante la ejecución del modelo, de manera que se puede monitorear el desempeño del modelo para contrastarlo con el comportamiento real del sistema. La figura 3.8 ilustra la tabla de variables y su configuración en el modelo de la estación de soldadura por presión, que al igual que los atributos toman valores enteros confirmando así el carácter discreto del presente estudio de simulación.



Icon	ID	Type	Initial value	Stats	Notes...
Yes	VAR_Lote_trasladados_a_la_estacion	Integer	0	Time Series, Ti	Permite incrementar la
Yes	VAR_Lotes_procesados	Integer	0	Time Series, Ti	Permite incrementar la
Yes	VAR_Lotes_al_Almacén_PS	Integer	0	Time Series, Ti	Permite incrementar la
Yes	VAR_M12	Integer	0	Time Series, Ti	Permite incrementar la
Yes	VAR_S57	Integer	0	Time Series, Ti	Permite incrementar la
Yes	VAR_S58	Integer	0	Time Series, Ti	Permite incrementar la
Yes	VAR_S67	Integer	0	Time Series, Ti	Permite incrementar la
Yes	VAR_S78	Integer	0	Time Series, Ti	Permite incrementar la
Yes	VAR_S81	Integer	0	Time Series, Ti	Permite incrementar la
Yes	VAR_S82	Integer	0	Time Series, Ti	Permite incrementar la
Yes	VAR_S84	Integer	0	Time Series, Ti	Permite incrementar la
Yes	VAR_S85	Integer	0	Time Series, Ti	Permite incrementar la
Yes	VAR_S86	Integer	0	Time Series, Ti	Permite incrementar la

Figura 3.8. Variables del modelo de simulación. Fuente: propia (2016)

### 3.7.7 RECURSOS

En coherencia con la decisión asumida por la empresa con relación a la asignación de personal para el proyecto de estudio, se incluyen en el modelo 5 recursos de mano de obra que corresponden a 4 maquinistas dedicados a operar la estación de soldadura por presión, cada uno de los cuales está en capacidad de manejar cualquiera de las 10 máquinas, y también 1 almacenista que es el encargado de realizar los traslados del producto a procesar desde el almacén de materiales hasta la estación de trabajo y del productos procesado desde ésta hasta el almacén de semiterminados, en la proporción de 1,000 piezas cada vez.

Para modelar la utilización de los recursos se crea una red de nodos asociada al conjunto de locaciones que determina las rutas, en este caso bidireccionales, por donde se desplazan los recursos (ver figura 3.9). Es necesario especificar en la lógica de programación del modelo dónde, cuándo, cómo y en qué cantidad son empleados los recursos.

Adicionalmente, se debe configurar los tiempos de estos desplazamientos que corresponden los tiempos de los traslados del producto realizados por el almacenista y que se incluyen como distribuciones de probabilidad obtenidas en el tratamiento estadístico de los tiempos tomados en la fábrica. El tiempo empleado por estos recursos de personal en el modelo, asocia un costo que se estima en la parametrización del modelo combinatorio de asignación.

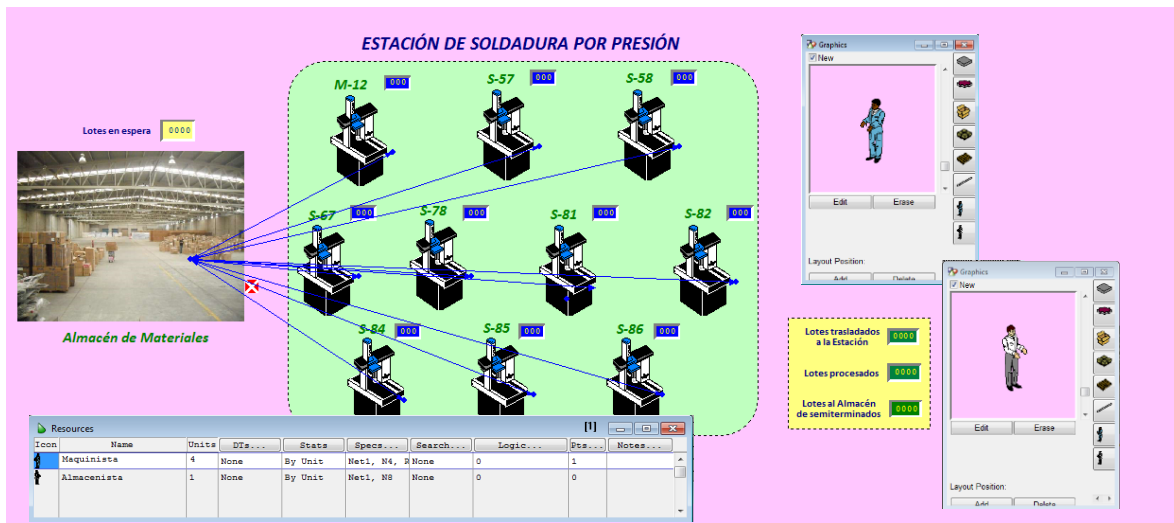


Figura 3.9. Recursos del modelo de simulación. Fuente: propia (2016)

### 3.7.8 TURNO DE TRABAJO

De conformidad con la decisión de la empresa de dedicar al proyecto de estudio solo un turno de trabajo, aunque normalmente se labora en dos turnos, se diseñó el turno fielmente de acuerdo con las condiciones existentes en la fábrica. Para este fin se utilizó la aplicación complementaria de PROMODEL® llamada *Shift Editor*, que genera un archivo externo de tipo .sft vinculable al modelo mediante la función *Shit Assignments*, después de registrarlo en la lista de archivo externos.

El horario del turno diario es de lunes a viernes desde las 8:00 am hasta a las 5:00 pm, incluye una hora de almuerzo entre las 12:00 pm y la 1:00 pm, y dos pausas de quince minutos cada una a las 10:00 am y 3:00 pm. Adicionalmente, se dedican 30 minutos los días lunes, miércoles y viernes a partir de las 8:00 am, para la realización de capacitaciones y entrenamientos (ver figura 3.10). Los tiempos activos e inactivos del turno trabajo son necesarios para la estimación de la capacidad disponible de la estación de trabajo, como se describe en la sección 3.3.

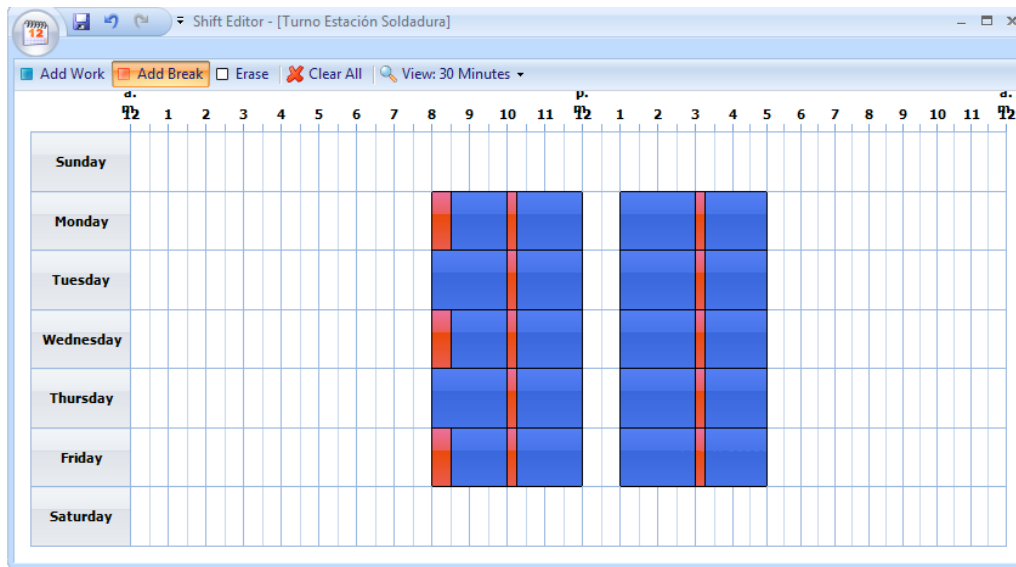


Figura 3.10. Turno de trabajo del modelo de simulación. Fuente: propia (2016)

### 3.7.9 LÓGICA DE PROGRAMACIÓN

La lógica de programación consiste en las instrucciones en un lenguaje de programación computacional, configuradas en el modelo para que relacione y articule todos los componentes involucrados, de manera que el modelo funcione conforme a lo deseado. PROMODEL® utiliza un lenguaje de programación basado en el lenguaje genérico C++, para lo cual ofrece una herramienta opcional denominada *logic builder* que facilita la construcción de expresiones en este lenguaje, asociando elementos y funciones disponibles en el software (ver figura 3.11).

Sin embargo, es necesario un nivel apropiado de conocimiento y experiencia para la creación de algoritmos y códigos de lógica de programación que conlleven al funcionamiento exitoso de un modelo de simulación.

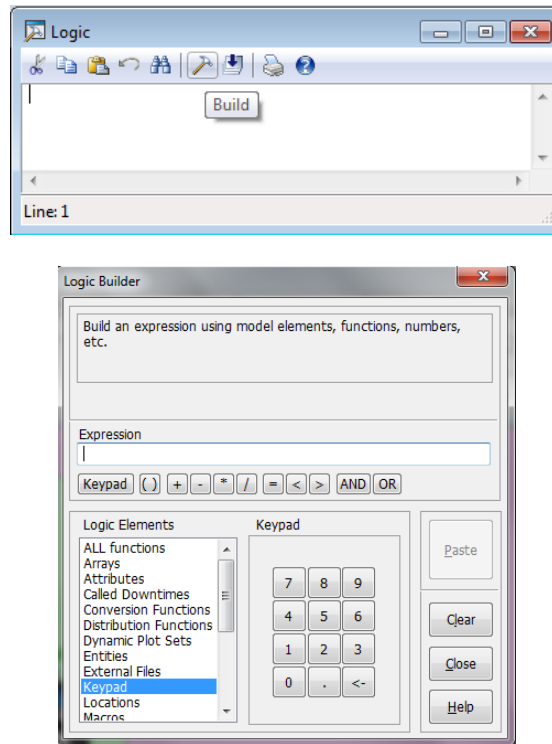


Figura 3.11. Herramienta de construcción de lógica de programación. Fuente: propia (2016)

En este caso de estudio, la lógica del modelo de simulación permite la asignación y el procesamiento del lote en la estación de trabajo, el traslado de los lotes entre los almacenes y la estación de soldadura por presión, el uso de los recursos (maquinistas y almacenista) en las actividades anteriores, la configuración de los atributos de la entidad (lote de producto) en los arribos para definir las rutas del proceso, y el incremento de las variables monitoreadas. Como un principio de la investigación para asegurar el entendimiento de la programación del modelo de simulación, se incluyen notas descriptivas y aclaratorias a lo largo del código.

### 3.7.10 REPORTE DE RESULTADOS

Aunque no es parte de la programación del modelo de simulación, se considera importante mencionar la aplicación que tiene PROMODEL® para la presentación de los resultados obtenidos en cada ejecución del modelo, tanto numérica como gráficamente (ver figura 3.12). Los informes y gráficas que se pueden generar (pueden ser promedios de las réplicas o todos los datos) corresponden a la actividad

y el estado de las locaciones, los recursos, las entidades y las variables consideradas.

Estación Soldadura - ActualOpt.MOD (Normal Run - Avg. Reps)	
Name	Value
Run Date/Time	20/11/2016 02:57:56 p.m.
Model Title	Estación de Soldadura por Presión
Model Path/File	C:\Users\USER\Documents\Maestría UNAM\Proyecto de investigación\Simulación\Estación Soldadura - ActualOpt.MOD
Average Warmup Time (DAY)	0
Average Simulation Time (DAY)	69,14

Figura 3.12. Aplicación para el reporte de los resultados de simulación. Fuente: propia (2016)

### 3.8 VALIDACIÓN DEL MODELO PROGRAMADO

En primer lugar, la validación del modelo programado de simulación tuvo lugar en varias reuniones con representantes del área de Ingeniería y el directivo de Producción de la empresa, las cuales se llevaron a cabo en la fábrica para poder constatar en tiempo real el funcionamiento del modelo con el comportamiento de la estación de soldadura por presión.

A medida que el investigador presentaba el modelo a estos colaboradores de la empresa, surgieron inquietudes y requerimientos sobre su funcionamiento, que dieron lugar a ajustes y mejoras del modelo por parte del investigador, de acuerdo con su conocimiento y experticia en programación y simulación, para lograr representar el comportamiento de la estación de trabajo con un alto nivel de fidelidad que satisfizo a los representantes de la empresa.

Durante las últimas reuniones de validación del modelo de simulación se diligenció una lista de chequeo de verificación del modelo programado (Mesa, 2011), como sugerencia del investigador para otorgar mayor confiabilidad al modelo desarrollado, la cual se presenta en la tabla 3.6. Conforme a las respuestas registradas en esta lista de chequeo, el modelo programado es concordante con el modelo conceptual y es una representación válida de la estación de soldadura por

presión, para los objetos de análisis y para responder a las preguntas de la investigación.

Tabla 3.6. Lista de chequeo de verificación del modelo programado. Fuente: propia (2016)

<b>Proceso que define si el Modelo Programado representa el Modelo Conceptual</b>	<b>SI / NO</b>
¿El modelo programado corresponde con el diagrama de flujo establecido?	SI
¿Se puede construir el diagrama de flujo conceptualizado con base en el análisis del modelo programado?	SI
¿Si se hacen grandes variaciones en los datos de entrada se producen grandes variaciones en los datos de salida?	SI
¿Los parámetros del modelo representan los establecidos en el modelo conceptual y no se cambian inadvertidamente a lo largo del modelo programado?	SI
¿El modelo ha sido probado por alguien diferente al desarrollador?	SI
¿Están representadas en el modelo programado las variables y medidas de interés?	SI
¿La animación es consecuente con la Conceptualización?	SI
¿La programación del modelo está Autodocumentada?	SI
¿Están representados en el modelo programado los supuestos?	SI
¿Los resultados para entradas históricas corresponden a los valores de referencia?	SI

En segundo lugar, se llevó a cabo una validación estadística del modelo programado de simulación, confrontando los resultados arrojados por el modelo con respecto al tiempo promedio de permanencia de un lote en el sistema, en comparación con los históricos reales de la fábrica (de acuerdo con lo mencionado en las secciones 3.1.2 y 3.2.1), por medio de una prueba de hipótesis para la comparación de medias, como se describe a continuación.

## Validación estadística del modelo programado de simulación

La prueba de medias que se describe en esta sección tiene el fin de comprobar estadísticamente la similitud entre las medias poblacionales de la medida de desempeño correspondiente al tiempo de permanencia de un lote de producto en la estación de trabajo (incluyendo los traslados), tanto del sistema real como del modelo de simulación. Por medio de una prueba  $t$  para dos muestras suponiendo varianzas desiguales, se obtiene la evidencia estadística necesaria para concluir si las medias poblacionales son diferentes o no, con lo cual se asume si el modelo es o no una representación válida del sistema real.

Para este fin, primero es necesario determinar las muestras a seleccionar tanto de los datos reales como de los resultados del modelo de simulación. Dado que el modelo puede ejecutarse un número muy grande de veces para obtener resultados, como tamaño de muestra de los resultados del modelo se elige el número de réplicas de simulación,  $n$ . En general, en un modelo de simulación es necesario que las variables aleatorias (en este caso los tiempos unitarios de operación y de traslados, dados por distribuciones de probabilidad) alcancen un estado estable, para lo cual es necesario garantizar que el número de réplicas sea lo suficientemente grande para que la variación entre réplicas no difiera de determinada exactitud ( $\epsilon$ ), el  $100(1-\alpha)\%$  de las veces. El número de réplicas está dado por la siguiente expresión (García et al., 2006):

$$n = \left( \frac{s}{\epsilon} t_{\alpha/2, n-1} \right)^2 \quad (9)$$

Donde:

$t_{\alpha/2, n-1}$ : estadístico de la distribución *t-student* para dos colas con  $n-1$  grados de libertad y nivel de significancia  $\alpha$

$n$ : tamaño de una muestra preliminar de réplicas

$s$ : desviación estándar de la muestra preliminar de réplicas

$\epsilon$ : margen de error

La empresa estableció un margen de 46 horas inactivas de permanencia del lote en la estación de trabajo como un error aceptable en el proceso de manufactura, es

decir  $\epsilon = 46$  horas. Para estimar  $s$ , se establece una muestra preliminar de tamaño aleatorio igual a 10 réplicas y los resultados que arroja el modelo son los siguientes:

Tabla 3.7. Muestra preliminar del tiempo promedio de un lote en la estación simulada. Fuente: propia (2016)

Réplica	Tiempo promedio de un lote en la estación (horas)	Réplica	Tiempo promedio de un lote en la estación (horas)
1	826.31	6	867.19
2	872.60	7	738.25
3	863.63	8	829.51
4	813.26	9	733.70
5	999.36	10	739.84

La desviación estándar de esta muestra preliminar es  $s = 81.03$  horas. Además, el estadístico *t-student* para dos colas con  $n=10$  y  $\alpha=5\%$  es

$$t_{\alpha/2, n-1} = t_{0.025, 9} = 2.26216$$

Así pues, de acuerdo con la ecuación (9) el número de réplicas  $n_M$  para el modelo de simulación es (el subíndice  $M$  hace referencia al tamaño de muestra de los tiempos promedio arrojados por el “modelo” de simulación):

$$n_M = \left( \frac{81.03}{46} (2.26216) \right)^2 = 15.88$$

$$n_M \approx 16 \text{ réplicas}$$

De esta manera, los tiempos promedio de permanencia de un lote en la estación de soldadura por presión para 16 réplicas, se presentan en la tabla 3.8.



Tabla 3.8. Tiempo promedio de un lote en la estación simulada para 16 réplicas.  
Fuente: propia (2016)

Réplica	Tiempo promedio de un lote en la estación (horas)	Réplica	Tiempo promedio de un lote en la estación (horas)
1	826.31	9	733.70
2	872.60	10	739.84
3	863.63	11	829.95
4	813.26	12	849.14
5	999.36	13	723.09
6	867.19	14	914.86
7	738.25	15	857.79
8	829.51	16	726.18

Para esta muestra de datos del modelo de simulación la media  $\hat{x}_M$  y la desviación estándar  $\sigma_M$  son (el subíndice  $M$  hace referencia a que son estimadores muestrales del “modelo” de simulación):

$$\hat{x}_M = 824.04 \text{ horas} \quad \text{y} \quad \sigma_M = 77.07 \text{ horas}$$

Para comparar estos resultados del modelo de simulación con los datos reales de la planta mediante la prueba de medias, se debe definir la muestra de los datos del tiempo de procesamiento de un lote en la estación de trabajo. Como se menciona en la sección 3.2.1, bajo el criterio de la norma de muestreo ANSI/ASQ Z1.4 el tamaño de la muestra para una población de 146 lotes procesados en la fábrica entre 2010 y 2016,  $n_E$  es (el subíndice  $E$  hace referencia al tamaño de muestra de los tiempos de procesamiento observados en la “estación” de trabajo):

$$n_E = 20 \text{ lotes}$$

Usando Excel® se seleccionan aleatoriamente 20 datos de tiempo de procesamiento de un lote entre los 146 que conforman la población de lotes observada, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 3.9. Muestra de 20 tiempos de procesamiento de un lote en la estación real de trabajo. Fuente: empresa metalmecánica (2016)

Lote	Tiempo de procesamiento de un lote en la estación (horas)	Lote	Tiempo de procesamiento de un lote en la estación (horas)
1	825.17	11	653.22
2	1043.00	12	625.04
3	639.71	13	942.36
4	1034.17	14	1052.40
5	928.49	15	1019.18
6	1021.43	16	697.15
7	991.43	17	984.44
8	788.21	18	1116.33
9	659.03	19	1069.59
10	751.91	20	1046.45

Para esta muestra de datos del tiempo de procesamiento real de un lote en la estación, la media  $\hat{x}_E$  y la desviación estándar  $\sigma_E$  son (el subíndice  $E$  hace referencia a que son estimadores muestrales de la “estación” real de trabajo):

$$\hat{x}_E = 894.44 \text{ horas} \quad \text{y} \quad \sigma_E = 169.92 \text{ horas}$$

Ahora se cuenta con toda información necesaria para demostrar si el modelo de simulación es una representación válida de la estación de soldadura por presión mediante la prueba de medias. Ésta se basa en la siguiente prueba de hipótesis sobre las medias poblacionales de los tiempos observados en la estación de trabajo  $\mu_E$  y los tiempos arrojados por el modelo de simulación  $\mu_M$  (Montgomery et al., 2006):

$$H_0: \mu_E = \mu_M$$

$$H_A: \mu_E \neq \mu_M$$

La hipótesis nula  $H_0$  establece que se asume que las medias poblacionales son iguales y por ende el modelo de simulación representa a la estación de trabajo, mientras que la hipótesis alternativa  $H_A$  establece que las medias poblacionales son diferentes y por tanto el modelo no representa a la estación. El criterio de rechazo de la hipótesis nula  $H_0$  se presenta cuando:

$$|t_0| > t_{\alpha/2, v}$$

Donde  $t_0$  corresponde al estadístico *t-student* de la prueba y  $t_{\alpha/2, v}$  es el valor crítico de la distribución *t-student* para dos colas, con nivel de significancia  $\alpha$  y  $v$  grados de libertad.

Particularmente en esta prueba de medias se asume que las varianzas poblacionales son diferentes y desconocidas, de manera que el estimador estadístico de la prueba está dado por (primero se presenta el desarrollo paso a paso de la prueba y posteriormente se verifica mediante el uso de Excel®):

$$t_0 = \frac{\hat{x}_E - \hat{x}_M}{\sqrt{\frac{\sigma_E^2}{n_E} + \frac{\sigma_M^2}{n_M}}} \quad (10)$$

Sustituyendo en la ecuación (10) los valores obtenidos de las muestras, se tiene:

$$t_0 = \frac{894.44 - 824.04}{\sqrt{\frac{(169.92)^2}{20} + \frac{(77.07)^2}{16}}}$$

$$t_0 = 1.65235$$

Asimismo, el valor crítico de la distribución *t-student* para dos colas  $t_{\alpha/2, v}$ , tiene como parámetros el nivel de significancia  $\alpha=5\%$  y los grados de libertad  $v$ , dados por la siguiente expresión:

$$v = \frac{\left(\frac{\sigma_E^2}{n_E} + \frac{\sigma_M^2}{n_M}\right)^2}{\frac{\left(\frac{\sigma_E^2}{n_E}\right)^2}{n_E - 1} + \frac{\left(\frac{\sigma_M^2}{n_M}\right)^2}{n_M - 1}} \quad (11)$$

Sustituyendo en la ecuación (11) los valores obtenidos de las muestras, se tiene:

$$v = \frac{\left(\frac{(169.92)^2}{20} + \frac{(77.07)^2}{16}\right)^2}{\frac{\left(\frac{(169.92)^2}{20}\right)^2}{20-1} + \frac{\left(\frac{(77.07)^2}{16}\right)^2}{16-1}}$$

$$v = 27.70$$

$$v \approx 28 \text{ grados de libertad}$$

Por lo tanto, en esta prueba el valor crítico de la distribución *t-student* para dos colas es:

$$t_{\alpha/2,v} = t_{0,025,28} = 2.04840$$

Por consiguiente, el criterio de rechazo de la hipótesis nula  $|t_0| > t_{\alpha/2,v}$  no se cumple y en consecuencia no hay evidencia estadística de que las medias poblacionales de los datos históricos de la estación de soldadura por presión y de los datos obtenidos en el modelo de simulación sean diferentes, por lo cual se asume que estas medias son iguales. Este análisis permite concluir que el modelo de simulación es una representación válida de la estación de trabajo.

Para corroborar la validación estadística del modelo de simulación, esta prueba de medias también se llevó a cabo mediante el uso Excel® obteniendo los mismos resultados, según se muestra en la tabla 3.10. En el anexo 1 Modelación de datos, se muestra cómo realizar este procedimiento en Excel®.

Tabla 3.10. Prueba *t* para dos muestras suponiendo varianzas desiguales. Fuente: propia (2016)

	<b>ESTACIÓN</b>	<b>MODELO</b>
Media	894,4350932	824,04125
Varianza	28873,68076	5940,425572
Observaciones	20	16
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	28	
Estadístico <i>t</i>	1,652346296	
P(T<=t) una cola	0,054817874	
Valor crítico de <i>t</i> (una cola)	1,701130934	

	<b>ESTACIÓN</b>	<b>MODELO</b>
P(T<=t) dos colas	0,109635748	
Valor crítico de t (dos colas)	2,048407142	

### 3.9 RESULTADOS DE SIMULACIÓN DE LA SITUACIÓN ACTUAL

Contando con el modelo de simulación desarrollado como una representación válida de la estación de soldadura por presión, considerando las variables aleatorias de los tiempos unitarios de operación y traslados de productos definidas por las distribuciones de probabilidad presentadas en la tablas 3.3 y 3.4 y de acuerdo con las alternativas de procesamiento establecidas por la empresa (descritas en la tabla 3.2), se ejecuta el modelo para estimar el tiempo total de operación de cada máquina, conforme a los volúmenes de unidades demandados por cada tipo de parte del proyecto de estudio. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 3.11 y corresponden a los tiempos promedio obtenidos de correr 16 réplicas del modelo para todas las alternativas de procesamiento.

Tabla 3.11. Tiempo de operación de las máquinas para la situación actual de la estación de trabajo (horas). Fuente: propia (2016)

		Máquina									
	Parte	M12	S57	S58	S67	S78	S81	S82	S84	S85	S86
1	67360 5NA0A		644.66		560.15			565.48	563.31	558.97	
2	80995 5NA0A	645.90		709.86		1,852.71	1,088.88				1,896.20
3	80994 5NA2A	367.45			341.98		1,120.36			317.67	490.52
4	80995 5NA2A	244.86			451.39		306.39			293.04	352.68
5	809945NA1A		440.33	521.48	293.04				521.45		293.17
6	80995 5NA1A		484.04	460.34	259.32				250.41		399.67
7	788B5 5NA0A	306.83		484.94		250.96		359.04	555.04		
8	788B4 5NA0A	521.97		516.78		287.89		345.81	254.95		
9	76680 5NM0A		644.97			344.44	590.32	321.31		218.76	
10	76681 5NM0A		495.27			649.29	276.83	935.93		416.41	

Adicionalmente, el modelo proporcionó los tiempos consolidados de la utilización de los recursos en toda la longitud de la simulación, los cuales corresponden a las horas de mano de obra de los maquinistas y el almacenista en la ejecución del proyecto de estudio completo. Los almacenistas se emplearon 16,583 horas y el almacenista 4,011 horas durante todo el proyecto.

Estos tiempos de operación de las máquinas y de la mano de obra son la mayor parte de la información de entrada requerida para la estimación de los costos de operación asociados, que constituyen el parámetro de la función objetivo del modelo combinatorio de asignación, según se describe en el siguiente capítulo.

## **CAPÍTULO 4**

### **MODELO DE ASIGNACIÓN**

De acuerdo con lo exuesto en el capítulo 2 acerca del problema de asignación, este capítulo presenta el desarrollo paso a paso del modelo combinatorio de asignación del caso de estudio, describiendo la construcción de la función objetivo (sección 4.1.1), las restricciones (sección 4.1.2) y la matriz de costos asociada (sección 4.1.3), y resolviendo el modelo para encontrar una solución óptima de la situación actual de la estación de soldadura por presión (sección 4.2).

#### **4.1. FORMULACIÓN DEL MODELO**

De acuerdo con las características del problema que se presenta en la estación de soldadura por presión y el estudio de caso seleccionado, la investigación se enfoca en resolver un problema combinatorio típico en investigación de operación. El modelo que es utilizado para lograr una solución óptima del problema en este caso de estudio, es un modelo clásico de asignación. Considerando que la estación de trabajo cuenta con 10 máquinas de soldadura y el proyecto de estudio requiere el procesamiento de también de 10 partes metálicas, el problema está equilibrado y se puede establecer una matriz cuadrada de  $m \times n$  con  $m = n = 10$ , que contiene 50 diferentes tiempos de operación como alternativas resultantes del procesamiento de cada parte en 5 posibles máquinas (según los supuestos); tiempos que se obtuvieron mediante el modelo de simulación (tabla 3.11). Las otras 50 entradas de la matriz cuadrada son asignaciones inaceptables, según se describe más adelante.

Como se describe posteriormente los tiempos de operación de las máquinas junto con los tiempos de mano de obra simulados asocian costos de operación, lo cual permite que la matriz cuadrada de tiempos se convierta en una matriz de costos (valores reales), que es el parámetro y función de peso del problema de asignación. De esta manera, teniendo en cuenta los conceptos descritos en el numeral 1.2, se tiene un modelo de asignación equilibrado donde el procesamiento del volumen total de cada parte debe ser asignado a una sola máquina para lograr el mínimo costo posible de operación, lo cual representa la solución óptima. Dado que la función objetivo de costos y las restricciones del problema contienen solo términos lineales, se trata de un modelo lineal de asignación.

Dentro del conjunto de problemas combinatorios estudiados en investigación de operaciones éste caso de estudio se caracteriza por tener una complejidad computacional P, que puede resolverse para encontrar una solución óptima en tiempo polinomial, mediante métodos como simplex y el método húngaro; el primero es el empleado en la presente investigación.

#### 4.1.1. FUNCIÓN OBJETIVO

De acuerdo con lo anterior, el objetivo es asignar la carga total de trabajo de una parte metálica a una sola máquina para generar el costo mínimo de operación de la estación de trabajo, por lo cual el modelo se formula en términos de la variable de decisión  $x_{ij}$ , que toma el valor de uno si una determinada parte es asignada en una determinada máquina y cero si no se asigna. De esta forma, la función objetivo del modelo está definida por la expresión:

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (12)$$

Donde,

$Z$ : función de costos de operación de la estación de soldadura por presión

$m$ : total de máquinas de la estación de soldadura por presión,  $i = 0,1,2, \dots m$

$n$ : total de tipos de parte del proyecto de estudio,  $j = 0,1,2, \dots n$

$c_{m \times n}$ : matriz cuadrada de costos de operación por máquina y por parte, con  $m=n=10$

$c_{ij}$ : costo de procesar la parte  $j$  en la máquina  $i$

$x$ : variable binaria de decisión

#### 4.1.2. RESTRICCIONES

De acuerdo con las alternativas de configuración para el procesamiento definidas por las áreas de producción en ingeniería de la empresa, que se mencionan en los supuestos de la modelación (sección 3.3), el modelo lineal de asignación de las cargas de trabajo de los 10 tipos de partes a las 10 máquinas de la estación de soldadura por presión, está sujeto a las siguientes restricciones:



**4.1.2.1. Procesamiento de lote por máquina.** En primer lugar, el volumen total de cada tipo de parte se debe procesar en una sola máquina, lo cual constituye la primera restricción del modelo de asignación y se expresa matemáticamente así:

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = 1 \quad (13)$$

Esta restricción significa que el procesamiento del volumen total de cada tipo de parte no puede dividirse para asignarse a varias máquinas, este volumen total de piezas debe ser asignado a una sola máquina, debido a que para la empresa a lo largo de la ejecución del proyecto cambiar constantemente la configuración de las máquinas incrementaría considerablemente los costos de alistamiento. Esta restricción conlleva a que la variable de decisión del modelo  $x_{ij}$  tome necesaria y únicamente los valores de 0 y 1.

**4.1.2.2. Cantidad de lotes por máquina.** En segundo lugar, una máquina puede procesar máximo dos tipos de partes, lo cual ha considerado la empresa también por minimizar los costos de alistamientos de las máquinas. Esta restricción se representa matemáticamente con la siguiente expresión:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq 2 \quad (14)$$

**4.1.2.3. Variable binaria, no negatividad.** Adicionalmente, como se ha mencionado es importante considerar en la formulación del modelo de asignación que la variable está restringida a tomar solo los valores 0 y 1, lo cual permite la asignación de toda la carga de trabajo de un tipo de parte a una sola máquina, y también permite cumplir el criterio de no negatividad requerido en todo modelo de programación lineal. Esto es:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si la parte } i \text{ se asigna a la máquina } j \\ 0 & \text{si no se asigna} \end{cases} \quad (15)$$

### 4.1.3. MATRIZ DE COSTOS

Como se ha mencionado, la matriz de costos constituye el parámetro o la función de peso en la función objetivo del problema de asignación y se calcula a partir de los tiempos de operación obtenidos a partir del estudio de simulación. De acuerdo con la información suministrada por la empresa, para la estación de soldadura de presión el costo promedio de una hora-máquina es:

$$\text{Hora-máquina} = \text{MXN\$ } 12.00$$

Este costo promedio considera principalmente costos de capital, energía, depreciación, mantenimiento, repuestos e insumos y otros costos como intereses de capital y valor de salvamento, según lo expresado por el directivo de producción de la empresa. Multiplicando cada uno de los tiempos de operación de las máquinas obtenidos en la simulación (tabla 3.11) por este costo unitario de operación, se obtiene los costos de operación de las máquinas de la estación de soldadura por presión para el proyecto de estudio bajo las condiciones actuales, tal como se presenta en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Costos de operación de las máquinas para las alternativas de procesamiento del proyecto de estudio (MXN\$). Fuente: propia (2017)

Parte		Máquina									
		M12	S57	S58	S67	S78	S81	S82	S84	S85	S86
1	67360 5NA0A		\$ 7,736		\$ 6,722			\$ 6,786	\$ 6,760	\$ 6,708	
2	80995 5NA0A	\$ 7,751		\$ 8,518		\$ 22,233	\$ 13,067				\$ 22,754
3	80994 5NA2A	\$ 4,409			\$ 4,104		\$ 13,444			\$ 3,812	\$ 5,886
4	80995 5NA2A	\$ 2,938			\$ 5,417		\$ 3,677			\$ 3,516	\$ 4,232
5	809945NA1A		\$ 5,284	\$ 6,258	\$ 3,516				\$ 6,257		\$ 3,518
6	80995 5NA1A		\$ 5,808	\$ 5,524	\$ 3,112				\$ 3,005		\$ 4,796
7	788B5 5NA0A	\$ 3,682		\$ 5,819		\$ 3,012		\$ 4,308	\$ 6,660		
8	788B4 5NA0A	\$ 6,264		\$ 6,201		\$ 3,455		\$ 4,150	\$ 3,059		
9	76680 5NM0A		\$ 7,740			\$ 4,133	\$ 7,084	\$ 3,856		\$ 2,625	
10	76681 5NM0A		\$ 5,943			\$ 7,791	\$ 3,322	\$ 11,231		\$ 4,997	

Asimismo, el costo de una hora-trabajador varía para el caso de los maquinistas y del almacenista, de la siguiente manera:

Hora-trabajador: maquinista = MXN\$ 27.38

Hora-trabajador: almacenista = MXN\$ 18.25

Conforme a las políticas de gestión del talento humano establecidas en la empresa, el perfil de un maquinista es de tecnólogo titulado y su remuneración promedio es de 3 salarios mínimos legales, y el almacenista debe acreditar un perfil de técnico y su remuneración promedio es de 2 salarios mínimos legales. Las equivalencias del costo de la hora-trabajador se establecen considerando estas condiciones salariales en una jornada diaria de un solo turno de 8 horas, que como se ha descrito es la asignación del horario laboral establecido por la empresa para ejecutar el proyecto de estudio.

Adicionalmente, a partir de los tiempos consolidados de mano de obra que arrojó el modelo de simulación (ver sección 3.9) se puede estimar una cantidad de las horas-trabajador (tanto de los maquinistas como del almacenista) utilizadas en cada una de las 50 alternativas de procesamiento, con base en la proporción de horas-máquina de cada alternativa. Esa cantidad proporcional de horas-trabajador multiplicada por los costos unitarios descritos, constituyen los costos de mano de obra para las alternativas de procesamiento de las 10 partes del proyecto de estudio en la estación de soldadura por presión, como se muestra en la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Costos de mano de obra para las alternativas de procesamiento del proyecto de estudio (MXN\$). Fuente: propia (2017)

Parte		Máquina									
		M12	S57	S58	S67	S78	S81	S82	S84	S85	S86
1	67360 5NA0A		\$ 12,855		\$ 11,160			\$ 11,135	\$ 11,842	\$ 11,580	
2	80995 5NA0A	\$ 12,880		\$ 14,142		\$ 38,383	\$ 22,892				\$ 37,338
3	80994 5NA2A	\$ 7,321			\$ 6,819		\$ 23,211			\$ 6,255	\$ 10,312
4	80995 5NA2A	\$ 5,073			\$ 8,888		\$ 6,110			\$ 6,161	\$ 7,026
5	809945NA1A		\$ 8,772	\$ 10,399	\$ 6,161				\$ 10,268		\$ 6,074
6	80995 5NA1A		\$ 9,531	\$ 9,678	\$ 5,372				\$ 4,989		\$ 7,970
7	788B5 5NA0A	\$ 6,450		\$ 9,549		\$ 5,004		\$ 7,153	\$ 11,499		
8	788B4 5NA0A	\$ 10,278		\$ 10,706		\$ 5,736		\$ 7,270	\$ 5,084		
9	76680 5NM0A		\$ 13,362			\$ 7,241	\$ 11,624	\$ 6,407		\$ 4,358	
10	76681 5NM0A		\$ 10,412			\$ 12,785	\$ 5,515	\$ 19,390		\$ 8,304	

Finalmente, sumando estos costos estimados de la operación de cada máquina y la mano de obra correspondiente, se obtiene la matriz de costos  $c_{ij}$ , que se presenta en la tabla 4.3 y constituye el parámetro de ponderación en la función de objetivo del modelo combinatorio de asignación de la carga de trabajo en la estación de soldadura por presión, para el proyecto de estudio.

Tabla 4.3. Matriz de costos de operación (MXN\$). Fuente: propia (2017)

Parte		Máquina									
		M12	S57	S58	S67	S78	S81	S82	S84	S85	S86
1	67360 5NA0A	\$ 100,000	\$ 20,591	\$ 100,000	\$ 17,881	\$ 100,000	\$ 100,000	\$ 17,921	\$ 18,602	\$ 18,288	\$ 100,000
2	80995 5NA0A	\$ 20,631	\$ 100,000	\$ 22,661	\$ 100,000	\$ 60,615	\$ 35,958	\$ 100,000	\$ 100,000	\$ 100,000	\$ 60,093
3	80994 5NA2A	\$ 11,730	\$ 100,000	\$ 100,000	\$ 10,923	\$ 100,000	\$ 36,655	\$ 100,000	\$ 100,000	\$ 10,067	\$ 16,198
4	80995 5NA2A	\$ 8,011	\$ 100,000	\$ 100,000	\$ 14,305	\$ 100,000	\$ 9,786	\$ 100,000	\$ 100,000	\$ 9,677	\$ 11,258
5	809945NA1A	\$ 100,000	\$ 14,056	\$ 16,657	\$ 9,677	\$ 100,000	\$ 100,000	\$ 100,000	\$ 16,525	\$ 100,000	\$ 9,592
6	80995 5NA1A	\$ 100,000	\$ 15,340	\$ 15,202	\$ 8,484	\$ 100,000	\$ 100,000	\$ 100,000	\$ 7,994	\$ 100,000	\$ 12,766
7	788B5 5NA0A	\$ 10,132	\$ 100,000	\$ 15,368	\$ 100,000	\$ 8,016	\$ 100,000	\$ 11,461	\$ 18,159	\$ 100,000	\$ 100,000
8	788B4 5NA0A	\$ 16,542	\$ 100,000	\$ 16,908	\$ 100,000	\$ 9,190	\$ 100,000	\$ 11,420	\$ 8,143	\$ 100,000	\$ 100,000
9	76680 5NM0A	\$ 100,000	\$ 21,102	\$ 100,000	\$ 100,000	\$ 11,374	\$ 18,708	\$ 10,263	\$ 100,000	\$ 6,983	\$ 100,000
10	76681 5NM0A	\$ 100,000	\$ 16,355	\$ 100,000	\$ 100,000	\$ 20,577	\$ 8,837	\$ 30,621	\$ 100,000	\$ 13,301	\$ 100,000

Para efectos de solucionar el modelo, el presente caso de estudio requiere una asignación inaceptable, que como se ha mencionado consiste en definir asignaciones de entrada inaceptables a las cuales se asigna un valor arbitrario muy grande que conduce a restringir la asignación. En la matriz de costos presentada en la tabla 4.3, las 50 celdas que no asocian una alternativa de procesamiento no deben quedar vacías para evitar que asuman por defecto el valor de cero y distorsionen el resultado de la minimización del costo. Por esta razón se asigna el valor de MXN\$100,000 como asignación inaceptable de ese conjunto celdas no contempladas como alternativas de procesamiento en la estación de soldadura por presión.

## 4.2. SOLUCIÓN ÓPTIMA

Recogiendo el modelo de asignación descrito en este capítulo y reemplazando en la ecuación (12) los correspondientes valores de la matriz de costos para las alternativas de procesamiento establecidas por la empresa, se tiene:

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{i=1}^{10} \sum_{j=1}^{10} c_{ij}x_{ij}$$

$$\begin{aligned} \text{Minimizar } Z = & c_{12}x_{12} + c_{14}x_{14} + c_{17}x_{17} + c_{18}x_{18} + c_{19}x_{19} + c_{21}x_{21} + c_{23}x_{23} + c_{25}x_{25} \\ & + c_{26}x_{26} + c_{210}x_{210} + c_{31}x_{31} + c_{34}x_{34} + c_{36}x_{36} + c_{39}x_{39} + c_{310}x_{310} \\ & + c_{41}x_{41} + c_{44}x_{44} + c_{46}x_{46} + c_{49}x_{49} + c_{410}x_{410} + c_{52}x_{52} + c_{53}x_{53} \\ & + c_{54}x_{54} + c_{58}x_{58} + c_{510}x_{510} + c_{62}x_{62} + c_{63}x_{63} + c_{64}x_{64} + c_{68}x_{68} \\ & + c_{610}x_{610} + c_{71}x_{71} + c_{73}x_{73} + c_{75}x_{75} + c_{77}x_{77} + c_{78}x_{78} + c_{81}x_{81} \\ & + c_{83}x_{83} + c_{85}x_{85} + c_{87}x_{87} + c_{88}x_{88} + c_{92}x_{92} + c_{95}x_{95} + c_{96}x_{96} + c_{97}x_{97} \\ & + c_{99}x_{99} + c_{102}x_{102} + c_{105}x_{105} + c_{106}x_{106} + c_{107}x_{107} + c_{109}x_{109} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Minimizar } Z = & 20,591x_{12} + 17,881x_{14} + 17,921x_{17} + 18,602x_{18} + 18,288x_{19} \\ & + 20,631x_{21} + 22,661x_{23} + 60,615x_{25} + 35,958x_{26} + 60,093x_{210} \\ & + 11,730x_{31} + 10,923x_{34} + 36,655x_{36} + 10,067x_{39} + 16,198x_{310} \\ & + 8,011x_{41} + 14,305x_{44} + 9,786x_{46} + 9,677x_{49} + 11,258x_{410} \\ & + 14,056x_{52} + 16,657x_{53} + 9,677x_{54} + 16,525x_{58} + 9,592x_{510} \\ & + 15,340x_{62} + 15,202x_{63} + 8,484x_{64} + 7,994x_{68} + 12,766x_{610} \\ & + 10,132x_{71} + 15,368x_{73} + 8,016x_{75} + 11,461x_{77} + 18,159x_{78} \\ & + 16,542x_{81} + 16,908x_{83} + 9,190x_{85} + 11,420x_{87} + 8,143x_{88} \\ & + 21,102x_{92} + 11,374x_{95} + 18,708x_{96} + 10,263x_{97} + 6,983x_{99} \\ & + 16,355x_{102} + 20,577x_{105} + 8,837x_{106} + 30,621x_{107} + 13,301x_{109} \end{aligned}$$

Sujeto a,

$$x_{12} + x_{14} + x_{17} + x_{18} + x_{19} = 1$$

$$x_{21} + x_{23} + x_{25} + x_{26} + x_{210} = 1$$

$$x_{31} + x_{34} + x_{36} + x_{39} + x_{310} = 1$$

$$x_{41} + x_{44} + x_{46} + x_{49} + x_{410} = 1$$

$$\begin{aligned}
x_{52} + x_{53} + x_{54} + x_{58} + x_{510} &= 1 \\
x_{62} + x_{63} + x_{64} + x_{68} + x_{610} &= 1 \\
x_{71} + x_{73} + x_{75} + x_{77} + x_{78} &= 1 \\
x_{81} + x_{83} + x_{85} + x_{87} + x_{88} &= 1 \\
x_{92} + x_{95} + x_{96} + x_{97} + x_{99} &= 1 \\
x_{102} + x_{105} + x_{106} + x_{107} + x_{109} &= 1
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
x_{21} + x_{31} + x_{41} + x_{71} + x_{81} &\leq 2 \\
x_{12} + x_{52} + x_{62} + x_{92} + x_{102} &\leq 2 \\
x_{23} + x_{53} + x_{63} + x_{73} + x_{83} &\leq 2 \\
x_{14} + x_{34} + x_{44} + x_{54} + x_{64} &\leq 2 \\
x_{25} + x_{75} + x_{85} + x_{95} + x_{105} &\leq 2 \\
x_{26} + x_{36} + x_{46} + x_{96} + x_{106} &\leq 2 \\
x_{17} + x_{77} + x_{87} + x_{97} + x_{107} &\leq 2 \\
x_{18} + x_{58} + x_{68} + x_{78} + x_{88} &\leq 2 \\
x_{19} + x_{39} + x_{49} + x_{99} + x_{109} &\leq 2 \\
x_{210} + x_{310} + x_{410} + x_{510} + x_{610} &\leq 2
\end{aligned}$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si la parte } i \text{ se asigna a la máquina } j \\ 0 & \text{si no se asigna} \end{cases}$$

De acuerdo con lo comentado acerca de la complejidad computacional asociada a los problemas de asignación (se pueden resolver en un tiempo acotado por una expresión polinomial), este modelo de programación lineal se puede resolver mediante diferentes métodos pero se ha elegido el método simplex por ser el más común y por disponer de herramientas computacionales conocidas para su

aplicación. Para tal fin, se ha hecho uso de la herramienta Solver de MS-Excel®, y se ha obtenido la siguiente asignación óptima para las alternativas actuales de la estación de soldadura por presión:

Tabla 4.4. Asignación óptima de la carga de trabajo para la situación actual.  
Fuente: propia (2017)

Parte		Máquina									
		M12	S57	S58	S67	S78	S81	S82	S84	S85	S86
1	67360 5NA0A	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
2	80995 5NA0A	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	80994 5NA2A	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
4	80995 5NA2A	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	809945NA1A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
6	80995 5NA1A	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
7	788B5 5NA0A	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
8	788B4 5NA0A	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
9	76680 5NM0A	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
10	76681 5NM0A	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0

Esta asignación óptima en la situación actual de la carga de trabajo a la estación de soldadura por presión para el proyecto de estudio, obtenida con el modelo de asignación, se configura en el modelo de simulación (recurriendo a la relación de reciprocidad entre los dos modelos) para evaluar el desempeño de la estación de trabajo en esta asignación de los 10 tipos de partes a procesar en las 10 máquinas de la estación de soldadura por presión. Para estas condiciones óptimas actuales de la estación de trabajo, se presentan los resultados de las horas de operación de las máquinas, las horas de mano de obra y los costos asociados en las tablas 4.5, 4.6 y 4.7 respectivamente.

Tabla 4.5. Horas-máquina en la asignación óptima de la carga de trabajo para la situación actual. Fuente: propia (2017)

Parte		Máquina									
		M12	S57	S58	S67	S78	S81	S82	S84	S85	S86
1	67360 5NA0A				459.29						
2	80995 5NA0A	425.04									
3	80994 5NA2A									199.90	
4	80995 5NA2A	425.04									
5	809945NA1A										244.84
6	80995 5NA1A								153.59		
7	788B5 5NA0A					172.32					
8	788B4 5NA0A								153.59		
9	76680 5NM0A									199.90	
10	76681 5NM0A						190.00				

Tabla 4.6. Horas-trabajador en la asignación óptima de la carga de trabajo para la situación actual. Fuente: propia (2017)

Parte		Máquina									
		M12	S57	S58	S67	S78	S81	S82	S84	S85	S86
1	67360 5NA0A				438.35						
2	80995 5NA0A	405.66									
3	80994 5NA2A									190.79	
4	80995 5NA2A	405.66									
5	809945NA1A										233.68
6	80995 5NA1A								146.59		
7	788B5 5NA0A					164.46					
8	788B4 5NA0A								146.59		
9	76680 5NM0A									190.79	
10	76681 5NM0A						181.34				



Tabla 4.7. Costos de operación en la asignación óptima de la carga de trabajo para la situación actual (MXN\$). Fuente: propia (2017)

Parte		Máquina									
		M12	S57	S58	S67	S78	S81	S82	S84	S85	S86
1	67360 5NA0A				\$ 16,231						
2	80995 5NA0A	\$ 15,020									
3	80994 5NA2A									\$ 7,064	
4	80995 5NA2A	\$ 15,020									
5	809945NA1A										\$ 8,652
6	80995 5NA1A								\$ 5,428		
7	788B5 5NA0A					\$ 6,090					
8	788B4 5NA0A								\$ 5,428		
9	76680 5NM0A									\$ 7,064	
10	76681 5NM0A						\$ 6,714				

Los resultados totales óptimos para esta situación actual de la estación de trabajo se presentan en la tabla 4.8.

Tabla 4.8. Tiempos y costos totales óptimos de la situación actual en la estación de trabajo. Fuente: propia (2017)

Tiempos y costos totales óptimos situación actual	
Horas-máquina totales	<b>2,623.51</b>
Horas-trabajador totales	<b>2,503.90</b>
Horas promedio de un lote en el sistema	<b>752.98</b>
Costo operación máquinas (MXN\$)	<b>\$ 31,482</b>
Costo mano de obra (MXN\$)	<b>\$ 61,230</b>
<b>Costo Total (MXN\$)</b>	<b>\$ 92,712</b>

En términos de costos, es importante para la empresa considerar las proporciones que se debe invertir en la utilización de las máquinas y en la mano de obra requerida para la ejecución completa del proyecto de estudio, bajo estas condiciones actuales de operación de la estación de trabajo. La figura 4.1 ilustra esta composición del costo en términos monetarios y porcentuales.

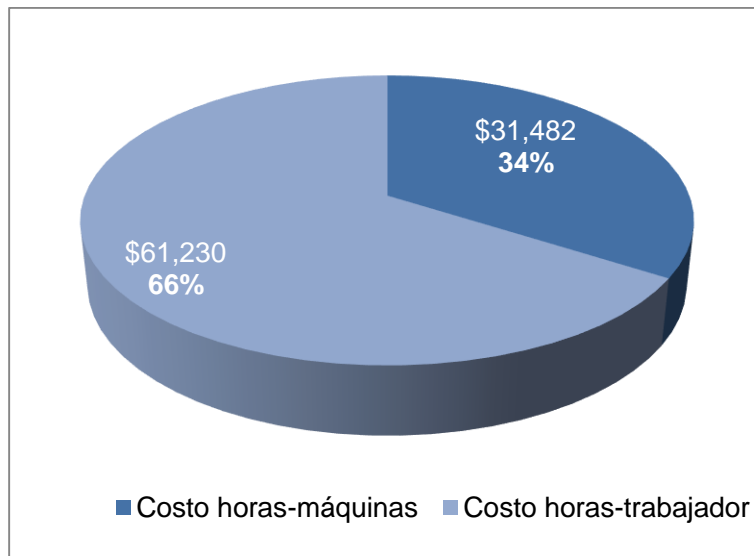


Figura 4.1. Composición del costo en la ejecución del proyecto de estudio para la situación actual. Fuente: propia (2017)

Asimismo, los resultados óptimos para la situación actual de la estación de soldadura por presión con relación a los días programados y la capacidad utilizada para el procesamiento del proyecto de estudio, en comparación con la capacidad disponible de la estación de trabajo calculada en la sección 3.4, se muestran en la tabla 4.9:

Tabla 4.9. Capacidad utilizada y días programados óptimos de la situación actual en la estación de trabajo. Fuente: propia (2017)

<b>Resultados óptimos situación actual</b>	
Capacidad disponible (horas-máquina)	<b>19,800</b>
Capacidad utilizada (horas-máquina)	<b>2,624</b>
<b>% capacidad utilizada</b>	<b>13,3%</b>
<b>Días programados</b>	<b>51</b>

En las condiciones actuales, la capacidad que se utilizaría para el procesamiento del proyecto de estudio corresponde al 13,3% de la capacidad disponible de la estación de soldadura por presión (en un periodo anual), lo cual constituye un resultado aceptable para la empresa considerando los demás proyectos que tiene planificados. En la medida en que sea posible reducir este porcentaje de utilización de la capacidad, será favorable para la empresa. La figura 4.2 muestra las

proporciones de capacidad utilizada y remanente resultantes de la ejecución del proyecto de estudio.

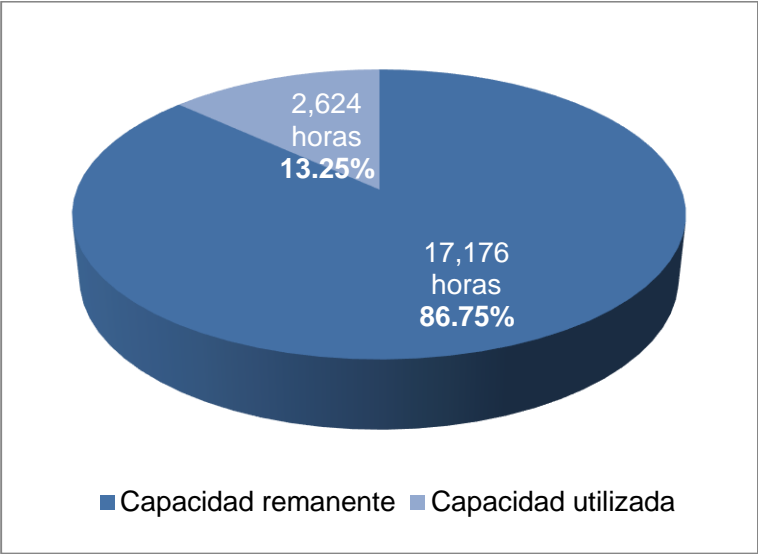


Figura 4.2. Capacidad utilizada y remanente en la ejecución del proyecto de estudio para la situación actual. Fuente: propia (2017)

Adicionalmente, en estas condiciones se debe programar 51 días de trabajo en la estación de soldadura por presión para cumplir con la totalidad del proyecto de estudio, lo cual es un resultado favorable para la empresa ya que este periodo corresponde a 2.5 meses calendario aproximadamente y está dentro del plazo máximo de 3 meses pactado con el cliente en el acuerdo de nivel de servicio para la terminación de este proceso (ver sección 3.2).

## **CAPÍTULO 5**

### **EXPERIMENTOS Y RESULTADOS**

En el ámbito del estudio de simulación, se conoce como la realización de experimentos a la ejecución de ajustes premeditados en la configuración del modelo para predecir posibles escenarios futuros del sistema simulado. De esta manera, en el estudio de caso de la estación de soldadura por presión se quiere responder a la pregunta “¿qué pasaría si...?”, es decir predecir con cierta precisión el efecto de cambios en la estación de trabajo para mejorar su velocidad y rendimiento, cambios que están asociados a necesidades de inversión.

Teniendo claro el panorama sobre la asignación óptima de la carga de trabajo en la estación para el proyecto de estudio de acuerdo con unas alternativas de procesamiento, lo cual se puede denominar como “la situación actual” de la estación de trabajo, en este capítulo se analizan los cambios en los costos de operación de la estación de trabajo con relación a posibles escenarios de inversiones para mejorar el rendimiento operativo la estación, mediante cambios factibles en la configuración de las máquinas. Entre la situación actual y los posibles escenarios se cuenta con un conjunto de decisiones, para las cuales los modelos de simulación y optimización desarrollados brindan los criterios matemáticos suficientes para recomendar a la empresa la adopción del curso de acción más favorable.

#### **5.1. DESCRIPCIÓN DE ESCENARIOS**

De acuerdo con el resultado óptimo de la asignación de la carga de trabajo del proyecto de estudio en la estación de soldadura por presión, la empresa ha considerado cuatro posibles implementaciones para mejorar el rendimiento y de esta manera reducir el costo de operación. A continuación se describe cada una de estas opciones.

##### **5.1.1 ESCENARIO 1: PROPUESTA DE INGENIERÍA**

En primer lugar, teniendo en cuenta las alternativas de procesamiento establecidas (tabla 3.2) el equipo de ingeniería de la empresa ha considerado realizar cambios en las configuraciones de las máquinas de soldadura por presión que implican la mejora del rendimiento de algunas de ellas pero a la vez la disminución del

rendimiento de otras, por el incremento y decremento de los tiempos unitarios de operación, de la siguiente manera:

Tabla 5.1. Cambios en los rendimientos de operación para el escenario 1. Fuente: empresa metalmecánica (2017)

Máquina	Tiempo unitario de operación	
	Incremento	Decremento
M12	Parte 2, 30%	Parte 4, 50%
S84	Parte 8, 50%	Parte 6, 30%
S85	Parte 3, 30%	Parte 9, 20%

Lo anterior es consecuencia de desinstalar la herramienta de una máquina para instalarla en otra, en tres ocasiones. Estos cambios se efectúan en las máquinas que están incluidas en la asignación óptima de la situación actual, pero se quiere revisar con el modelo de simulación qué rendimientos resultan de todas las alternativas de procesamiento bajo estas nuevas condiciones. La puesta en marcha de esta implementación implica la contratación de 2 técnicos especializados durante una semana aproximadamente, lo cual requiere una inversión de MXN\$ 3,000.

De esta manera, los cambios descritos en la tabla 5.1 se plasman en el modelo de simulación ajustando acordemente las distribuciones de probabilidad de los respectivos tiempos unitarios de operación. Los tiempos de operación obtenidos para las alternativas de procesamiento bajo estas nuevas condiciones se presentan en la tabla 5.2 y la matriz de costos totales de operación resultante se muestra en la tabla 5.3.

Tabla 5.2. Tiempos unitarios de operación para el escenario 1 (horas). Fuente: propia (2017)

Parte		Máquina									
		M12	S57	S58	S67	S78	S81	S82	S84	S85	S86
1	67360 5NA0A		643.80		560.15			565.48	563.10	558.85	
2	80995 5NA0A	511.90		709.80		1,853.51	1,088.88				1,896.20
3	80994 5NA2A	366.01			341.74		1,122.59			317.67	488.64
4	80995 5NA2A	323.34			451.39		307.42			261.92	352.68
5	809945NA1A		440.53	523.34	261.92				521.45		279.07
6	80995 5NA1A		484.04	452.52	308.14				289.08		404.17
7	788B5 5NA0A	303.82		484.94		239.05		338.97	659.67		

		Máquina									
Parte		M12	S57	S58	S67	S78	S81	S82	S84	S85	S86
8	788B4 5NA0A	521.97		585.01		303.90		328.75	223.05		
9	76680 5NM0A		736.00			340.59	590.32	305.84		231.85	
10	76681 5NM0A		484.37			649.29	367.15	1,021.60		365.19	

Tabla 5.3. Matriz de costos para el escenario 1 (MXN\$). Fuente: propia (2017)

		Máquina									
Parte		M12	S57	S58	S67	S78	S81	S82	S84	S85	S86
1	67360 5NA0A	\$ 100,000	\$ 20.655	\$ 100,000	\$ 17.952	\$ 100,000	\$ 100,000	\$ 17.921	\$ 18.646	\$ 17.906	\$ 100,000
2	80995 5NA0A	\$ 16.423	\$ 100,000	\$ 22.748	\$ 100,000	\$ 59.387	\$ 36.056	\$ 100,000	\$ 100,000	\$ 100,000	\$ 60.093
3	80994 5NA2A	\$ 11.730	\$ 100,000	\$ 100,000	\$ 10.964	\$ 100,000	\$ 35.968	\$ 100,000	\$ 100,000	\$ 10.067	\$ 16.181
4	80995 5NA2A	\$ 10.360	\$ 100,000	\$ 100,000	\$ 14.305	\$ 100,000	\$ 9.863	\$ 100,000	\$ 100,000	\$ 8.673	\$ 11.303
5	809945NA1A	\$ 100,000	\$ 14.118	\$ 16.790	\$ 8.673	\$ 100,000	\$ 100,000	\$ 100,000	\$ 16.525	\$ 100,000	\$ 8.942
6	80995 5NA1A	\$ 100,000	\$ 15.340	\$ 14.984	\$ 9.873	\$ 100,000	\$ 100,000	\$ 100,000	\$ 9.265	\$ 100,000	\$ 12.967
7	788B5 5NA0A	\$ 10.061	\$ 100,000	\$ 15.368	\$ 100,000	\$ 7.669	\$ 100,000	\$ 10.863	\$ 21.136	\$ 100,000	\$ 100,000
8	788B4 5NA0A	\$ 16.542	\$ 100,000	\$ 18.744	\$ 100,000	\$ 9.739	\$ 100,000	\$ 10.886	\$ 7.156	\$ 100,000	\$ 100,000
9	76680 5NM0A	\$ 100,000	\$ 23.582	\$ 100,000	\$ 100,000	\$ 11.278	\$ 18.708	\$ 9.812	\$ 100,000	\$ 7.430	\$ 100,000
10	76681 5NM0A	\$ 100,000	\$ 16.039	\$ 100,000	\$ 100,000	\$ 20.577	\$ 11.767	\$ 32.733	\$ 100,000	\$ 11.716	\$ 100,000

Ejecutando el modelo de asignación con esta nueva matriz de costos, se obtiene una asignación óptima diferente de la carga de trabajo, según se muestra en la tabla 5.4.

Tabla 5.4. Asignación óptima de la carga de trabajo para el escenario 1. Fuente: propia (2017)

		Máquina									
Parte		M12	S57	S58	S67	S78	S81	S82	S84	S85	S86
1	67360 5NA0A	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
2	80995 5NA0A	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	80994 5NA2A	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
4	80995 5NA2A	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
5	809945NA1A	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0

		Máquina									
Parte		M12	S57	S58	S67	S78	S81	S82	S84	S85	S86
6	80995 5NA1A	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
7	788B5 5NA0A	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
8	788B4 5NA0A	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
9	76680 5NM0A	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
10	76681 5NM0A	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0

Siguiendo la misma metodología con la cual se evaluó la situación actual, esta nueva asignación óptima se configura en el modelo de simulación para obtener los tiempos de operación de las máquinas, tiempos de mano de obra y costos óptimos a partir de esta implementación, según se presenta en las tablas 5.5, 5.6 y 5.7.

Tabla 5.5. Horas-máquina en la asignación óptima de la carga de trabajo para el escenario 1. Fuente: propia (2017)

		Máquina									
Parte		M12	S57	S58	S67	S78	S81	S82	S84	S85	S86
1	67360 5NA0A							460.99			
2	80995 5NA0A	655.19									
3	80994 5NA2A				245.69						
4	80995 5NA2A									147.77	
5	809945NA1A				245.69						
6	80995 5NA1A								154.56		
7	788B5 5NA0A					194.29					
8	788B4 5NA0A								154.56		
9	76680 5NM0A									147.77	
10	76681 5NM0A						198.07				

Tabla 5.6. Horas-trabajador en la asignación óptima de la carga de trabajo para el escenario 1. Fuente: propia (2017)

		Máquina									
Parte		M12	S57	S58	S67	S78	S81	S82	S84	S85	S86
1	67360 5NA0A							428.02			
2	80995 5NA0A	608.33									
3	80994 5NA2A				228.12						

		Máquina									
Parte		M12	S57	S58	S67	S78	S81	S82	S84	S85	S86
4	80995 5NA2A									137.2	
5	809945NA1A				228.12						
6	80995 5NA1A								143.51		
7	788B5 5NA0A					180.39					
8	788B4 5NA0A								143.51		
9	76680 5NM0A									137.2	
10	76681 5NM0A						183.9				

Tabla 5.7. Costos de operación en la asignación óptima de la carga de trabajo para el escenario 1 (MXN\$). Fuente: propia (2017)

		Máquina									
Parte		M12	S57	S58	S67	S78	S81	S82	S84	S85	S86
1	67360 5NA0A							\$ 15,954			
2	80995 5NA0A	\$ 22,675									
3	80994 5NA2A				\$ 8,503						
4	80995 5NA2A									\$ 5,114	
5	809945NA1A				\$ 8,503						
6	80995 5NA1A								\$ 5,349		
7	788B5 5NA0A					\$ 6,724					
8	788B4 5NA0A								\$ 5,349		
9	76680 5NM0A									\$ 5,114	
10	76681 5NM0A						\$ 6,855				

En este escenario el tiempo total de operación de las máquinas es de 2,605 horas-máquina, la capacidad utilizada 13.2%, el tiempo total de mano de obra 2,418 horas-trabajador, los días programados 44 y el costo total de operación MXN\$ 90,139.

### 5.1.2 ESCENARIO 2: PROPUESTA 1 DEL PROVEEDOR

En segundo lugar, la empresa ha acudido a su proveedor especializado en moldes de soldadura para analizar los resultados obtenidos en la situación actual y sugerir mejoras. Inicialmente el proveedor propone implementar un nuevo molde de soldadura para la manufactura del tipo de parte 2 en la máquina M12, de acuerdo con la asignación óptima en la situación actual, ya que este tipo de parte es el de mayor número de unidades a procesar en el proyecto de estudio (316,000 piezas).



Este nuevo molde permite incrementar el rendimiento de la máquina, disminuyendo el tiempo unitario de operación en 33% y tiene un costo de MXN\$ 4,000.

Por consiguiente, este escenario requiere ajustar en dicha proporción los parámetros de la distribución de probabilidad del tiempo unitario de procesamiento de la parte 2 en la máquina M12 en el modelo de simulación, para la asignación óptima de la carga de trabajo en la situación actual. Los resultados de los tiempos de procesamiento de las máquinas, tiempos de mano de obra y costos de operación en este escenario se presentan en las tablas 5.8, 5.9 y 5.10.

Tabla 5.8. Horas-máquina en la asignación óptima de la carga de trabajo para el escenario 2. Fuente: propia (2017)

Parte		Máquina									
		M12	S57	S58	S67	S78	S81	S82	S84	S85	S86
1	67360 5NA0A				459.29						
2	80995 5NA0A	336.95									
3	80994 5NA2A									200.24	
4	80995 5NA2A	336.95									
5	809945NA1A										242.56
6	80995 5NA1A								155.49		
7	788B5 5NA0A					177.74					
8	788B4 5NA0A								155.49		
9	76680 5NM0A									200.24	
10	76681 5NM0A						196.29				

Tabla 5.9. Horas-trabajador en la asignación óptima de la carga de trabajo para el escenario 2. Fuente: propia (2017)

Parte		Máquina									
		M12	S57	S58	S67	S78	S81	S82	S84	S85	S86
1	67360 5NA0A				433.51						
2	80995 5NA0A	318.04									
3	80994 5NA2A									189.00	
4	80995 5NA2A	318.04									
5	809945NA1A										228.95
6	80995 5NA1A								146.76		
7	788B5 5NA0A					167.76					
8	788B4 5NA0A								146.76		
9	76680 5NM0A									189.00	

		Máquina									
Parte		M12	S57	S58	S67	S78	S81	S82	S84	S85	S86
10	76681 5NM0A						185.27				

Tabla 5.10. Costos de operación en la asignación óptima de la carga de trabajo para el escenario 2 (MXN\$). Fuente: propia (2017)

		Máquina									
Parte		M12	S57	S58	S67	S78	S81	S82	S84	S85	S86
1	67360 5NA0A				\$ 16,017						
2	80995 5NA0A	\$ 11,750									
3	80994 5NA2A									\$ 6,983	
4	80995 5NA2A	\$ 11,750									
5	809945NA1A										\$ 8,459
6	80995 5NA1A								\$ 5,422		
7	788B5 5NA0A					\$ 6,198					
8	788B4 5NA0A								\$ 5,422		
9	76680 5NM0A									\$ 6,983	
10	76681 5NM0A						\$ 6,845				

Así pues, en este escenario el tiempo total de operación de las máquinas es de 2,461 horas-máquina, la capacidad utilizada 12.4%, el tiempo total de mano de obra 2,323 horas-trabajador, los días programados 45 y el costo total de operación MXN\$ 85,830.

### 5.1.3 ESCENARIO 3: PROPUESTA 2 DEL PROVEEDOR

En tercer lugar, el proveedor especializado en moldes de soldadura propone la opción de implementar el nuevo molde de soldadura para la manufactura del tipo de parte 3 en la máquina S85, de acuerdo con la asignación óptima en la situación actual. Este tipo de parte requiere también un elevado número de unidades a procesar en el proyecto de estudio (79,000 piezas). El nuevo molde permite incrementar el rendimiento de la máquina, reduciendo el tiempo unitario de operación en 50% y tiene un costo de MXN\$ 3,000.

Al igual que en el escenario 2, este escenario implica ajustar en dicha proporción los parámetros de la distribución de probabilidad del tiempo unitario de procesamiento de la parte 3 en la máquina S85 en el modelo de simulación, para la

asignación óptima de la carga de trabajo en la situación actual. Los resultados de los tiempos de procesamiento de las máquinas, tiempos de mano de obra y costos de operación en este escenario se presentan en las tablas 5.11, 5.12 y 5.13.

Tabla 5.11. Horas-máquina en la asignación óptima de la carga de trabajo para el escenario 3. Fuente: propia (2017)

Parte		Máquina									
		M12	S57	S58	S67	S78	S81	S82	S84	S85	S86
1	67360 5NA0A				458.76						
2	80995 5NA0A	432.31									
3	80994 5NA2A									154.40	
4	80995 5NA2A	432.31									
5	809945NA1A										257.09
6	80995 5NA1A								153.60		
7	788B5 5NA0A					165.99					
8	788B4 5NA0A								153.60		
9	76680 5NM0A									154.40	
10	76681 5NM0A						170.39				

Tabla 5.12. Horas-trabajador en la asignación óptima de la carga de trabajo para el escenario 3. Fuente: propia (2017)

Parte		Máquina									
		M12	S57	S58	S67	S78	S81	S82	S84	S85	S86
1	67360 5NA0A				430.41						
2	80995 5NA0A	405.59									
3	80994 5NA2A									144.86	
4	80995 5NA2A	405.59									
5	809945NA1A										241.20
6	80995 5NA1A								144.11		
7	788B5 5NA0A					155.73					
8	788B4 5NA0A								144.11		
9	76680 5NM0A									144.86	
10	76681 5NM0A						159.86				

Tabla 5.13. Costos de operación en la asignación óptima de la carga de trabajo para el escenario 3 (MXN\$). Fuente: propia (2017)

Parte		Máquina									
		M12	S57	S58	S67	S78	S81	S82	S84	S85	S86
1	67360 5NA0A				\$ 15,964						
2	80995 5NA0A	\$ 15,043									
3	80994 5NA2A									\$ 5,373	
4	80995 5NA2A	\$ 15,043									
5	809945NA1A										\$ 8,946
6	80995 5NA1A								\$ 5,345		
7	788B5 5NA0A					\$ 5,776					
8	788B4 5NA0A								\$ 5,345		
9	76680 5NM0A									\$ 5,373	
10	76681 5NM0A						\$ 5,929				

De esta manera, en este escenario el tiempo total de operación de las máquinas es de 2,533 horas-máquina, la capacidad utilizada 12.8%, el tiempo total de mano de obra 2,376 horas-trabajador, los días programados 51 y el costo total de operación MXN\$ 88,136.

#### 5.1.4 ESCENARIO 4: COMBINACIÓN DE OPCIONES

Finalmente, la empresa ha decidido evaluar el escenario donde se combinen las opciones de los escenarios 2 y 3, es decir adquirir los dos nuevos moldes para el procesamiento de las partes 2 y 3 en las máquinas M12 y S85 respectivamente, en la asignación óptima de la situación actual. Por supuesto, la mejora en el rendimiento de las máquinas es el mismo (33% y 50% respectivamente) y el costo de ambos moldes es de MXN\$ 7,000.

Similarmente, en este escenario se ajustan en estas proporciones los parámetros de las distribuciones de probabilidad de los tiempos unitarios de procesamiento de las partes 2 y 3 en las máquinas M12 y S85 respectivamente en el modelo de simulación, para la asignación óptima de la carga de trabajo en la situación actual. Los resultados de los tiempos de procesamiento de las máquinas, tiempos de mano de obra y costos de operación en este escenario se presentan en las tablas 5.14, 5.15 y 5.16.

Tabla 5.14. Horas-máquina en la asignación óptima de la carga de trabajo para el escenario 4. Fuente: propia (2017)

		Máquina									
Parte		M12	S57	S58	S67	S78	S81	S82	S84	S85	S86
1	67360 5NA0A				458.76						
2	80995 5NA0A	341.71									
3	80994 5NA2A									155.32	
4	80995 5NA2A	341.71									
5	809945NA1A										254.56
6	80995 5NA1A								155.25		
7	788B5 5NA0A					171.42					
8	788B4 5NA0A								155.25		
9	76680 5NM0A									155.32	
10	76681 5NM0A						177.41				

Tabla 5.15. Horas-trabajador en la asignación óptima de la carga de trabajo para el escenario 4. Fuente: propia (2017)

		Máquina									
Parte		M12	S57	S58	S67	S78	S81	S82	S84	S85	S86
1	67360 5NA0A				426.77						
2	80995 5NA0A	317.89									
3	80994 5NA2A									144.49	
4	80995 5NA2A	317.89									
5	809945NA1A										236.81
6	80995 5NA1A								144.43		
7	788B5 5NA0A					159.47					
8	788B4 5NA0A								144.43		
9	76680 5NM0A									144.49	
10	76681 5NM0A						165.04				

Tabla 5.16. Costos de operación en la asignación óptima de la carga de trabajo para el escenario 4 (MXN\$). Fuente: propia (2017)

		Máquina									
Parte		M12	S57	S58	S67	S78	S81	S82	S84	S85	S86
1	67360 5NA0A				\$ 15,771						
2	80995 5NA0A	\$ 11,747									

Parte		Máquina									
		M12	S57	S58	S67	S78	S81	S82	S84	S85	S86
3	80994 5NA2A									\$ 5,340	
4	80995 5NA2A	\$ 11,747									
5	809945NA1A										\$ 8,751
6	80995 5NA1A								\$ 5,337		
7	788B5 5NA0A					\$ 5,893					
8	788B4 5NA0A								\$ 5,337		
9	76680 5NM0A									\$ 5,340	
10	76681 5NM0A						\$ 6,099				

En este escenario el tiempo total de operación de las máquinas es de 2,367 horas-máquina, la capacidad utilizada 12.0%, el tiempo total de mano de obra 2,202 horas-trabajador, los días programados 44 y el costo total de operación MXN\$ 81,363.

## 5.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos en los cuatro escenarios evaluados con respecto a los tiempos de operación, capacidad utilizada, días programados y tiempo promedio de un lote en el sistema se resumen en la tabla 5.17, en comparación con los resultados de las mismas medidas obtenidos en la situación actual de la estación de soldadura por presión.

Tabla 5.17. Resumen de resultados relacionados con el tiempo de operación.  
Fuente: propia (2017)

	Días programados	Horas-máquina	Capacidad Utilizada	Horas-trabajador	Horas promedio lote en el sistema
Situación actual	50.89	2,624	13.3%	2,504	753
Escenario 1	43.62	2,605	13.2%	2,418	718
Escenario 2	44.86	2,461	12.4%	2,323	721
Escenario 3	50.84	2,533	12.8%	2,376	737
Escenario 4	43.76	2,367	12.0%	2,202	704

Como se observa en la Figura 5.1, las horas-máquinas y las horas-trabajador varían similarmente en los cuatro escenarios revisados y en la situación actual de la estación de soldadura por presión. La opción de implementar un nuevo molde de soldadura para manufacturar la parte 2 en la máquina M12, es decir el escenario 2,

presenta mejores tiempos que la propuesta de ingeniería (escenario 1) y la adquisición de un molde nuevo procesar la parte 3 en la máquina S85 (escenario 3). Sin embargo, coherentemente implementar conjuntamente los dos nuevos moldes, es decir el escenario 4, genera aún mejores tiempos de operación; por lo que lo importante en este escenario es revisar si estos mejores resultados tiene también un mejor beneficio económico para la empresa, como se analiza posteriormente.

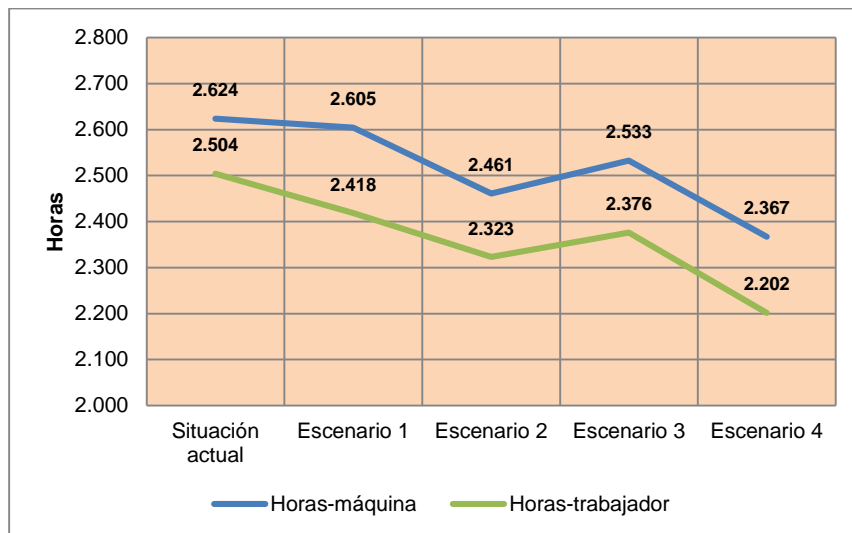


Figura 5.1. Tiempos de operación de las máquinas y de mano de obra (horas).  
Fuente: propia (2017)

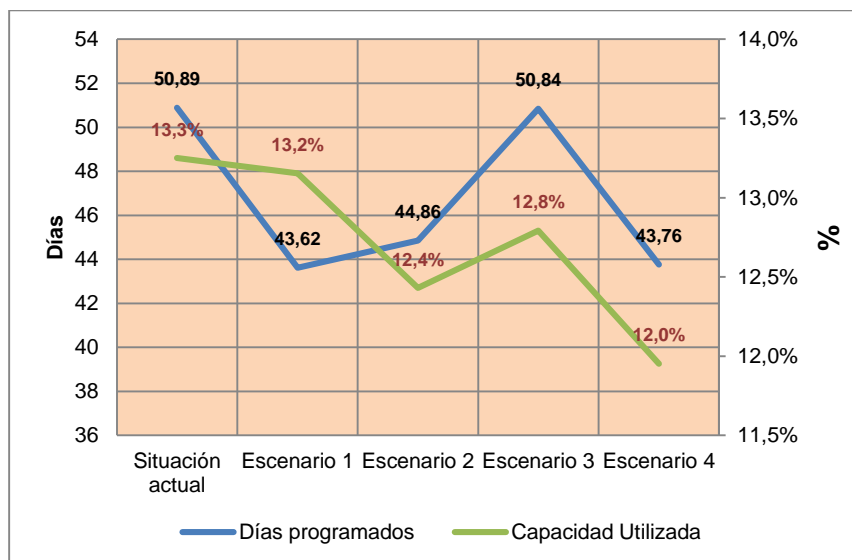


Figura 5.2. Días programados y capacidad utilizada. Fuente: propia (2017)

Por otra parte, la figura 5.2 presenta la variación de la capacidad utilizada y los días programados de trabajo en la estación de soldadura por presión en los escenarios evaluados y la situación actual. Esta figura muestra que la capacidad utilizada fluctúa consistentemente con el cambio de las horas-máquina empleadas, siendo el escenario 4 la mejor opción para la estación de trabajo. Sin embargo, los días programados tienen un comportamiento diferente ya que aunque el escenario 1 muestra el segundo mayor valor de la capacidad utilizada, los días programados en este caso son los mínimos con 43.62 días. El escenario 4, que presenta los mejores valores de tiempo de operación y capacidad utilizada, asocia el segundo menor valor de los días programados con 43.76 días.

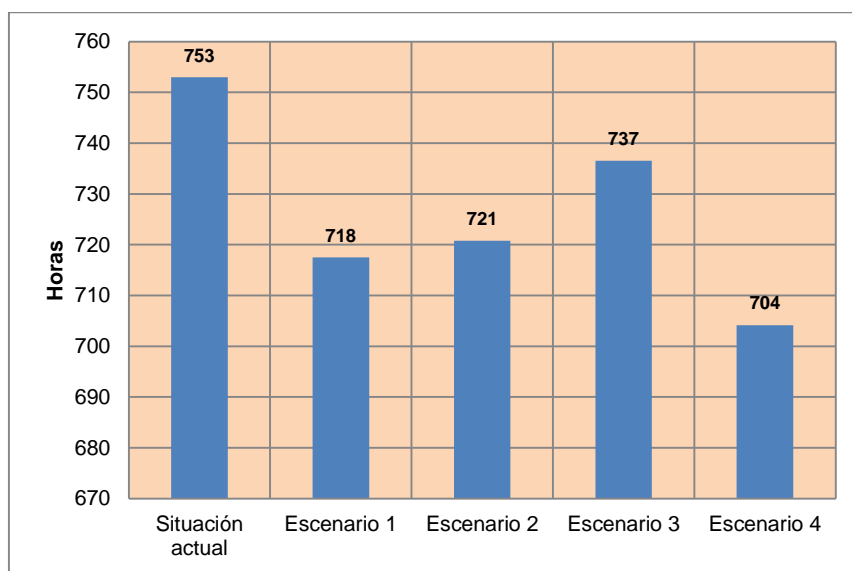


Figura 5.3. Tiempo promedio de un lote en el sistema (horas). Fuente: propia (2017)

Considerando además la medida de desempeño del tiempo promedio de permanencia de un lote en el sistema, el escenario 4 presenta una vez más el mejor valor con un mínimo de 704 horas, seguido del escenario 1 con 718 horas, como se observa en la figura 5.3. Así, esta medida presenta un comportamiento similar a los días programados.

En todas las medidas de desempeño analizadas que se relacionan con tiempo de operación, los cuatro escenarios mostraron mejores valores que la situación actual de la estación de trabajo como era esperado por la empresa, sin embargo es de



suma importancia revisar paralelamente los costos asociados a estas opciones de implementación de mejoras técnicas, de manera que se obtenga viabilidad económica para su puesta en marcha.

De esta manera, la tabla 5.18 presenta el resumen de los resultados relacionados con el costo de operación, así como el ahorro bruto en los diferentes escenarios, que consiste en la diferencia del costo total de operación de cada escenario con el costo total de operación de la situación actual. Este ahorro bruto se compara con el costo de la inversión de cada posible implementación para así obtener el ahorro neto en cada caso. De igual forma esta tabla presenta el ahorro marginal, que representa el ahorro generado en cada opción por cada 100 pesos invertidos en mejora.

Tabla 5.18. Resumen de resultados relacionados con el costo de operación (MXN\$). Fuente: propia (2017)

	Costo operación máquinas	Costo mano de obra	Costo Total	Ahorro bruto	Costo mejora	Ahorro neto	Ahorro marginal
Situación actual	\$ 31,482	\$ 61,230	\$ 92,712	-	-	-	-
Escenario 1	\$ 31,255	\$ 58,885	\$ 90,139	\$ 2,572	\$ 3,000	\$ (428)	% (14)
Escenario 2	\$ 29,535	\$ 56,295	\$ 85,830	\$ 6,882	\$ 4,000	\$ 2,882	% 72
Escenario 3	\$ 30,394	\$ 57,742	\$ 88,136	\$ 4,575	\$ 3,000	\$ 1,575	% 53
Escenario 4	\$ 28,401	\$ 52,962	\$ 81,363	\$ 11,349	\$ 7,000	\$ 4,349	% 62

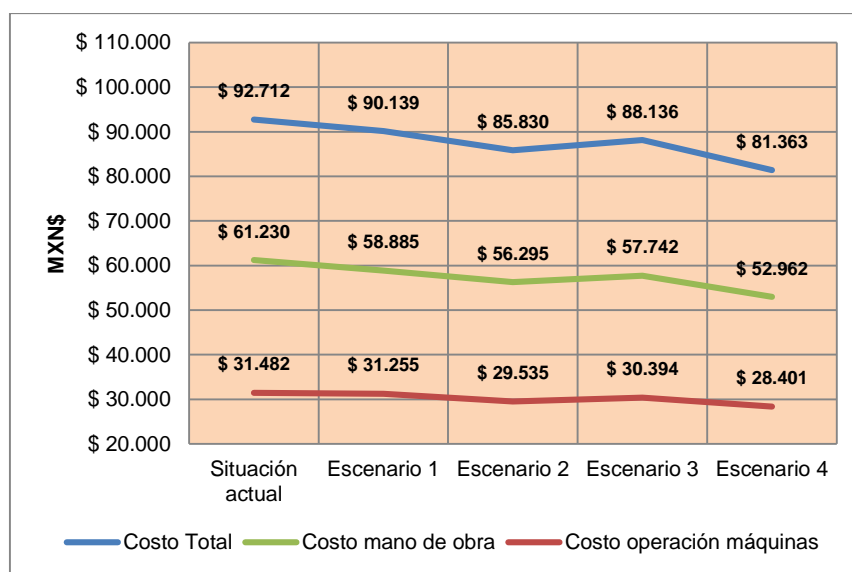


Figura 5.4. Costos de operación (MXN\$). Fuente: propia (2017)

La figura 5.4 presenta el comportamiento de los costos de operación de las máquinas, de la mano de obra y totales para los cuatro escenarios evaluados y la situación actual de la estación de trabajo. Dado que estos costos se estimaron a partir de valores unitarios constantes correspondientes a la hora-máquina y a la hora-trabajador, en coherencia estos costos consolidados presentan un comportamiento similar a los tiempos de operación ilustrados en la figura 5.1, siendo el escenario 4 la mejor opción de implementación de mejora con el mínimo costo de operación de la estación de soldadura por presión. Adicionalmente, la figura 5.4 confirma el resultado presentado en la figura 4.1, ya que como se observa la mayor proporción del costo total de operación corresponde al costo de la mano de obra.

Los cuatro escenarios para la implementación de mejoras técnicas en la estación de trabajo efectivamente resultan ser más favorables que la situación actual en relación al costo de operación, por lo cual es importante analizar cuál es el escenario que presenta un mayor ahorro en el costo de operación con respecto a la situación actual. Como se mencionó, a este ahorro se le denomina ahorro bruto y se presenta en la figura 5.5. Consistentemente con los resultados de los tiempos y costos de operación el escenario 4 genera un ahorro de MXN\$ 11,349 y es el más favorable.

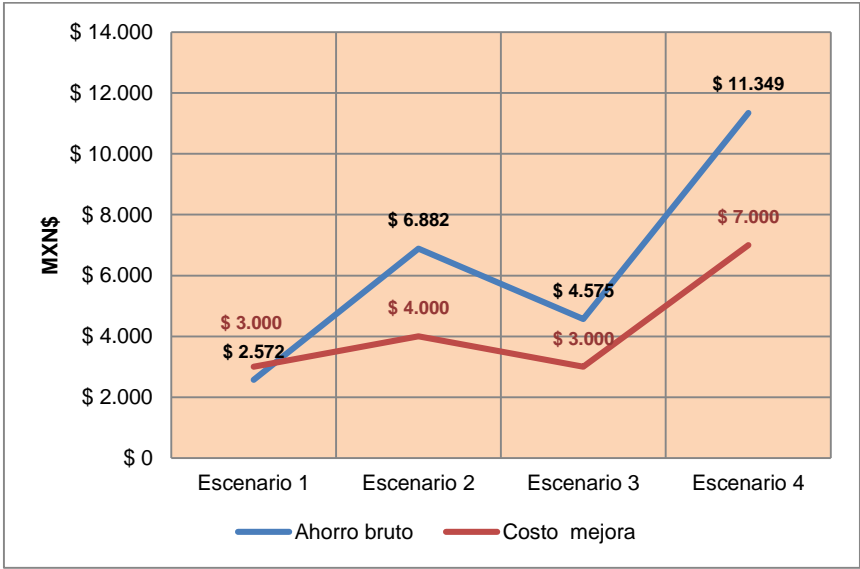


Figura 5.5. Costos de implementación de mejoras y ahorro bruto (MXN\$). Fuente: propia (2017)

La figura 5.5 presenta también los costos de las implementaciones de mejora para los cuatro escenarios, los cuales se comparan con los ahorros brutos de los costos de operación. Los costos de implementación resultan ser menores a los ahorros brutos, con excepción del escenario 1 donde el ahorro bruto es de MXN\$ 2,572 y el costo de implementación de MXN\$ 3,000, haciendo a esta opción muy poco factible económicamente para la empresa. En este caso, la diferencia entre ahorro bruto y costo de implementación resulta ser negativa, con un perjuicio de MXN\$ 428. Según se comentó esta diferencia se denomina ahorro neto y se presenta en la figura 5.6 para los cuatro escenarios evaluados.

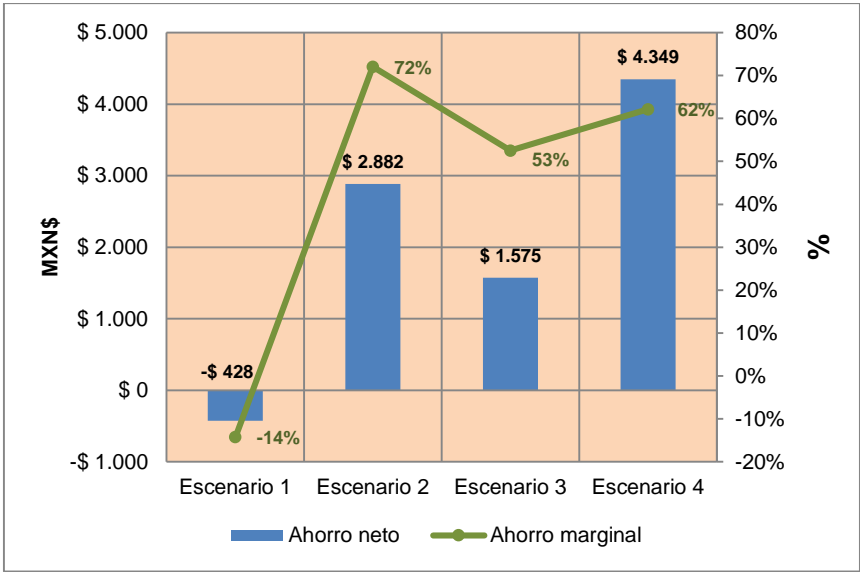


Figura 5.6. Ahorro neto y marginal de las implementaciones de mejora (MXN\$).  
Fuente: propia (2017)

En términos económicos, los ahorros netos más favorables para la empresa se obtienen en los escenarios 2 y 4, siendo este último el de mayor ahorro con MXN\$ 4,349. Así pues, el curso de acción que genera mayores beneficios para la empresa es la adquisición de nuevos moldes de producción para la manufactura de las partes 2 y 3 en las máquinas M12 y S85 respectivamente, es decir el escenario 4.

Este escenario es el más favorable en términos económicos, así como en todas las medidas de desempeño de tiempo de operación analizadas, sin embargo observando la figura 5.6, el mayor ahorro marginal se presenta en el escenario 2, seguido por los escenarios 4 y 3, mientras que el escenario 1 tiene un ahorro marginal negativo de 14%. El ahorro marginal consiste en la relación del ahorro neto

con el costo de la implementación de mejora, lo cual quiere decir que por ejemplo en el mejor de los casos por cada MXN\$ 100 invertidos en la mejora, se ahorran MXN\$ 72 en costos de operación (escenario 2). Esto constituye un criterio de decisión importante para la empresa si su enfoque es el ahorro en términos unitarios.

Adicionalmente, si el interés de la empresa se centra en la optimización de los días de trabajo programados, por ejemplo para garantizar el cumplimiento del nivel de servicio pactado con el cliente, puede considerar la puesta en marcha del escenario 1 o el 2 como importantes cursos de acción ya que implican programar aproximadamente 44 días de trabajo en la estación de soldadura por presión.

Similarmente, si la empresa otorga prioridad a la minimización de la capacidad utilizada, por ejemplo en el evento en que requiera capacidad disponible en la estación de soldadura por presión para la ejecución de otros proyectos de manufactura de partes, puede considerar la puesta en marcha del escenario 2 como una opción alternativa al escenario 4.

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## CONCLUSIONES

La ejecución del presente proyecto de investigación en la empresa metal mecánica condujo satisfactoriamente al desarrollo de un modelo de simulación que representa con fidelidad el comportamiento de la estación de soldadura por presión y un modelo de asignación que permite optimizar las medidas de desempeño más relevantes para la empresa, incluyendo el costo de operación. La combinación de simulación y optimización constituye una metodología de punta que ha conllevado al aporte de importantes criterios técnicos cualitativos y cuantitativos, para la toma de decisiones y la adopción de cursos de acción en la empresa.

La situación actual de la estación de trabajo reveló una asignación no óptima de los requerimientos de producción en las máquinas disponibles de la estación, debido a que la planificación en la asignación de la carga de trabajo se basaba solo en conocimientos empíricos. La metodología de simulación y optimización aplicada permitió identificar el escenario de la implementación de nuevos moldes de soldadura para el procesamiento de las partes 2 y 3 en las máquinas M12 y S85 respectivamente, es decir el escenario 4, como el más favorable por ofrecer importantes beneficios económicos y de rendimiento operativo para la empresa. Sin embargo según sus necesidades y el enfoque técnico que asuma, puede adoptar las implementaciones de mejora de los demás escenarios, de acuerdo con las medidas de desempeño que quiera optimizar. Los resultados obtenidos tienen el sustento suficiente a partir de conceptos y técnicas de la ingeniería, que incluyen la validación científica de los resultados obtenidos para garantizar su efectividad como criterios en la toma de decisión de la empresa.

El aporte de la aplicación del presente estudio de simulación y optimización en la empresa metalmecánica, no solo genera beneficios operativos y económicos asociados al desempeño de la estación de soldadura por presión, sino que además redundante en importantes beneficios para todo el sistema de producción de la fábrica, ya que al mejorar la operación considerada el cuello de botella, mejora el ritmo de producción de todo el sistema, con base en una capacidad disponible constante, y en consecuencia se generan mejoras económicas adicionales e inclusive mayor satisfacción de los clientes y de las demás partes involucradas con la organización. Analizar y evaluar la magnitud de estos beneficios en todo el sistema, puede originar un nuevo proyecto de investigación en la empresa.

La realización de la presente investigación constituye un importante precedente en la aplicación de simulación y optimización en la empresa metalmecánica como metodología científica para la evaluación del desempeño de las estaciones de trabajo, no solo de soldadura sino también de cualquier tipo de operación de manufactura, incluso extensible a otras áreas como el desempeño logístico y administrativo. Adicionalmente, la culminación exitosa del presente proyecto es también un precedente relevante en el ámbito académico de la modelación no solo en el contexto local sino también en el internacional, donde resulta innovadora la aplicación de simulación y optimización en el campo de la industria metalmecánica.

La culminación exitosa del presente proyecto de investigación confirma las bondades y ventajas del uso de simulación como tecnología blanda de punta, dado que el costo de la realización de este estudio de simulación y optimización resulta significativamente menor que el costo asociado a la implementación en el sistema real de los escenarios evaluados.

El desarrollo de la presente investigación permitió destacar la importancia de contar con el compromiso de la empresa en cada una de las etapas de la puesta en marcha del proyecto, tanto de sus directivos como de todos los demás colaboradores de la organización, ya que de esta manera los resultados obtenidos reflejan con fidelidad el desempeño del sistema evaluado y así se han podido obtener importantes criterios para la toma de decisiones en favor de la mejora del rendimiento operativo y en consecuencia un beneficio económico y un alto nivel de satisfacción del cliente.

Es relevante el conocimiento que debe acreditar el investigador en la realización de este tipo de estudios de simulación y optimización, y en general de modelación, debido a que ésta disciplina, no solo de la ingeniería sino también hoy en día muy involucrada con otras áreas de la ciencia, requiere el dominio de diversas disciplinas como la probabilidad, la estadística, la metodología de la investigación, la programación computacional y la investigación de operaciones, que holísticamente se integran para generar esta herramienta tecnológica de vanguardia de gran versatilidad y efectividad en su aplicación.

## RECOMENDACIONES

Con el fin de optimizar el desempeño de los procesos operativos de la empresa metalmecánica que conllevan a mejorar su rendimiento, economía y productividad, se recomienda poner en marcha la implementación de nuevos moldes de soldadura para el procesamiento de las partes 2 y 3 en las máquinas M12 y S85 respectivamente, es decir la puesta en marcha del escenario 4 evaluado, como el más relevante por ofrecer los más importantes beneficios económicos y de rendimiento operativo en la estación de soldadura por presión y en general para la empresa, identificando y documentado la mejora conseguida, de manera que sea para la organización un proceso consciente que pueda hacerse extensivo a las demás estaciones de trabajo de la empresa e incluso a sus procesos logísticos y administrativos, para incrementar aún más los beneficios.

Se recomienda también considerar los escenarios 1, 2 y 3 evaluados mediante la presente investigación, como cursos de acción realizables de acuerdo con las necesidades y enfoques técnicos y organizacionales que pueda tener la empresa para optimizar diferentes medidas de desempeño como el ahorro marginal, los días programados y la capacidad utilizada en la estación de trabajo “cuello de botella” del sistema de producción.

Asimismo, se recomienda continuar con el uso activo de los modelos desarrollados, en primer lugar por ser herramientas que brindan criterios técnicos para la toma de decisiones y así la factible generación de nuevas políticas corporativas, y adicionalmente porque el uso frecuente de los modelos brinda la oportunidad de mejorarlos, incorporando nuevos elementos que conlleven a una representación de mayor nivel de complejidad de la estación de soldadura por presión, aumentando en consecuencia la precisión en la modelación y así lograr mayor efectividad en la toma de decisiones y en la adopción de cursos de acción.

Como se demostró en la presente investigación, gracias a la evidencia estadística concluyente el modelo de simulación constituye una representación válida de la estación de trabajo objeto de estudio y el modelo de asignación es una herramienta eficaz para la optimización, de manera que es una recomendación no solo para la empresa sino también para otras organizaciones y para el ámbito académico continuar haciendo uso de este tipo de tecnologías de avanzada, que de acuerdo con lo evidenciado otorgan importantes beneficios de diversa índole, tanto en el plano económico y productivo, como en el ámbito de las aplicaciones tecnológicas y científicas.

A nivel académico, se recomienda generar un amplio eco de la presente investigación a través de publicación y divulgación, ya que de acuerdo con el estado del arte revisado ésta constituye un precedente muy pertinente sobre la aplicación conjunta de la simulación y optimización en el ámbito de la producción en la industria metalmeccánica, no solo en el contexto local sino también a nivel internacional.



## BIBLIOGRAFÍA

Arora, S., & Barak, B. (2009). Computational complexity: a modern approach. Cambridge University Press.

Brualdi, R. (2006). Combinatorial matrix classes. Encyclopedia of Mathematics and Its Applications 108. Cambridge: Cambridge University Press. ISBN 0-521-86565-4. Zbl 1106.05001.

Burkard, R.; Dell'Amico, M.; & Martello, S. (2012). Assignment Problems (Revised reprint). SIAM. ISBN 978-1-61197-222-1.

Cerrolaza, M., & Annicchiarico, W. (1996). Algoritmos de optimización estructural basados en simulación genética (Vol. 47). CDCH UCV.

Coss, R. (2011). Simulación un enfoque práctico. 2da. ed. México, DF. Limusa SA de CV. ISBN 978-968-18-1506-6.

Domínguez, J. H., Parra-Coronado, A., & Villa, L. G. (1983). Simulación matemática y optimización del secado de productos agropecuarios con aire natural y energía solar. Ingeniería e Investigación, (6), 57-62.

Dorantes, C. E. (2013). Optimización de buses para el sistema Pumabus usando programación estocástica. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.

Fu, M. C., Glover, F. W., & April, J. (2005). Simulation optimization: a review, new developments, and applications. In Proceedings of the 37th conference on Winter simulation (pp. 83-95). Winter Simulation Conference.

García, E., García, R., Cardenas, L. E, Reyes, H. G., & Barrón, L. E. (2006). Simulación y análisis de sistemas con ProModel. Pearson Educación.

García, J. A. (2013). Metodología para la planeación de la producción utilizando simulación y programación entera. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.

Gómez, M., & Cervantes, J. (2012). Taxonomía de los modelos y metodologías de desarrollo de software más utilizados. *Universidades*, Enero-Marzo, 37-47.

Gutierrez Carmona, J. (2009). *Modelos financieros con Excel*. Ecoe Ediciones.

Jeffus L., 2011. *Welding: principles and applications*. 7th Ed. Delmar, USA: Cengage Learning.

Jeon, S. M., & Kim, G. (2016). A survey of simulation modeling techniques in production planning and control (PPC). *Production Planning & Control*, 27(5), 360-377. doi:10.1080/09537287.2015.1128010

Kalenatic, D. (2001). *Modelo Integral y Dinámico para el Análisis, Planeación, Programación y Control de las Capacidades Productivas en Empresas Manufactureras*. Bogotá. Instituto de Estudios e Investigaciones Educativas: Universidad Distrital "Francisco José de Caldas".

Lara, J. (2016). *Simulación y optimización para una estrategia de distribución de vacunas contra la A (H1N1)*. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.

Law, A. (2015). *Simulation, modeling and analysis*. 5th ed. Boston. McGraw-Hill.

Longo F., 2011. Advances of modeling and simulation in supply chain and industry. *Simulation*, 87 (8), 651-656.

Marcos, J. D. (2008). *Prototipo de máquina de absorción de LiBr/H<sub>2</sub>O de doble efecto condensada por aire. Simulación, optimización y resultados experimentales* (Doctoral dissertation, Tesis doctoral, Universidad Carlos III de Madrid).

Medina, P. D., Cruz, E. A., & Restrepo, J. H. (2009). Problema de formación de lotes de fabricación en un sistema de manufactura flexible: Heurística de selección de partes. *El Hombre y la Máquina*, (32), 68.

Mesa, J. A. (2011). *Metodología para el Aseguramiento de la calidad de un Proyecto de Simulación aplicando las Técnicas de Gestión de Proyectos*. Tesis de Maestría en Ingeniería Industrial. Bogotá. Universidad Distrital "Francisco José de Caldas". Facultad de Ingeniería.

Monleón Getino, T. (2005). Optimización de los ensayos clínicos de fármacos mediante simulación de eventos discretos, su modelización, validación, verificación y la mejora de la calidad de sus datos.

Montgomery, D. C., Bermúdez, T., Walker, H. M., Maisel, L., Arley, N. B., Maddala, G. S., & Wilkinson, R. (2006). Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería. Turrialba (Costa Rica). CATIE.

Narciso, M. E., Piera, M. A., & Figueras Jové, J. (2005). Optimización de sistemas logísticos mediante simulación: Una metodología basada en redes de Petri coloreadas. *Revista iberoamericana de automática e informática industrial*, 2(4), 54-65.

Pan-Echeverría, G., Gaumer-Araujo, T., & Pacho-Carrillo, D. (2009). Simulación y optimización de una planta de separación y estabilización de gas y condensados. México: sn.

Pérez Becerra, J. A. (2006). Modelo de asignación aplicado a la manufactura en una cadena de abastecimientos (Tesis de pregrado). Universidad Mayor de San Marcos. Lima, Perú.

Puigjaner, L., & Puigjaner, L. (2006). Estrategias de modelado, simulación y optimización de procesos químicos. Editorial Síntesis.

Rodríguez, L. F., & Bermúdez, L. T. (1995). Usos y aplicaciones de la simulación en la investigación agropecuaria. *Agronomía colombiana*, 12(2), 198-204.

Rodríguez, S. L., & Granda, A. B. V. (2005). Simulación y optimización avanzadas en la industria química y de procesos: HYSYS. España, Universidad de Oviedo, Oviedo.

Ruiz Torres, A. J., Ablanado Rosas, J. H., & Ayala Cruz, J. (2012). Modelo de asignación de compras a proveedores considerando su flexibilidad y probabilidad de incumplimiento en la entrega. *Estudios gerenciales*, 28(122), 29-48.

Salazar, A. F., Vargas, L. C., Añasco, C. E., & Orejuela, J. P. (2013). Propuesta de distribución en planta bietapa en ambientes de manufactura flexible mediante el proceso analítico jerárquico. *Revista EIA*, 7(14), 161-175.

Sampieri, R. H., Fernández, C., & Lucio, P. B. (2007). Metodología de la investigación. McGraw-Hill.

Scenna, N. J. (2009). Modelado, simulación y optimización de procesos. Edición de la UTN [www.modeladoingenieria.edu.ar/libros/modeinge/modeinge\\_f.htm](http://www.modeladoingenieria.edu.ar/libros/modeinge/modeinge_f.htm).

Scenna, N. J., Aguirre, P. A., Benz, S. J., Chiotti, O. J., Espinosa, H. J., Ferrero, M. B., ... & Salomone, H. E. (2015). Modelado, simulación y optimización de procesos químicos.

Sipper, D. (2011). Planeación y control de la producción. Mc Graw Hill Interamericana.

Smith, J. S. (2003). Survey on the use of simulation for manufacturing system design and operation. *Journal of manufacturing systems*, 22(2), 157-171.

Taha, H. A. (2012). Investigación de operaciones. Novena edición. México. Pearson Educación.

Torres, C. L. M., Munera, J. A. R., & Henao, J. D. V. (2004). Selección de portafolios usando simulación y optimización bajo incertidumbre. *Red Dyna*.

Villareal, J. E. (2011). Simulación y optimización de la cadena de suministro con programación lineal entera mixta. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.

Vindel, J. A. (2015). Localización óptima de ambulancias en Ciudad Universitaria empleando simulación. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.

## **ANEXOS**

# ANEXO 1

## MODELACIÓN DE DATOS

### A1.1 MODELACIÓN DE LAS ENTRADAS

A continuación se ilustran los procedimientos más relevantes en *StatFit*® para el uso de las funciones de análisis y modelación de las series de tiempos unitarios de operación de las máquinas de la estación de soldadura por presión para procesar las partes del proyecto de estudio, así como los tiempos de los desplazamientos incluidos en el modelo de simulación.

#### A1.1.1 Procedimiento de análisis de correlación e independencia

Una vez abierto el programa se genera automáticamente un documento nuevo, donde se ingresa la serie de datos manualmente o copiada desde un procesador de texto como *Word*® u hoja de cálculo como *Excel*®. Automáticamente el programa define la cantidad de intervalos necesaria para una gráfica de densidad.

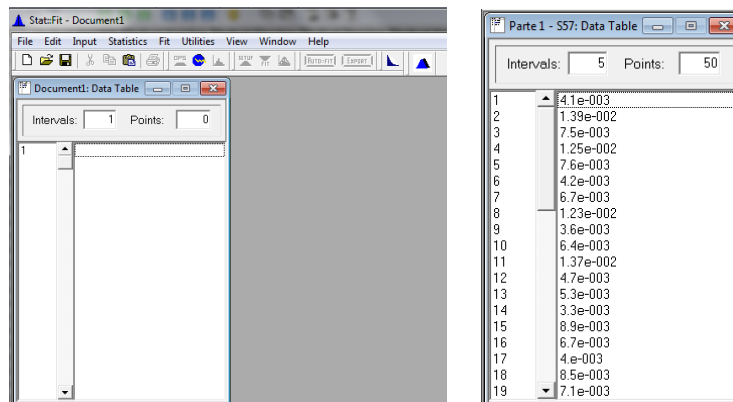


Figura A1. Procedimiento de ingreso de series datos en *Statfit*®. Fuente: propia (2017)

Según se muestra en la figura A2, se selecciona *Autocorrelation* (autocorrelación), *Scarlet Plot* (diagrama de dispersión) y *Runs Test* (prueba de corridas arriba y debajo de la media) en la opción *Independence* del menú *Statistics*, para verificar la correlación, la independencia y la normalidad de los datos, de modo que sean válidos para el modelo de simulación.

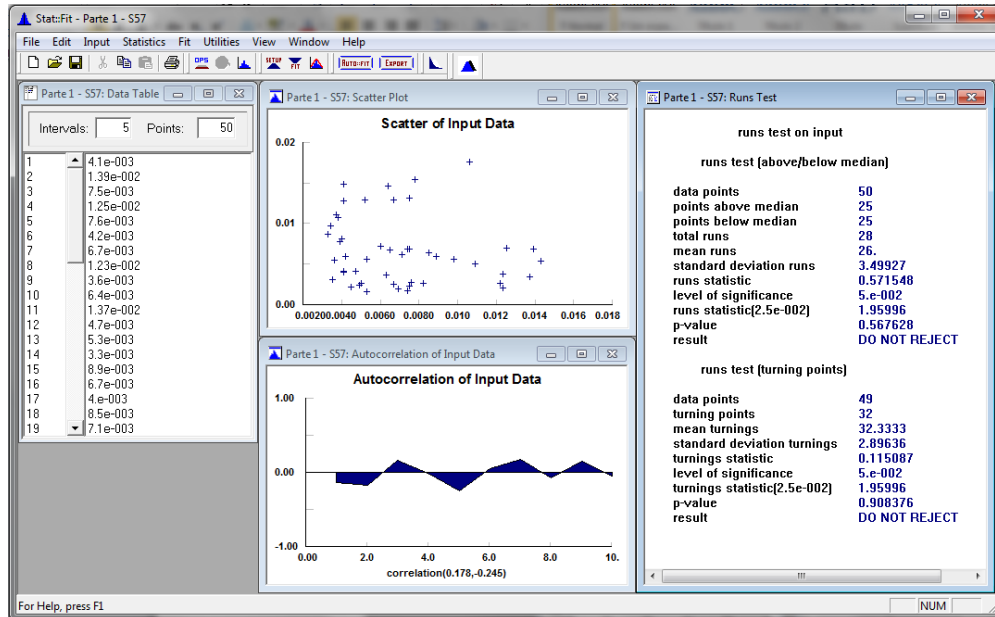
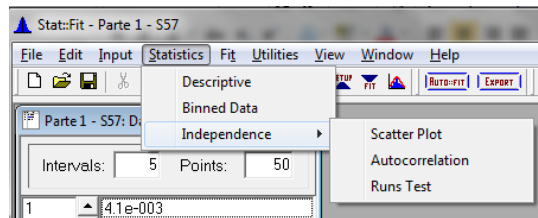


Figura A2. Procedimiento de análisis de correlación e independencia de datos.  
Fuente: propia (2017)

### A1.1.2 Procedimiento para la aproximación de distribuciones de probabilidad

Como se muestra en la figura A3, seleccionando la opción *AutoFit* del menú *Fit*, aparece un cuadro de diálogo en el que se definen las características de la distribución a aproximar: si es continua o discreta, si es acotada y en caso de serlo el valor de ese acotamiento. Por tratarse de tiempos, todas las series de datos analizadas en la presente investigación, se analizaron como distribuciones continuas no acotadas. El programa arroja una lista de tres o cuatro distribuciones sugeridas en un ranking de mejores aproximaciones. Dando clic en los ítems de la lista se despliegan las gráficas, donde se pueden comparar las distribuciones sugeridas sobrepuestas entre sí y sobre la gráfica de densidad de los datos (ver figura A3).

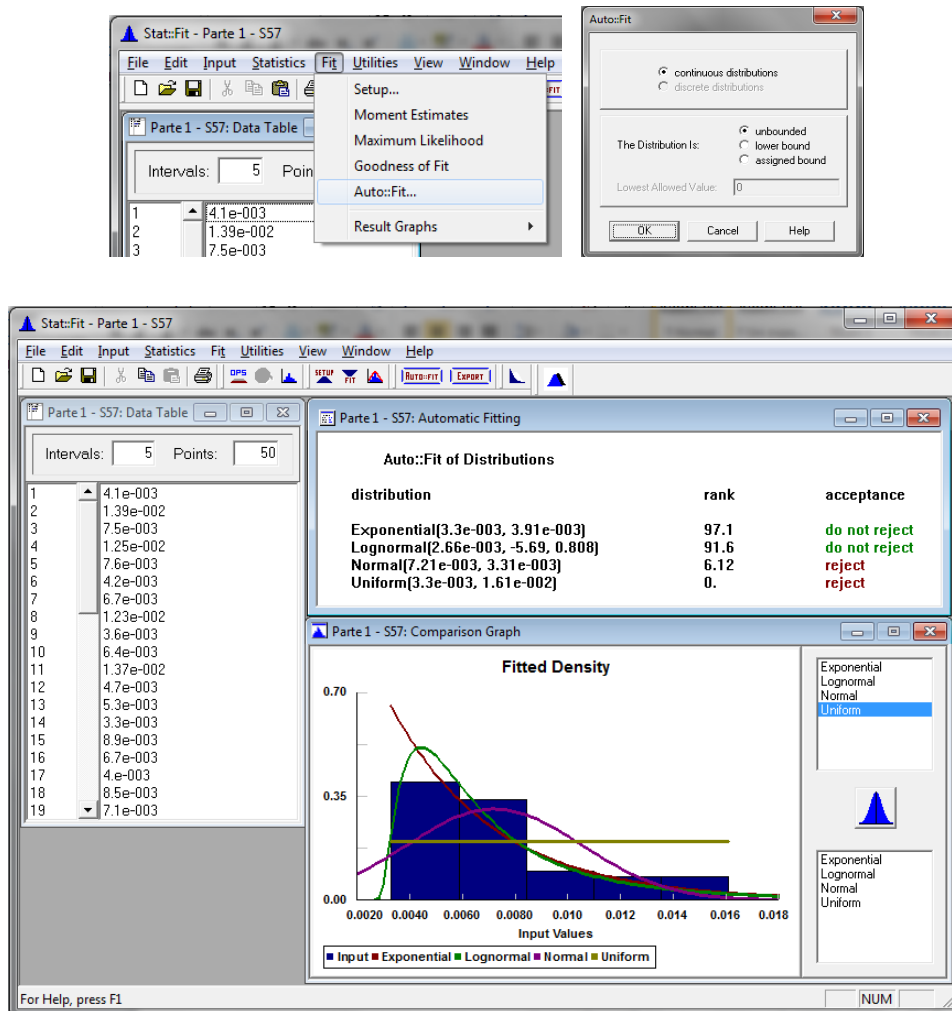


Figura A3. Procedimiento para la aproximación de distribuciones de probabilidad.  
Fuente: propia (2017)

### A1.1.3 Procedimiento de pruebas de bondad de ajuste

Estas pruebas permiten verificar la validez de la distribución de probabilidad ajustada, por medio de las pruebas de hipótesis conocidas como *Kolmogorov-Smirnov* y *Anderson-Darling*. Como se presenta en la figura A4, seleccionando la opción *Goodness of Fit* del menú *Fit*, el programa arroja los resultados de aceptación o rechazo de las pruebas en la evaluación de todas las distribuciones de probabilidad sugeridas.



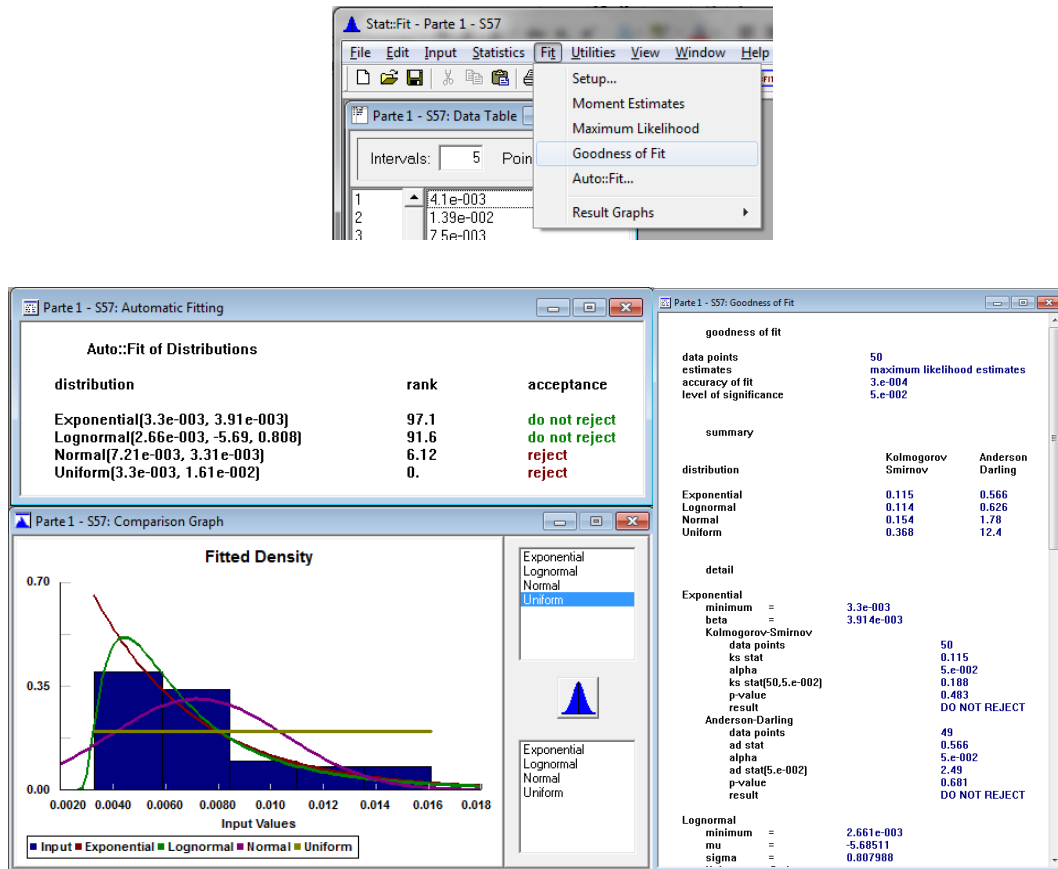


Figura A4. Procedimiento de pruebas de bondad de ajuste K-S y A-D. Fuente: propia (2017)

#### A1.1.4 Procedimiento de exportación de distribuciones a *Promodel*®

Dado que el formato de escritura de las distribuciones de probabilidad que ajusta *StatFit*® es diferente al formato de escritura de *Promodel*®, es necesario realizar la exportación de las distribuciones de probabilidad con el formato de escritura adecuado. Para este fin, se selecciona la opción *Export fit* de la opción de la lista *Export* en el menú *File* para desplegar un cuadro de diálogo. Allí se selecciona el *software* de simulación al que se quiere exportar, la distribución de probabilidad a exportar y la precisión en decimales de los parámetros de la distribución. De igual manera, en el cuadro de diálogo se elige la opción *Clipboard* para copiar la escritura de la distribución en la memoria temporal o portapapeles para luego pegarla directamente en el *software* de simulación, o la opción *File* para generar un archivo de texto con la escritura de la distribución. Lo anterior se ilustra en la figura A5.

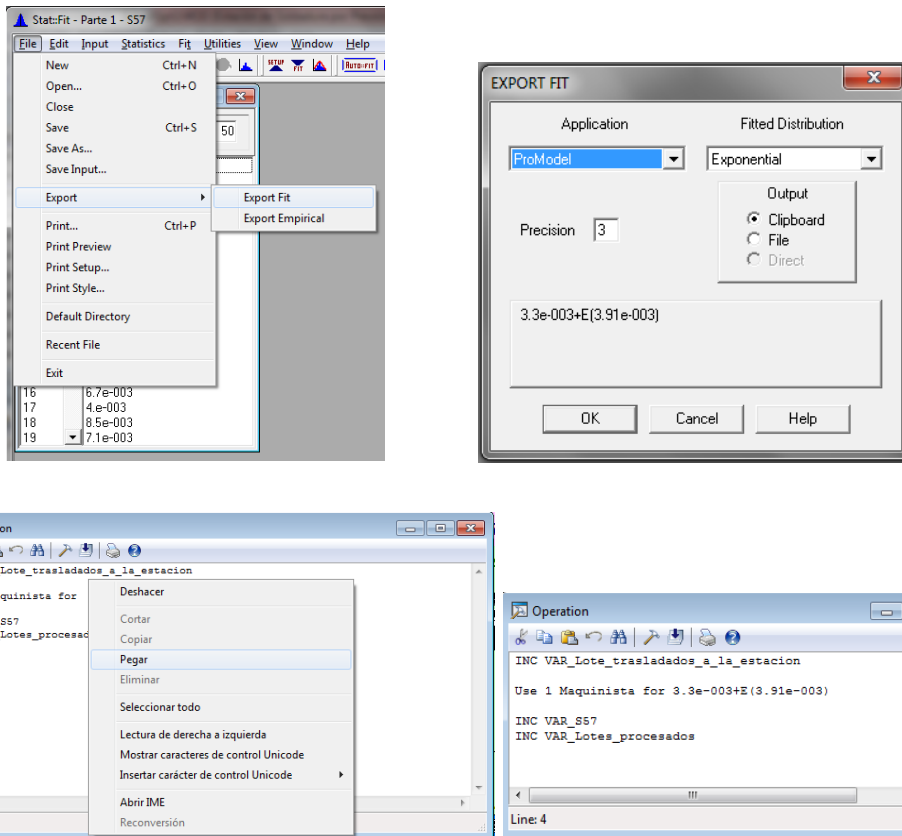


Figura A5. Procedimiento de exportación de distribuciones a *Promodel*®. Fuente: propia (2017)

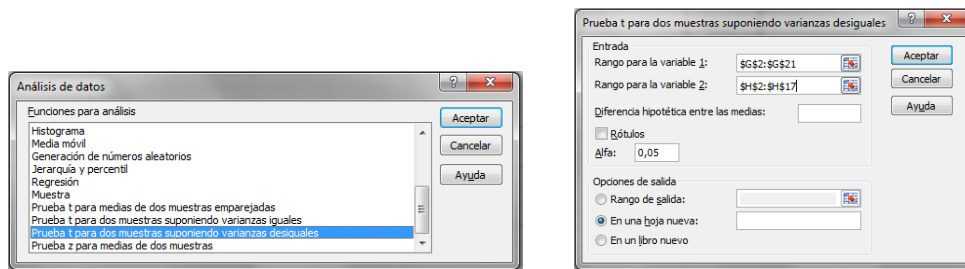
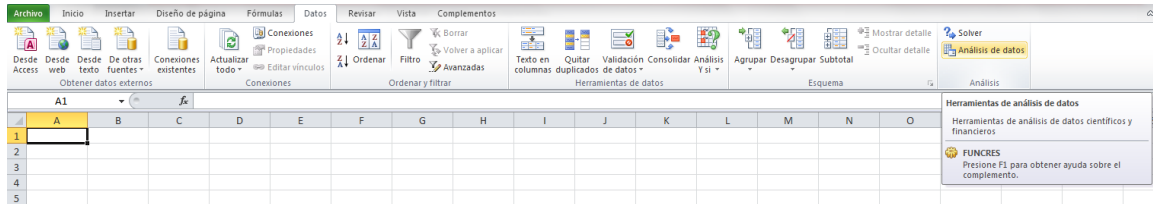
## A1.2 MODELACIÓN DE LAS SALIDAS

A continuación se ilustran el procedimiento en *Excel*® para realizar una prueba de medias poblacionales suponiendo varianzas diferentes, la cual se empleó para efectuar la validación estadística del modelo de simulación.

Para tal fin se debe contar con las dos muestras de datos a analizar, en el caso de esta investigación los datos que arroja el modelo y los datos históricos reales de operación en la estación de soldadura por presión, con respecto al tiempo promedio de permanencia de un lote en el sistema.

Utilizando el complemento de *Excel*® *Análisis de Datos* del menú *Datos*, seleccionar la opción de *Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales*, y en el cuadro de diálogo que se abre definir los rangos en la hoja de cálculo

correspondientes las dos muestras a analizar, el nivel de confiabilidad *Alfa*, si existe una diferencia hipotética entre las medias y las opciones de salida que pueden ser un rango en la misma hoja de cálculo, una hoja nueva o un libro nuevo. Lo anterior se ilustra en la figura A6.



	<b>ESTACIÓN</b>	<b>MODELO</b>
Media	894,4350932	824,04125
Varianza	28873,68076	5940,425572
Observaciones	20	16
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	28	
Estadístico t	1,652346296	
P(T<=t) una cola	0,054817874	
Valor crítico de t (una cola)	1,701130934	
P(T<=t) dos colas	0,109635748	
Valor crítico de t (dos colas)	2,048407142	

Figura A6. Procedimiento para una prueba *t* de medias suponiendo varianzas desiguales. Fuente: propia (2017)

## ANEXO 2

### RESULTADOS DEL MODELAMIENTO DE DATOS

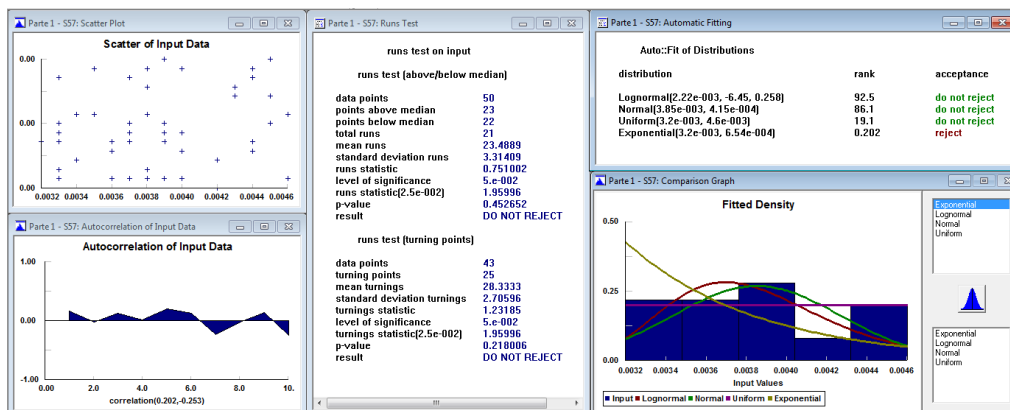
Este anexo presenta los resultados del análisis estadístico de todos los datos de entrada del modelo de simulación, correspondientes a las 50 series de tiempo asociadas a los tiempos unitarios de operación de las alternativas de procesamiento de las 10 parte del proyecto de estudio en las 10 máquinas de la estación de soldadura por presión, junto con las 2 series de tiempo asociadas a los desplazamientos unitarios incluidos en el modelo, desde el almacén de materiales hasta la estación de trabajo y desde ésta hasta el almacén de productos semiterminados. Como se mencionó en el capítulo 3, cada serie de tiempo consiste en 50 tomas de tiempo del proceso real en la empresa.

El análisis estadístico de los datos de entrada o modelación de los datos de entrada se realizó en *Statfit®*, según se ha mencionado, y los procedimientos correspondientes se describen en el anexo 1. A continuación se presenta por cada serie analizada, los datos de la toma de tiempos, las pruebas de bondad de ajuste, los análisis de correlación e independencia, la prueba de corridas arriba y debajo de la media y las distribuciones sugeridas ranqueadas con sus gráficas sobrepuestas en la gráfica de densidad de los datos o histograma de frecuencias.

#### Parte 1 – máquina S57

0.0039	0.0042	0.0033	0.0038	0.0044
0.0037	0.0032	0.0034	0.0045	0.0044
0.0033	0.0037	0.0035	0.0042	0.0036
0.0039	0.0038	0.004	0.0035	0.0036
0.0039	0.004	0.0038	0.0045	0.0033
0.0046	0.0033	0.0034	0.0046	0.0033
0.0033	0.0037	0.004	0.004	0.0044
0.0038	0.0037	0.0036	0.0045	0.0037
0.0043	0.0038	0.0037	0.0039	0.0044
0.0043	0.0033	0.0039	0.0033	0.0045

<b>Exponential</b> minimum = 3.2e-003 beta = 6.54e-004 <b>Kolmogorov-Smirnov</b> data points = 50 ks stat = 0.214 alpha = 5.e-002 ks stat[50,5.e-002] = 0.188 p-value = 1.7e-002 result = REJECT <b>Anderson-Darling</b> data points = 49 ad stat = 2.92 alpha = 5.e-002 ad stat[5.e-002] = 2.49 p-value = 2.99e-002 result = REJECT <b>Lognormal</b> minimum = 2.21525e-003 mu = -6.44655 sigma = 0.257759 <b>Kolmogorov-Smirnov</b> data points = 50 ks stat = 0.11 alpha = 5.e-002 ks stat[50,5.e-002] = 0.188 p-value = 0.547 result = DO NOT REJECT <b>Anderson-Darling</b> data points = 50 ad stat = 0.883 alpha = 5.e-002 ad stat[5.e-002] = 2.49 p-value = 0.425 result = DO NOT REJECT	<b>Normal</b> mean = 3.854e-003 sigma = 4.1403e-004 <b>Kolmogorov-Smirnov</b> data points = 50 ks stat = 0.106 alpha = 5.e-002 ks stat[50,5.e-002] = 0.188 p-value = 0.591 result = DO NOT REJECT <b>Anderson-Darling</b> data points = 50 ad stat = 0.983 alpha = 5.e-002 ad stat[5.e-002] = 2.49 p-value = 0.366 result = DO NOT REJECT <b>Uniform</b> minimum = 3.2e-003 maximum = 4.6e-003 <b>Kolmogorov-Smirnov</b> data points = 50 ks stat = 0.149 alpha = 5.e-002 ks stat[50,5.e-002] = 0.188 p-value = 0.199 result = DO NOT REJECT <b>Anderson-Darling</b> data points = 47 ad stat = 1.27 alpha = 5.e-002 ad stat[5.e-002] = 2.49 p-value = 0.242 result = DO NOT REJECT
--	--

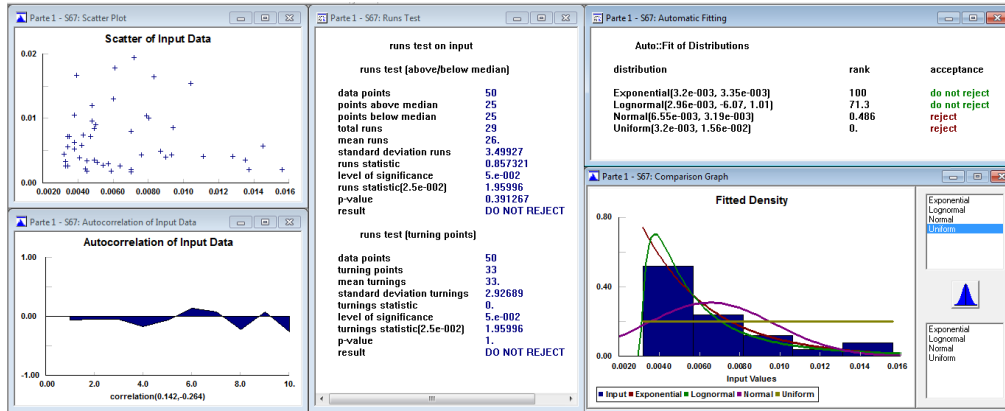


## Parte 1 – máquina S67

0.0048	0.0044	0.006	0.0087	0.0034
0.0104	0.0035	0.0111	0.0054	0.0038
0.0128	0.007	0.0049	0.0039	0.0064
0.0049	0.0034	0.0045	0.0137	0.0038
0.0079	0.007	0.0033	0.0034	0.0057
0.0093	0.0032	0.0038	0.0059	0.0041
0.005	0.0051	0.0094	0.0033	0.0047
0.0083	0.0042	0.008	0.0043	0.007
0.0135	0.0061	0.009	0.0072	0.0076
0.0045	0.0145	0.0048	0.0156	0.005

Exponential  
 minimum = 3.2e-003  
 beta = 3.35e-003  
 Kolmogorov-Smirnov  
 data points 50  
 ks stat 6.71e-002  
 alpha 5.e-002  
 ks sta[50,5.e-002] 0.188  
 p-value 0.967  
 result DO NOT REJECT  
 Anderson-Darling  
 data points 49  
 ad stat 0.21  
 alpha 5.e-002  
 ad sta[5.e-002] 2.49  
 p-value 0.967  
 result DO NOT REJECT  
 Lognormal  
 minimum = 2.95508e-003  
 mu = -6.06834  
 sigma = 1.01454  
 Kolmogorov-Smirnov  
 data points 50  
 ks stat 8.89e-002  
 alpha 5.e-002  
 ks sta[50,5.e-002] 0.188  
 p-value 0.792  
 result DO NOT REJECT  
 Anderson-Darling  
 data points 50  
 ad stat 0.39  
 alpha 5.e-002  
 ad sta[5.e-002] 2.49  
 p-value 0.859  
 result DO NOT REJECT

Normal  
 mean = 6.55e-003  
 sigma = 3.19432e-003  
 Kolmogorov-Smirnov  
 data points 50  
 ks stat 0.175  
 alpha 5.e-002  
 ks sta[50,5.e-002] 0.188  
 p-value 0.249  
 result DO NOT REJECT  
 Anderson-Darling  
 data points 50  
 ad stat 2.39  
 alpha 5.e-002  
 ad sta[5.e-002] 2.49  
 p-value 5.63e-002  
 result DO NOT REJECT  
 Uniform  
 minimum = 3.2e-003  
 maximum = 1.56e-002  
 Kolmogorov-Smirnov  
 data points 50  
 ks stat 0.377  
 alpha 5.e-002  
 ks sta[50,5.e-002] 0.188  
 p-value 2.82e-006  
 result REJECT  
 Anderson-Darling  
 data points 48  
 ad stat 18.1  
 alpha 5.e-002  
 ad sta[5.e-002] 2.49  
 p-value 0.  
 result REJECT

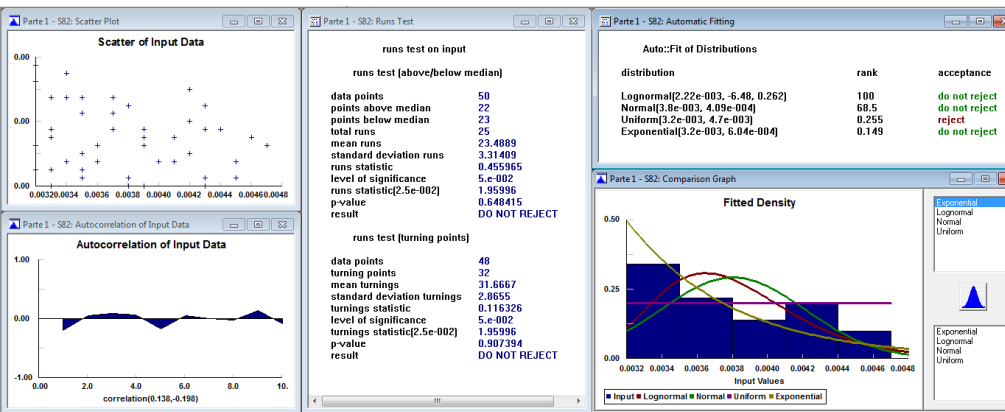


## Parte 1 – máquina S82

0.0045	0.0033	0.0039	0.0034	0.0041
0.0033	0.0038	0.0039	0.0046	0.0035
0.0043	0.0033	0.0037	0.0038	0.0033
0.0033	0.0039	0.0041	0.0032	0.0032
0.0034	0.0032	0.0038	0.0037	0.0045
0.0035	0.0047	0.0042	0.0039	0.0035
0.0036	0.0037	0.004	0.0038	0.0034
0.0037	0.0043	0.0035	0.0042	0.0043
0.0041	0.0042	0.0043	0.0036	0.0039
0.0038	0.0044	0.0032	0.0035	0.0039

Exponential  
 minimum = 3.2e-003  
 beta = 6.04e-004  
 Kolmogorov-Smirnov  
 data points 50  
 ks stat 0.183  
 alpha 5.e-002  
 ks sta[50,5.e-002] 0.188  
 p-value 6.15e-002  
 result DO NOT REJECT  
 Anderson-Darling  
 data points 46  
 ad stat 3.72  
 alpha 5.e-002  
 ad sta[5.e-002] 2.49  
 p-value 1.2e-002  
 result REJECT  
 Lognormal  
 minimum = 2.21589e-003  
 mu = -6.479  
 sigma = 0.261733  
 Kolmogorov-Smirnov  
 data points 50  
 ks stat 3.26e-002  
 alpha 5.e-002  
 ks sta[50,5.e-002] 0.188  
 p-value 0.75  
 result DO NOT REJECT  
 Anderson-Darling  
 data points 50  
 ad stat 0.589  
 alpha 5.e-002  
 ad sta[5.e-002] 2.49  
 p-value 0.658  
 result DO NOT REJECT

Normal  
 mean = 3.804e-003  
 sigma = 4.0937e-004  
 Kolmogorov-Smirnov  
 data points 50  
 ks stat 0.111  
 alpha 5.e-002  
 ks sta[50,5.e-002] 0.188  
 p-value 0.531  
 result DO NOT REJECT  
 Anderson-Darling  
 data points 50  
 ad stat 0.612  
 alpha 5.e-002  
 ad sta[5.e-002] 2.49  
 p-value 0.537  
 result DO NOT REJECT  
 Uniform  
 minimum = 3.2e-003  
 maximum = 4.7e-003  
 Kolmogorov-Smirnov  
 data points 50  
 ks stat 0.213  
 alpha 5.e-002  
 ks sta[50,5.e-002] 0.188  
 p-value 1.76e-002  
 result REJECT  
 Anderson-Darling  
 data points 45  
 ad stat 2.21  
 alpha 5.e-002  
 ad sta[5.e-002] 2.49  
 p-value 7.06e-002  
 result DO NOT REJECT



## Parte 1 – máquina S84

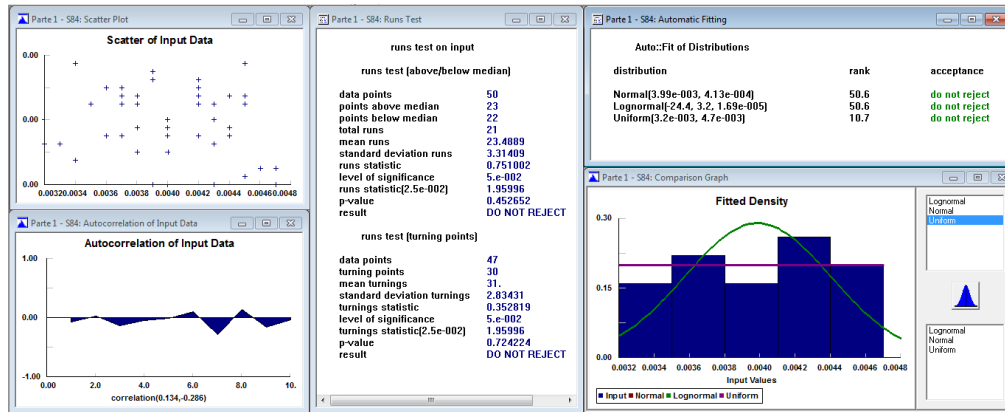
0.004 0.0042 0.0043 0.0032 0.0038  
 0.0036 0.0043 0.0042 0.0037 0.0039  
 0.0044 0.0042 0.0044 0.0042 0.0032  
 0.0039 0.0038 0.0043 0.0042 0.004  
 0.0046 0.0036 0.004 0.0045 0.0039  
 0.0034 0.0038 0.0032 0.0047 0.0045  
 0.0035 0.0042 0.004 0.0034 0.0033  
 0.0042 0.0045 0.004 0.0047 0.0037  
 0.0045 0.0043 0.0038 0.0032 0.0044  
 0.0042 0.0037 0.0043 0.0037 0.0038

```

Lognormal
  minimum = -24.4354
  mu = 3.19619
  sigma = 1.68934e-005
Kolmogorov-Smirnov
  data points = 50
  ks stat = 0.156
  alpha = 5.e-002
  ks stat(50,5.e-002) = 0.188
  p-value = 0.156
  result = DO NOT REJECT
Anderson-Darling
  data points = 50
  ad stat = 0.647
  alpha = 5.e-002
  ad stat(5.e-002) = 2.49
  p-value = 0.604
  result = DO NOT REJECT

Normal
  mean = 3.988e-003
  sigma = 4.12621e-004
Kolmogorov-Smirnov
  data points = 50
  ks stat = 0.156
  alpha = 5.e-002
  ks stat(50,5.e-002) = 0.188
  p-value = 0.156
  result = DO NOT REJECT
Anderson-Darling
  data points = 50
  ad stat = 0.647
  alpha = 5.e-002
  ad stat(5.e-002) = 2.49
  p-value = 0.604
  result = DO NOT REJECT

Uniform
  minimum = 3.2e-003
  maximum = 4.7e-003
Kolmogorov-Smirnov
  data points = 50
  ks stat = 0.133
  alpha = 5.e-002
  ks stat(50,5.e-002) = 0.188
  p-value = 0.308
  result = DO NOT REJECT
Anderson-Darling
  data points = 44
  ad stat = 2.28
  alpha = 5.e-002
  ad stat(5.e-002) = 2.49
  p-value = 6.47e-002
  result = DO NOT REJECT
    
```



## Parte 1 – máquina S85

0.0046 0.0038 0.0034 0.0043 0.0035  
 0.0043 0.0041 0.0043 0.0036 0.0041  
 0.0045 0.0035 0.0034 0.0042 0.004  
 0.0043 0.0036 0.0036 0.0045 0.0046  
 0.0036 0.0034 0.0035 0.0037 0.0035  
 0.0042 0.0039 0.0037 0.0036 0.0034  
 0.0032 0.0038 0.0039 0.0038 0.0038  
 0.0038 0.004 0.004 0.0033 0.0035  
 0.004 0.0039 0.0038 0.0036 0.0032  
 0.0041 0.0039 0.0036 0.0038 0.0045

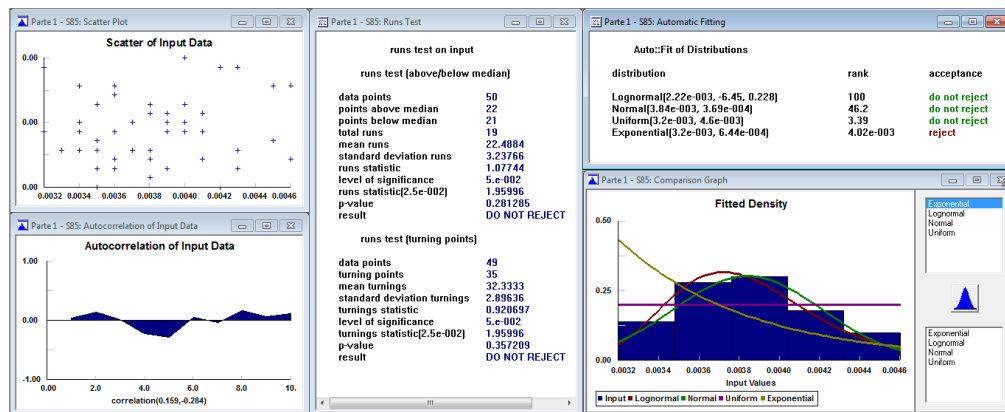
```

Exponential
  minimum = 3.2e-003
  beta = 6.44e-004
Kolmogorov-Smirnov
  data points = 50
  ks stat = 0.232
  alpha = 5.e-002
  ks stat(50,5.e-002) = 0.188
  p-value = 7.4e-003
  result = REJECT
Anderson-Darling
  data points = 48
  ad stat = 5.03
  alpha = 5.e-002
  ad stat(5.e-002) = 2.79e-003
  p-value = 0.865
  result = DO NOT REJECT

Lognormal
  minimum = 2.21525e-003
  mu = -6.44565
  sigma = 0.227604
Kolmogorov-Smirnov
  data points = 50
  ks stat = 0.106
  alpha = 5.e-002
  ks stat(50,5.e-002) = 0.188
  p-value = 0.593
  result = DO NOT REJECT
Anderson-Darling
  data points = 50
  ad stat = 0.383
  alpha = 5.e-002
  ad stat(5.e-002) = 2.49
  p-value = 0.865
  result = DO NOT REJECT

Normal
  mean = 3.844e-003
  sigma = 3.68869e-004
Kolmogorov-Smirnov
  data points = 50
  ks stat = 0.126
  alpha = 5.e-002
  ks stat(50,5.e-002) = 0.188
  p-value = 0.375
  result = DO NOT REJECT
Anderson-Darling
  data points = 50
  ad stat = 0.517
  alpha = 5.e-002
  ad stat(5.e-002) = 2.49
  p-value = 0.632
  result = DO NOT REJECT

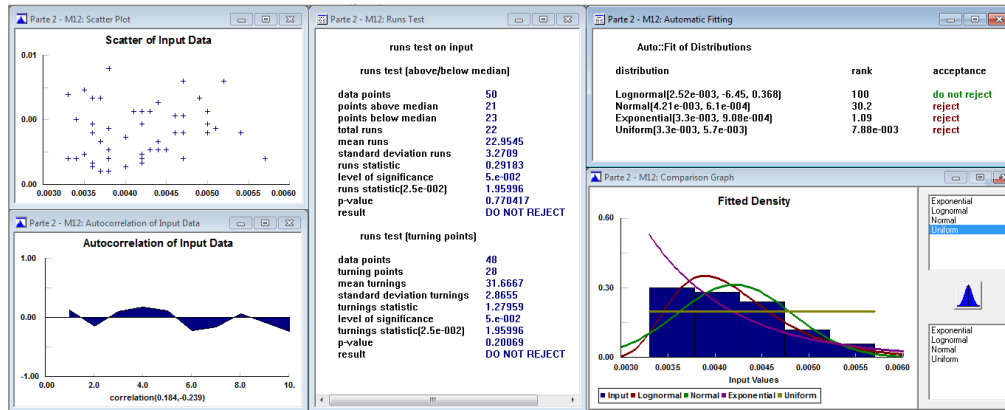
Uniform
  minimum = 3.2e-003
  maximum = 4.6e-003
Kolmogorov-Smirnov
  data points = 50
  ks stat = 0.149
  alpha = 5.e-002
  ks stat(50,5.e-002) = 0.188
  p-value = 0.199
  result = DO NOT REJECT
Anderson-Darling
  data points = 46
  ad stat = 2.04
  alpha = 5.e-002
  ad stat(5.e-002) = 2.49
  p-value = 8.77e-002
  result = DO NOT REJECT
    
```



## Parte 2 – máquina M12

0.0038 0.004 0.0051 0.0046 0.0047  
 0.0057 0.0041 0.0043 0.0046 0.0036  
 0.0036 0.0047 0.0038 0.0042 0.0044  
 0.0035 0.0042 0.0038 0.0035 0.0049  
 0.0052 0.0037 0.0036 0.0037 0.005  
 0.0054 0.004 0.005 0.0033 0.0042  
 0.0042 0.0034 0.0044 0.0036 0.0037  
 0.0036 0.0045 0.0038 0.0034 0.005  
 0.0042 0.0038 0.0043 0.0036 0.0047  
 0.0044 0.0033 0.0047 0.0042 0.0054

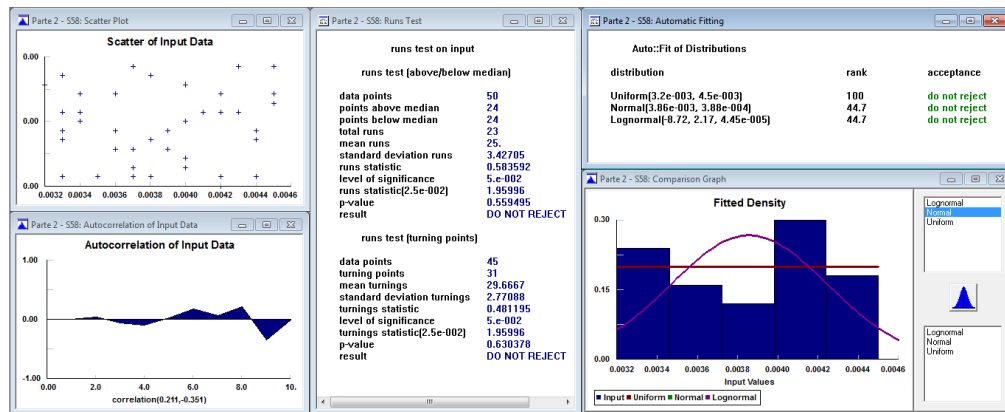
<p><b>Exponential</b></p> <p>minimum = 3.3e-003              beta = 9.08e-004</p> <p><b>Kolmogorov-Smirnov</b></p> <p>data points = 50              ks stat = 0.169              alpha = 5.e-002              ks stat(50,5.e-002) = 0.188              p-value = 0.103              result = DO NOT REJECT</p> <p><b>Anderson-Darling</b></p> <p>data points = 48              ad stat = 2.8              alpha = 5.e-002              ad stat(5.e-002) = 2.49              p-value = 3.47e-002              result = REJECT</p> <p><b>Lognormal</b></p> <p>minimum = 2.5219e-003              mu = -6.45176              sigma = 0.368106</p> <p><b>Kolmogorov-Smirnov</b></p> <p>data points = 50              ks stat = 0.116              alpha = 5.e-002              ks stat(50,5.e-002) = 0.188              p-value = 0.472              result = DO NOT REJECT</p> <p><b>Anderson-Darling</b></p> <p>data points = 50              ad stat = 0.556              alpha = 5.e-002              ad stat(5.e-002) = 2.49              p-value = 0.69              result = DO NOT REJECT</p>	<p><b>Normal</b></p> <p>mean = 4.208e-003              sigma = 6.09538e-004</p> <p><b>Kolmogorov-Smirnov</b></p> <p>data points = 50              ks stat = 0.148              alpha = 5.e-002              ks stat(50,5.e-002) = 0.188              p-value = 0.2              result = DO NOT REJECT</p> <p><b>Anderson-Darling</b></p> <p>data points = 50              ad stat = 0.785              alpha = 5.e-002              ad stat(5.e-002) = 2.49              p-value = 0.492              result = DO NOT REJECT</p> <p><b>Uniform</b></p> <p>minimum = 3.3e-003              maximum = 5.7e-003</p> <p><b>Kolmogorov-Smirnov</b></p> <p>data points = 50              ks stat = 0.237              alpha = 5.e-002              ks stat(50,5.e-002) = 0.188              p-value = 6.01e-003              result = REJECT</p> <p><b>Anderson-Darling</b></p> <p>data points = 47              ad stat = 4.64              alpha = 5.e-002              ad stat(5.e-002) = 2.49              p-value = 4.27e-003              result = REJECT</p>
---	--



## Parte 2 – máquina S58

0.004 0.0038 0.0036 0.0044 0.0034  
 0.0043 0.0033 0.0036 0.0033 0.0042  
 0.0045 0.0044 0.0038 0.0033 0.0032  
 0.0041 0.0037 0.0037 0.004 0.0043  
 0.004 0.0045 0.0036 0.0034 0.004  
 0.0034 0.0045 0.0042 0.0042 0.0035  
 0.004 0.0042 0.0033 0.0042 0.0033  
 0.0039 0.004 0.0037 0.0042 0.004  
 0.0038 0.0034 0.0033 0.0033 0.0043  
 0.0044 0.0039 0.0038 0.0037 0.004

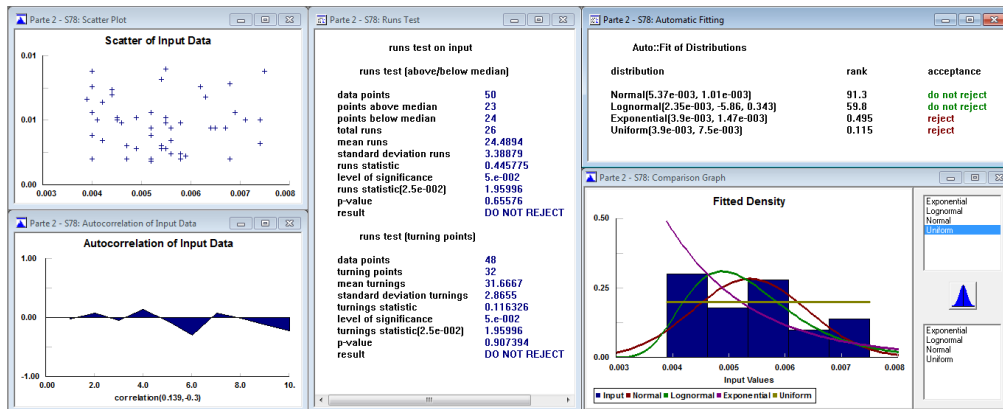
<p><b>Lognormal</b></p> <p>minimum = -8.71612              mu = 2.18562              sigma = 4.44797e-005</p> <p><b>Kolmogorov-Smirnov</b></p> <p>data points = 50              ks stat = 0.123              alpha = 5.e-002              ks stat(50,5.e-002) = 0.188              p-value = 0.405              result = DO NOT REJECT</p> <p><b>Anderson-Darling</b></p> <p>data points = 50              ad stat = 0.917              alpha = 5.e-002              ad stat(5.e-002) = 2.49              p-value = 0.404              result = DO NOT REJECT</p> <p><b>Normal</b></p> <p>mean = 3.858e-003              sigma = 3.87861e-004</p> <p><b>Kolmogorov-Smirnov</b></p> <p>data points = 50              ks stat = 0.123              alpha = 5.e-002              ks stat(50,5.e-002) = 0.188              p-value = 0.405              result = DO NOT REJECT</p> <p><b>Anderson-Darling</b></p> <p>data points = 50              ad stat = 0.917              alpha = 5.e-002              ad stat(5.e-002) = 2.49              p-value = 0.404              result = DO NOT REJECT</p>	<p><b>Uniform</b></p> <p>minimum = 3.2e-003              maximum = 4.5e-003</p> <p><b>Kolmogorov-Smirnov</b></p> <p>data points = 50              ks stat = 0.123              alpha = 5.e-002              ks stat(50,5.e-002) = 0.188              p-value = 0.717              result = DO NOT REJECT</p> <p><b>Anderson-Darling</b></p> <p>data points = 46              ad stat = 0.761              alpha = 5.e-002              ad stat(5.e-002) = 2.49              p-value = 0.51              result = DO NOT REJECT</p>
---	--



## Parte 2 – máquina S78

0.0059 0.004 0.0046 0.0058 0.004  
 0.0041 0.0049 0.0054 0.0042 0.0058  
 0.0055 0.0056 0.0045 0.0047 0.0054  
 0.0044 0.0042 0.0056 0.0045 0.0071  
 0.0067 0.0062 0.0052 0.0055 0.0055  
 0.0052 0.0068 0.0049 0.0056 0.0075  
 0.0039 0.0069 0.0044 0.0047 0.0074  
 0.0063 0.0058 0.0065 0.004 0.0055  
 0.0064 0.004 0.0052 0.004 0.0054  
 0.0052 0.0074 0.0052 0.0068 0.0044

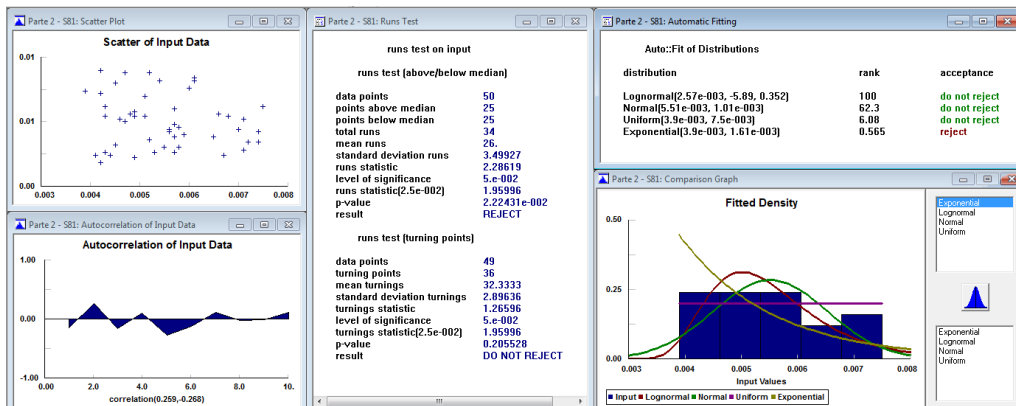
Exponential minimum = 3.9e-003 beta = 1.474e-003	Normal mean = 5.374e-003 sigma = 1.01229e-003
Kolmogorov-Smirnov data points 50 ks stat 0.206 alpha 5.e-002 ks stat[50,5.e-002] 0.188 p-value 2.44e-002 result REJECT	Kolmogorov-Smirnov data points 50 ks stat 9.17e-002 alpha 5.e-002 ks stat[50,5.e-002] 0.188 p-value 0.76 result DO NOT REJECT
Anderson-Darling data points 49 ad stat 1.98 alpha 5.e-002 ad stat[5.e-002] 2.49 p-value 9.4e-002 result DO NOT REJECT	Anderson-Darling data points 50 ad stat 0.702 alpha 5.e-002 ad stat[5.e-002] 2.49 p-value 0.557 result DO NOT REJECT
Lognormal minimum = 2.34615e-003 mu = -5.85735 sigma = 0.343038	Uniform minimum = 3.9e-003 maximum = 7.5e-003
Kolmogorov-Smirnov data points 50 ks stat 0.118 alpha 5.e-002 ks stat[50,5.e-002] 0.188 p-value 0.455 result DO NOT REJECT	Kolmogorov-Smirnov data points 50 ks stat 0.212 alpha 5.e-002 ks stat[50,5.e-002] 0.188 p-value 1.87e-002 result REJECT
Anderson-Darling data points 50 ad stat 0.641 alpha 5.e-002 ad stat[5.e-002] 2.49 p-value 0.61 result DO NOT REJECT	Anderson-Darling data points 48 ad stat 2.97 alpha 5.e-002 ad stat[5.e-002] 2.49 p-value 2.84e-002 result REJECT



## Parte 2 – máquina S81

0.0065 0.0058 0.0075 0.0051 0.0058  
 0.0049 0.0053 0.0061 0.0057 0.0045  
 0.0057 0.0043 0.0072 0.006 0.007  
 0.0049 0.0043 0.0047 0.0068 0.0052  
 0.0041 0.0057 0.0074 0.0057 0.0074  
 0.0042 0.0043 0.0047 0.0054 0.0051  
 0.0039 0.0061 0.0055 0.0071 0.0065  
 0.0067 0.0071 0.0045 0.0056 0.0049  
 0.0042 0.0044 0.0046 0.0052 0.0059  
 0.0066 0.0042 0.0056 0.0048 0.005

Exponential minimum = 3.9e-003 beta = 1.614e-003	Normal mean = 5.514e-003 sigma = 1.00876e-003
Kolmogorov-Smirnov data points 50 ks stat 0.162 alpha 5.e-002 ks stat[50,5.e-002] 0.188 p-value 0.13 result DO NOT REJECT	Kolmogorov-Smirnov data points 50 ks stat 8.86e-002 alpha 5.e-002 ks stat[50,5.e-002] 0.188 p-value 0.794 result DO NOT REJECT
Anderson-Darling data points 49 ad stat 2.92 alpha 5.e-002 ad stat[5.e-002] 2.49 p-value 2.99e-002 result REJECT	Anderson-Darling data points 50 ad stat 0.721 alpha 5.e-002 ad stat[5.e-002] 2.49 p-value 0.542 result DO NOT REJECT
Lognormal minimum = 2.56911e-003 mu = -5.8882 sigma = 0.352276	Uniform minimum = 3.9e-003 maximum = 7.5e-003
Kolmogorov-Smirnov data points 50 ks stat 8.01e-002 alpha 5.e-002 ks stat[50,5.e-002] 0.188 p-value 0.89 result DO NOT REJECT	Kolmogorov-Smirnov data points 50 ks stat 0.152 alpha 5.e-002 ks stat[50,5.e-002] 0.188 p-value 0.178 result DO NOT REJECT
Anderson-Darling data points 50 ad stat 0.464 alpha 5.e-002 ad stat[5.e-002] 2.49 p-value 0.784 result DO NOT REJECT	Anderson-Darling data points 48 ad stat 1.29 alpha 5.e-002 ad stat[5.e-002] 2.49 p-value 0.236 result DO NOT REJECT

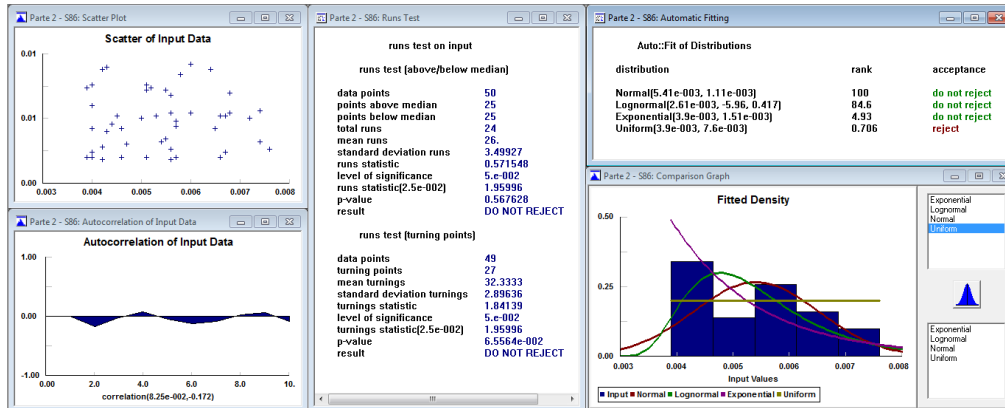




## Parte 2 – máquina S86

0.0042 0.0054 0.0044 0.0039 0.0055  
 0.0039 0.0046 0.0053 0.004 0.0047  
 0.0067 0.0051 0.0056 0.0068 0.0045  
 0.0042 0.0066 0.0064 0.0065 0.0056  
 0.0074 0.004 0.0074 0.0051 0.0057  
 0.0046 0.0051 0.0058 0.004 0.0052  
 0.004 0.0068 0.0072 0.006 0.0067  
 0.004 0.0057 0.0055 0.0076 0.0056  
 0.006 0.004 0.0066 0.0043 0.0043  
 0.0057 0.0042 0.0056 0.005 0.0075

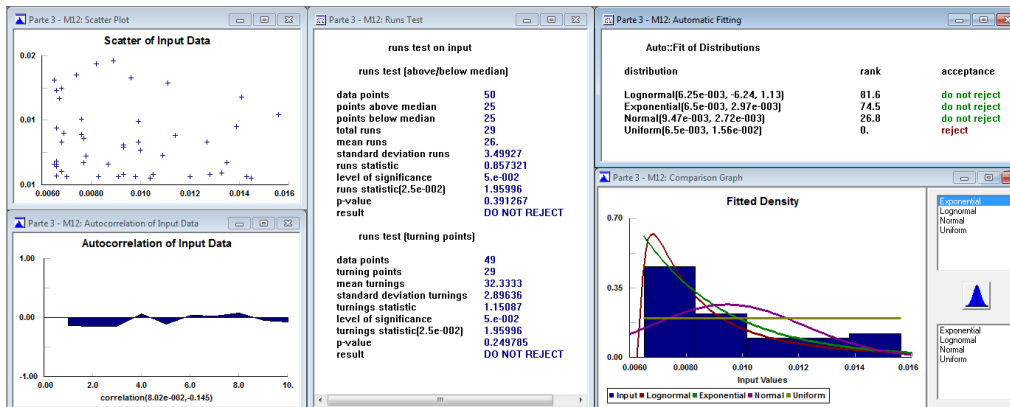
<p><b>Exponential</b>                  minimum = 3.9e-003                  beta = 1.51e-003                  Kolmogorov-Smirnov                  data points 50                  ks stat 0.168                  alpha 5.e-002                  ks stat[50,5.e-002] 0.188                  p-value 0.105                  result DO NOT REJECT                  Anderson-Darling                  data points 48                  ad stat 1.87                  alpha 5.e-002                  ad stat[5.e-002] 2.49                  p-value 0.108                  result DO NOT REJECT</p>	<p><b>Normal</b>                  mean = 5.41e-003                  sigma = 1.10693e-003                  Kolmogorov-Smirnov                  data points 50                  ks stat 0.108                  alpha 5.e-002                  ks stat[50,5.e-002] 0.188                  p-value 0.559                  result DO NOT REJECT                  Anderson-Darling                  data points 50                  ad stat 0.917                  alpha 5.e-002                  ad stat[5.e-002] 2.49                  p-value 0.404                  result DO NOT REJECT</p>
<p><b>Lognormal</b>                  minimum = 2.61298e-003                  mu = -5.96271                  sigma = 0.417221                  Kolmogorov-Smirnov                  data points 50                  ks stat 0.109                  alpha 5.e-002                  ks stat[50,5.e-002] 0.188                  p-value 0.558                  result DO NOT REJECT                  Anderson-Darling                  data points 50                  ad stat 1.02                  alpha 5.e-002                  ad stat[5.e-002] 2.49                  p-value 0.348                  result DO NOT REJECT</p>	<p><b>Uniform</b>                  minimum = 3.9e-003                  maximum = 7.6e-003                  Kolmogorov-Smirnov                  data points 50                  ks stat 0.194                  alpha 5.e-002                  ks stat[50,5.e-002] 0.188                  p-value 4.09e-002                  result REJECT                  Anderson-Darling                  data points 47                  ad stat 2.69                  alpha 5.e-002                  ad stat[5.e-002] 2.49                  p-value 3.97e-002                  result REJECT</p>



## Parte 3 – máquina M12

0.012 0.0066 0.0099 0.0128 0.0068  
 0.0066 0.0067 0.0093 0.0068 0.0135  
 0.0133 0.0127 0.0089 0.0093 0.0077  
 0.0069 0.0093 0.0156 0.0068 0.0077  
 0.01 0.0091 0.0114 0.007 0.0096  
 0.0087 0.0066 0.0098 0.0066 0.0143  
 0.0076 0.0074 0.0066 0.0076 0.0066  
 0.0099 0.0145 0.0104 0.0111 0.0078  
 0.0109 0.0065 0.0065 0.0139 0.0082  
 0.0083 0.0076 0.0141 0.0105 0.0154

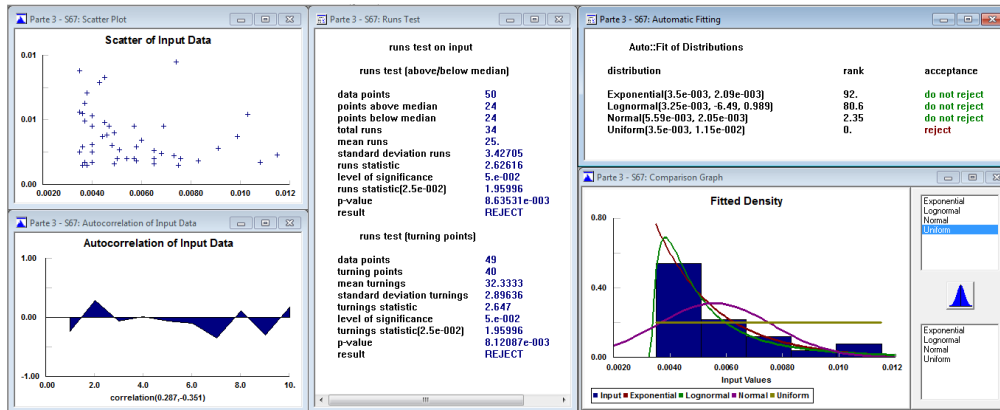
<p><b>Exponential</b>                  minimum = 6.5e-003                  beta = 2.974e-003                  Kolmogorov-Smirnov                  data points 50                  ks stat 0.144                  alpha 5.e-002                  ks stat[50,5.e-002] 0.188                  p-value 0.228                  result DO NOT REJECT                  Anderson-Darling                  data points 48                  ad stat 1.22                  alpha 5.e-002                  ad stat[5.e-002] 2.49                  p-value 0.261                  result DO NOT REJECT</p>	<p><b>Normal</b>                  mean = 9.474e-003                  sigma = 2.71726e-003                  Kolmogorov-Smirnov                  data points 50                  ks stat 0.151                  alpha 5.e-002                  ks stat[50,5.e-002] 0.188                  p-value 0.184                  result DO NOT REJECT                  Anderson-Darling                  data points 50                  ad stat 1.82                  alpha 5.e-002                  ad stat[5.e-002] 2.49                  p-value 0.116                  result DO NOT REJECT</p>
<p><b>Lognormal</b>                  minimum = 6.25477e-003                  mu = -6.239                  sigma = 1.12541                  Kolmogorov-Smirnov                  data points 50                  ks stat 0.134                  alpha 5.e-002                  ks stat[50,5.e-002] 0.188                  p-value 0.306                  result DO NOT REJECT                  Anderson-Darling                  data points 50                  ad stat 1.36                  alpha 5.e-002                  ad stat[5.e-002] 2.49                  p-value 0.213                  result DO NOT REJECT</p>	<p><b>Uniform</b>                  minimum = 6.5e-003                  maximum = 1.56e-002                  Kolmogorov-Smirnov                  data points 50                  ks stat 0.295                  alpha 5.e-002                  ks stat[50,5.e-002] 0.188                  p-value 2.32e-004                  result REJECT                  Anderson-Darling                  data points 47                  ad stat 10.6                  alpha 5.e-002                  ad stat[5.e-002] 2.49                  p-value 0.                  result REJECT</p>



### Parte 3 – máquina S67

0.0058	0.0038	0.0045	0.0068	0.0108
0.0049	0.0091	0.0103	0.0044	0.0037
0.006	0.0048	0.0074	0.0057	0.0037
0.0054	0.005	0.0115	0.004	0.0083
0.004	0.004	0.0043	0.0037	0.0038
0.0051	0.0065	0.0099	0.0069	0.0035
0.0047	0.0036	0.0057	0.0065	0.0076
0.0065	0.0049	0.0065	0.0036	0.004
0.0046	0.0036	0.004	0.0075	0.0073
0.0058	0.0035	0.0045	0.0035	0.0042

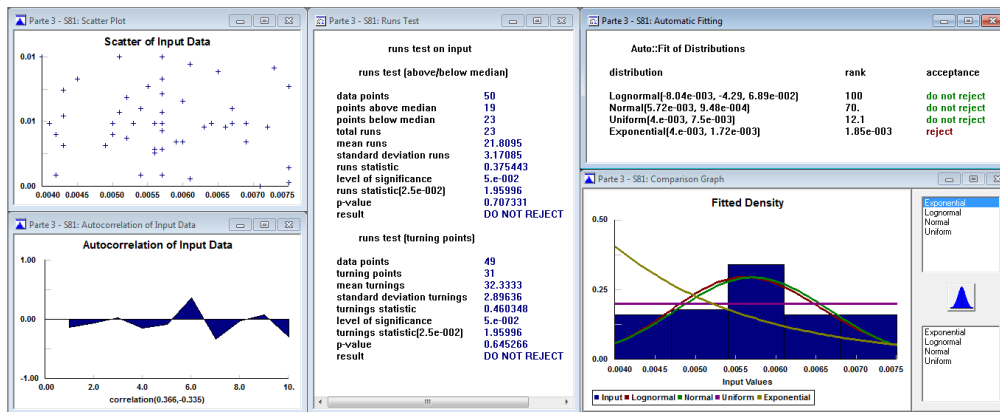
Exponential	Normal
minimum = 3.5e-003	mean = 5.594e-003
beta = 2.894e-003	sigma = 2.04582e-003
Kolmogorov-Smirnov data points = 50	Kolmogorov-Smirnov data points = 50
ks stat = 5.e-002	ks stat = 0.155
alpha = 0.188	alpha = 5.e-002
ks stat(50,5.e-002) = 0.572	ks stat(50,5.e-002) = 0.188
p-value = DO NOT REJECT	p-value = 0.161
result = DO NOT REJECT	result = DO NOT REJECT
Anderson-Darling data points = 47	Anderson-Darling data points = 50
ad stat = 0.381	ad stat = 2.12
alpha = 5.e-002	alpha = 5.e-002
ad stat(5.e-002) = 2.49	ad stat(5.e-002) = 2.49
p-value = 0.867	p-value = 7.88e-002
result = DO NOT REJECT	result = DO NOT REJECT
Lognormal minimum = 3.25461e-003	Uniform minimum = 3.5e-003
mu = -6.48555	maximum = 1.15e-002
sigma = 0.908975	Kolmogorov-Smirnov data points = 50
Kolmogorov-Smirnov data points = 50	ks stat = 0.395
ks stat = 0.103	ks stat = 5.e-002
alpha = 5.e-002	alpha = 0.188
ks stat(50,5.e-002) = 0.621	ks stat(50,5.e-002) = 0.
p-value = DO NOT REJECT	p-value = REJECT
result = DO NOT REJECT	result = REJECT
Anderson-Darling data points = 50	Anderson-Darling data points = 46
ad stat = 0.547	ad stat = 16.9
alpha = 5.e-002	alpha = 5.e-002
ad stat(5.e-002) = 0.699	ad stat(5.e-002) = 2.49
p-value = DO NOT REJECT	p-value = 0.
result = DO NOT REJECT	result = REJECT



### Parte 3 – máquina S81

0.0042	0.0064	0.0056	0.0065	0.0052
0.0054	0.0057	0.005	0.0071	0.0053
0.0061	0.0043	0.0054	0.004	0.0057
0.0073	0.0066	0.0043	0.0075	0.0055
0.0072	0.0056	0.0051	0.0067	0.0067
0.0056	0.0057	0.0075	0.0057	0.0061
0.0049	0.0069	0.0041	0.0057	0.0042
0.0051	0.0057	0.0057	0.0075	0.0043
0.006	0.006	0.005	0.0045	0.0059
0.0052	0.0063	0.0057	0.0069	0.0052

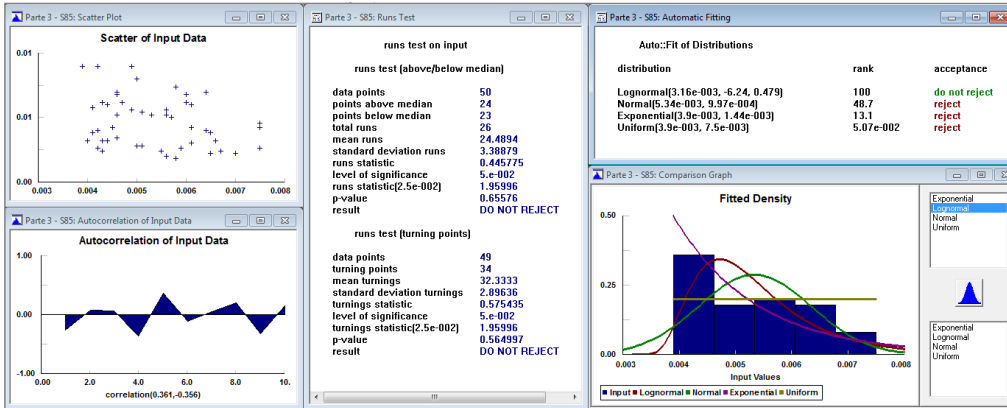
Exponential	Normal
minimum = 4.e-003	mean = 5.716e-003
beta = 1.716e-003	sigma = 9.40337e-004
Kolmogorov-Smirnov data points = 50	Kolmogorov-Smirnov data points = 50
ks stat = 0.262	ks stat = 0.127
alpha = 5.e-002	alpha = 5.e-002
ks stat(50,5.e-002) = 1.65e-003	ks stat(50,5.e-002) = 0.188
p-value = REJECT	p-value = DO NOT REJECT
result = REJECT	result = DO NOT REJECT
Anderson-Darling data points = 49	Anderson-Darling data points = 50
ad stat = 4.62	ad stat = 0.504
alpha = 5.e-002	alpha = 5.e-002
ad stat(5.e-002) = 4.36e-003	ad stat(5.e-002) = 2.49
p-value = REJECT	p-value = 0.743
result = REJECT	result = DO NOT REJECT
Lognormal minimum = -9.0429e-003	Uniform minimum = 4.e-003
mu = -4.28844	maximum = 7.5e-003
sigma = 6.8946e-002	Kolmogorov-Smirnov data points = 50
Kolmogorov-Smirnov data points = 50	ks stat = 0.134
ks stat = 0.113	ks stat = 5.e-002
alpha = 5.e-002	alpha = 0.188
ks stat(50,5.e-002) = 0.51	ks stat(50,5.e-002) = 0.301
p-value = DO NOT REJECT	p-value = DO NOT REJECT
result = DO NOT REJECT	result = DO NOT REJECT
Anderson-Darling data points = 50	Anderson-Darling data points = 46
ad stat = 0.484	ad stat = 1.59
alpha = 5.e-002	alpha = 5.e-002
ad stat(5.e-002) = 0.764	ad stat(5.e-002) = 2.49
p-value = DO NOT REJECT	p-value = 0.156
result = DO NOT REJECT	result = DO NOT REJECT



### Parte 3 – máquina S85

0.0066	0.0059	0.0043	0.0053	0.0044
0.0046	0.0043	0.0046	0.0056	0.006
0.0047	0.0042	0.0064	0.0056	0.0061
0.0061	0.0043	0.005	0.004	0.006
0.0045	0.0061	0.007	0.0046	0.0064
0.0051	0.0051	0.0041	0.0056	0.0065
0.0044	0.0057	0.0049	0.0058	0.0049
0.0046	0.0055	0.0058	0.0067	0.0075
0.0065	0.0042	0.0039	0.0042	0.0051
0.0041	0.0075	0.0075	0.005	0.0044

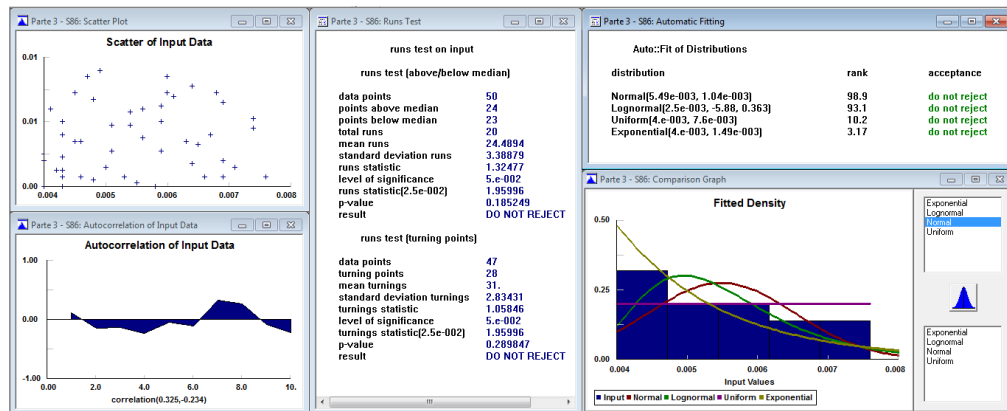
Exponential	minimum =	3.9e-003	Normal	mean =	5.344e-003
	beta =	1.444e-003		sigma =	9.96626e-004
Kolmogorov-Smirnov	data points	50	Kolmogorov-Smirnov	data points	50
	ks stat	0.132		ks stat	0.132
	alpha	5.e-002		alpha	5.e-002
	ks stat[50,5.e-002]	0.188		ks stat[50,5.e-002]	0.188
	p-value	0.321		p-value	0.317
	result	DO NOT REJECT		result	DO NOT REJECT
Anderson-Darling	data points	49	Anderson-Darling	data points	50
	ad stat	1.89		ad stat	0.928
	alpha	5.e-002		alpha	5.e-002
	ad stat[5.e-002]	2.49		ad stat[5.e-002]	2.49
	p-value	0.105		p-value	0.398
	result	DO NOT REJECT		result	DO NOT REJECT
Lognormal	minimum =	3.16056e-003	Uniform	minimum =	3.9e-003
	mu =	-6.2369		maximum =	7.5e-003
	sigma =	0.479243	Kolmogorov-Smirnov	data points	50
Kolmogorov-Smirnov	ks stat	0.118		ks stat	0.189
	alpha	5.e-002		alpha	5.e-002
	ks stat[50,5.e-002]	0.188		ks stat[50,5.e-002]	0.188
	p-value	0.459		p-value	4.91e-002
	result	DO NOT REJECT		result	REJECT
Anderson-Darling	data points	50	Anderson-Darling	data points	46
	ad stat	0.694		ad stat	5.06
	alpha	5.e-002		alpha	5.e-002
	ad stat[5.e-002]	2.49		ad stat[5.e-002]	2.49
	p-value	0.564		p-value	2.68e-003
	result	DO NOT REJECT		result	REJECT



### Parte 3 – máquina S86

0.0059	0.0043	0.0074	0.0056	0.0067
0.0065	0.0045	0.0061	0.0055	0.0056
0.0053	0.0054	0.0068	0.0041	0.0064
0.0043	0.0063	0.0069	0.0064	0.0071
0.0043	0.0054	0.0048	0.0047	0.0046
0.0049	0.0059	0.0042	0.0074	0.0043
0.0076	0.0051	0.0045	0.0058	0.004
0.0043	0.0051	0.0069	0.004	0.005
0.006	0.0059	0.0066	0.004	0.0046
0.0069	0.006	0.0043	0.0048	0.0054

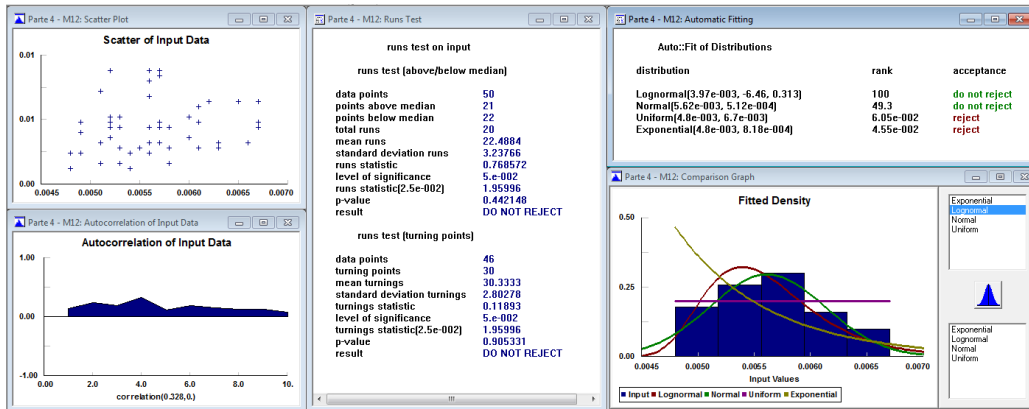
Exponential	minimum =	4.e-003	Normal	mean =	5.489e-003
	beta =	1.488e-003		sigma =	1.043e-003
Kolmogorov-Smirnov	data points	50	Kolmogorov-Smirnov	data points	50
	ks stat	0.15		ks stat	0.105
	alpha	5.e-002		alpha	5.e-002
	ks stat[50,5.e-002]	0.188		ks stat[50,5.e-002]	0.188
	p-value	0.192		p-value	0.6
	result	DO NOT REJECT		result	DO NOT REJECT
Anderson-Darling	data points	47	Anderson-Darling	data points	50
	ad stat	2.55		ad stat	0.819
	alpha	5.e-002		alpha	5.e-002
	ad stat[5.e-002]	2.49		ad stat[5.e-002]	2.49
	p-value	4.69e-002		p-value	0.468
	result	REJECT		result	DO NOT REJECT
Lognormal	minimum =	2.50156e-003	Uniform	minimum =	4.e-003
	mu =	-5.87766		maximum =	7.6e-003
	sigma =	0.363212	Kolmogorov-Smirnov	data points	50
Kolmogorov-Smirnov	ks stat	0.109		ks stat	0.144
	alpha	5.e-002		alpha	5.e-002
	ks stat[50,5.e-002]	0.188		ks stat[50,5.e-002]	0.188
	p-value	0.558		p-value	0.225
	result	DO NOT REJECT		result	DO NOT REJECT
Anderson-Darling	data points	50	Anderson-Darling	data points	46
	ad stat	0.811		ad stat	1.74
	alpha	5.e-002		alpha	5.e-002
	ad stat[5.e-002]	2.49		ad stat[5.e-002]	2.49
	p-value	0.473		p-value	0.128
	result	DO NOT REJECT		result	DO NOT REJECT



## Parte 4 – máquina M12

0.006	0.0048	0.0049	0.0061	0.0058
0.0054	0.0051	0.0051	0.0057	0.0052
0.0051	0.0063	0.0049	0.0057	0.0056
0.0053	0.0052	0.0057	0.0067	0.0062
0.0058	0.0058	0.0056	0.0056	0.0061
0.0049	0.0056	0.0051	0.0056	0.0052
0.0055	0.0053	0.0063	0.0056	0.0067
0.0052	0.0052	0.0053	0.0067	0.0057
0.0054	0.0057	0.0056	0.0061	0.0066
0.0048	0.0053	0.0065	0.006	0.0053

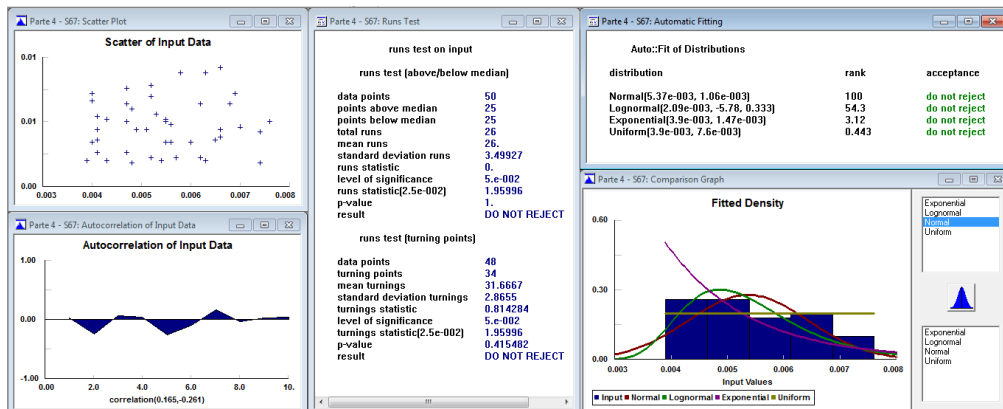
Exponential	minimum	=	4.8e-003
	beta	=	8.18e-004
Kolmogorov-Smirnov	data points	=	50
	ks stat	=	0.287
	alpha	=	5.e-002
	ks stat[50.5.e-002]	=	0.188
	p-value	=	2.34e-002
	result	=	REJECT
Anderson-Darling	data points	=	48
	ad stat	=	3.31
	alpha	=	5.e-002
	ad stat[5.e-002]	=	2.49
	p-value	=	9.66e-003
	result	=	REJECT
Lognormal	minimum	=	3.9677e-003
	mu	=	-6.45502
	sigma	=	0.312785
Kolmogorov-Smirnov	data points	=	50
	ks stat	=	0.187
	alpha	=	5.e-002
	ks stat[50.5.e-002]	=	0.188
	p-value	=	0.574
	result	=	DO NOT REJECT
Anderson-Darling	data points	=	50
	ad stat	=	0.382
	alpha	=	5.e-002
	ad stat[5.e-002]	=	2.49
	p-value	=	0.867
	result	=	DO NOT REJECT
Normal	mean	=	5.618e-003
	sigma	=	5.11738e-004
Kolmogorov-Smirnov	data points	=	50
	ks stat	=	0.116
	alpha	=	5.e-002
	ks stat[50.5.e-002]	=	0.188
	p-value	=	0.473
	result	=	DO NOT REJECT
Anderson-Darling	data points	=	50
	ad stat	=	0.75
	alpha	=	5.e-002
	ad stat[5.e-002]	=	2.49
	p-value	=	0.519
	result	=	DO NOT REJECT
Uniform	minimum	=	4.8e-003
	maximum	=	6.7e-003
Kolmogorov-Smirnov	data points	=	50
	ks stat	=	0.214
	alpha	=	5.e-002
	ks stat[50.5.e-002]	=	0.188
	p-value	=	1.75e-002
	result	=	REJECT
Anderson-Darling	data points	=	45
	ad stat	=	3.4
	alpha	=	5.e-002
	ad stat[5.e-002]	=	2.49
	p-value	=	1.72e-002
	result	=	REJECT



## Parte 4 – máquina S67

0.007	0.0054	0.0062	0.0066	0.0074
0.0053	0.004	0.0041	0.0049	0.0051
0.0058	0.0047	0.0048	0.0052	0.0052
0.0074	0.0043	0.006	0.0065	0.0041
0.0039	0.0056	0.0047	0.0048	0.0057
0.004	0.0047	0.0068	0.0039	0.0041
0.0066	0.0055	0.0062	0.004	0.0043
0.0076	0.0055	0.0041	0.0063	0.004
0.0055	0.0047	0.0052	0.004	0.0066
0.0056	0.0062	0.0069	0.0063	0.0052

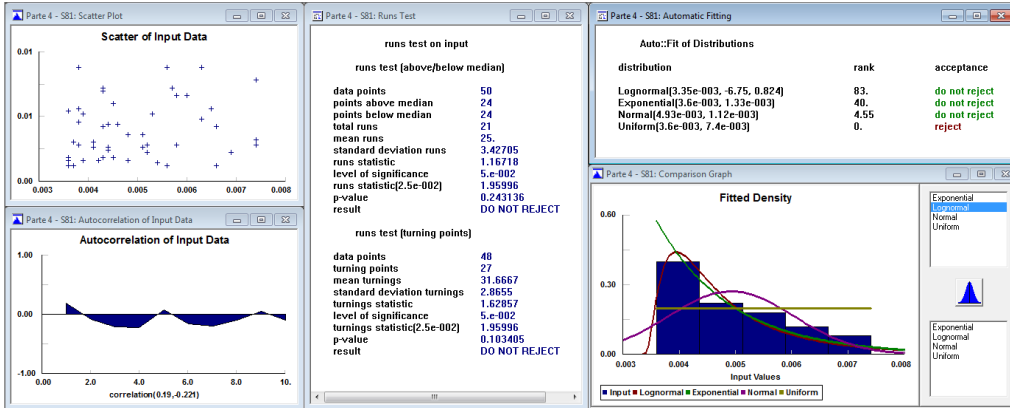
Exponential	minimum	=	3.9e-003
	beta	=	1.47e-003
Kolmogorov-Smirnov	data points	=	50
	ks stat	=	0.167
	alpha	=	5.e-002
	ks stat[50.5.e-002]	=	0.188
	p-value	=	0.109
	result	=	DO NOT REJECT
Anderson-Darling	data points	=	48
	ad stat	=	2.04
	alpha	=	5.e-002
	ad stat[5.e-002]	=	2.49
	p-value	=	8.71e-002
	result	=	DO NOT REJECT
Lognormal	minimum	=	2.09431e-003
	mu	=	-5.77535
	sigma	=	0.333079
Kolmogorov-Smirnov	data points	=	50
	ks stat	=	0.125
	alpha	=	5.e-002
	ks stat[50.5.e-002]	=	0.188
	p-value	=	0.394
	result	=	DO NOT REJECT
Anderson-Darling	data points	=	50
	ad stat	=	0.872
	alpha	=	5.e-002
	ad stat[5.e-002]	=	2.49
	p-value	=	0.432
	result	=	DO NOT REJECT
Normal	mean	=	5.37e-003
	sigma	=	1.05854e-003
Kolmogorov-Smirnov	data points	=	50
	ks stat	=	0.105
	alpha	=	5.e-002
	ks stat[50.5.e-002]	=	0.188
	p-value	=	0.604
	result	=	DO NOT REJECT
Anderson-Darling	data points	=	50
	ad stat	=	0.766
	alpha	=	5.e-002
	ad stat[5.e-002]	=	2.49
	p-value	=	0.506
	result	=	DO NOT REJECT
Uniform	minimum	=	3.9e-003
	maximum	=	7.6e-003
Kolmogorov-Smirnov	data points	=	50
	ks stat	=	0.181
	alpha	=	5.e-002
	ks stat[50.5.e-002]	=	0.188
	p-value	=	8.74e-002
	result	=	DO NOT REJECT
Anderson-Darling	data points	=	47
	ad stat	=	3.27
	alpha	=	5.e-002
	ad stat[5.e-002]	=	2.49
	p-value	=	2.01e-002
	result	=	REJECT



## Parte 4 – máquina S81

0.0037	0.0036	0.0057	0.0058	0.0045
0.0045	0.0039	0.0066	0.0063	0.0039
0.006	0.0038	0.0051	0.0054	0.0056
0.0063	0.0074	0.0048	0.0037	0.0074
0.0074	0.0046	0.0048	0.0036	0.0069
0.0044	0.0052	0.0038	0.0036	0.0041
0.0042	0.0044	0.0058	0.0038	0.0043
0.0038	0.0043	0.0044	0.0044	0.0051
0.0053	0.0066	0.0043	0.0052	0.0043
0.0056	0.0036	0.0065	0.0041	0.0039

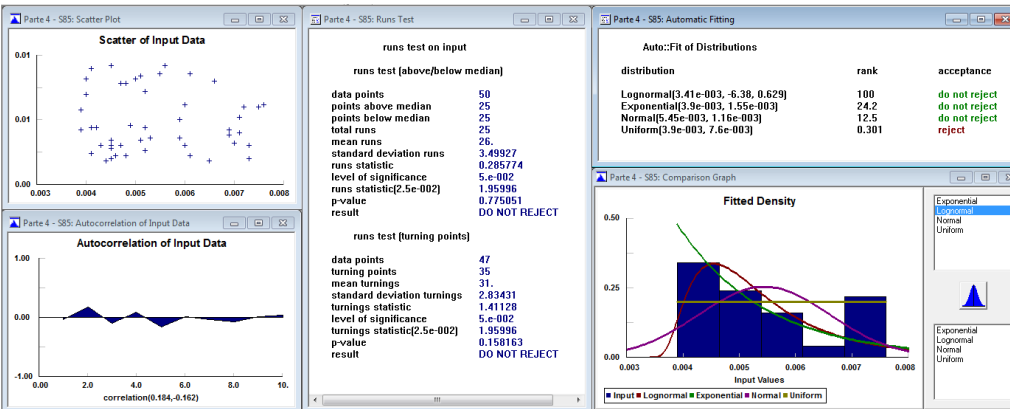
Exponential		minimum =	3.6e-003	Normal		mean =	4.926e-003
beta		=	1.326e-003	sigma		=	1.11549e-003
Kolmogorov-Smirnov		data points	50	Kolmogorov-Smirnov		data points	50
ks stat		9.74e-002		ks stat		0.169	
alpha		5.e-002		alpha		5.e-002	
ks sta[50,5.e-002]		0.188		ks sta[50,5.e-002]		0.188	
p-value		0.694		p-value		0.103	
result		DO NOT REJECT		result		DO NOT REJECT	
Anderson-Darling		data points	46	Anderson-Darling		data points	50
ad stat		1.31		ad stat		1.51	
alpha		5.e-002		alpha		5.e-002	
ad sta[5.e-002]		2.49		ad sta[5.e-002]		2.49	
p-value		0.228		p-value		0.175	
result		DO NOT REJECT		result		DO NOT REJECT	
Lognormal		minimum =	3.35312e-003	Uniform		minimum =	3.6e-003
mu		=	-6.75202	maximum =		7.4e-003	
sigma		=	0.823783	Kolmogorov-Smirnov		data points	50
Kolmogorov-Smirnov		ks stat	0.107	ks stat		0.283	
alpha		5.e-002		alpha		5.e-002	
ks sta[50,5.e-002]		0.188		ks sta[50,5.e-002]		0.188	
p-value		0.576		p-value		4.85e-004	
result		DO NOT REJECT		result		REJECT	
Anderson-Darling		data points	50	Anderson-Darling		data points	43
ad stat		0.687		ad stat		7.23	
alpha		5.e-002		alpha		5.e-002	
ad sta[5.e-002]		2.49		ad sta[5.e-002]		2.49	
p-value		0.57		p-value		0.	
result		DO NOT REJECT		result		REJECT	



## Parte 4 – máquina S85

0.0059	0.0044	0.0052	0.0071	0.0049
0.0055	0.0039	0.0052	0.005	0.0053
0.0073	0.0059	0.0066	0.0071	0.0048
0.004	0.0048	0.007	0.0056	0.0069
0.0065	0.0041	0.0046	0.0076	0.0051
0.0039	0.0075	0.0041	0.0061	0.0072
0.0051	0.006	0.0052	0.0073	0.006
0.0047	0.0061	0.0043	0.0045	0.0045
0.0045	0.0041	0.0045	0.0047	0.0045
0.0045	0.0042	0.004	0.0069	0.0076

Exponential		minimum =	3.9e-003	Normal		mean =	5.446e-003
beta		=	1.546e-003	sigma		=	1.15969e-003
Kolmogorov-Smirnov		data points	50	Kolmogorov-Smirnov		data points	50
ks stat		0.122		ks stat		0.144	
alpha		5.e-002		alpha		5.e-002	
ks sta[50,5.e-002]		0.188		ks sta[50,5.e-002]		0.188	
p-value		0.417		p-value		0.228	
result		DO NOT REJECT		result		DO NOT REJECT	
Anderson-Darling		data points	48	Anderson-Darling		data points	50
ad stat		1.51		ad stat		1.55	
alpha		5.e-002		alpha		5.e-002	
ad sta[5.e-002]		2.49		ad sta[5.e-002]		2.49	
p-value		0.174		p-value		0.164	
result		DO NOT REJECT		result		DO NOT REJECT	
Lognormal		minimum =	3.40893e-003	Uniform		minimum =	3.9e-003
mu		=	-6.37848	maximum =		7.6e-003	
sigma		=	0.62868	Kolmogorov-Smirnov		data points	50
Kolmogorov-Smirnov		ks stat	0.109	ks stat		0.209	
alpha		5.e-002		alpha		5.e-002	
ks sta[50,5.e-002]		0.188		ks sta[50,5.e-002]		0.188	
p-value		0.555		p-value		2.18e-002	
result		DO NOT REJECT		result		REJECT	
Anderson-Darling		data points	50	Anderson-Darling		data points	46
ad stat		0.723		ad stat		2.65	
alpha		5.e-002		alpha		5.e-002	
ad sta[5.e-002]		2.49		ad sta[5.e-002]		2.49	
p-value		0.54		p-value		4.14e-002	
result		DO NOT REJECT		result		REJECT	

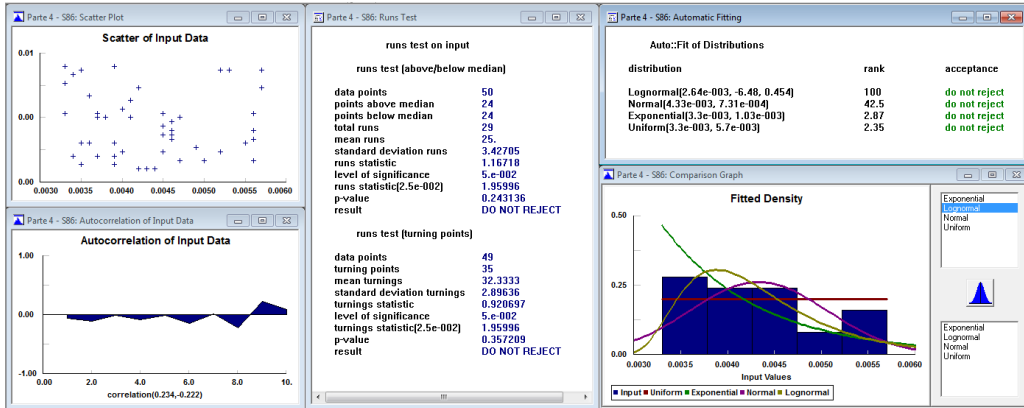


## Parte 4 – máquina S86

0.004 0.0046 0.0056 0.0056 0.0037  
 0.0047 0.004 0.0035 0.004 0.0046  
 0.0045 0.0047 0.0034 0.0037 0.0041  
 0.0046 0.0035 0.0036 0.0045 0.0049  
 0.0044 0.0039 0.005 0.0041 0.0038  
 0.0033 0.0039 0.0035 0.0045 0.0045  
 0.0053 0.0034 0.0056 0.0043 0.0037  
 0.0056 0.0055 0.0046 0.0033 0.0036  
 0.0042 0.0039 0.0042 0.0057 0.0039  
 0.0033 0.0057 0.0052 0.0052 0.0036

Exponential  
 minimum = 3.3e-003  
 beta = 1.03e-003  
 Kolmogorov-Smirnov  
 data points 50  
 ks stat 0.142  
 alpha 5.e-002  
 ks stat(50.5.e-002) 0.188  
 p-value 0.245  
 result DO NOT REJECT  
 Anderson-Darling  
 data points 47  
 ad stat 2.52  
 alpha 5.e-002  
 ad stat(5.e-002) 2.49  
 p-value 4.82e-002  
 result REJECT  
 Lognormal  
 minimum = 2.64088e-003  
 mu = -6.48242  
 sigma = 0.454088  
 Kolmogorov-Smirnov  
 data points 50  
 ks stat 0.106  
 alpha 5.e-002  
 ks stat(50.5.e-002) 0.188  
 p-value 0.591  
 result DO NOT REJECT  
 Anderson-Darling  
 data points 50  
 ad stat 0.549  
 alpha 5.e-002  
 ad stat(5.e-002) 2.49  
 p-value 0.697  
 result DO NOT REJECT

Normal  
 mean = 4.33e-003  
 sigma = 7.31369e-004  
 Kolmogorov-Smirnov  
 data points 50  
 ks stat 0.114  
 alpha 5.e-002  
 ks stat(50.5.e-002) 0.188  
 p-value 0.498  
 result DO NOT REJECT  
 Anderson-Darling  
 data points 50  
 ad stat 1.01  
 alpha 5.e-002  
 ad stat(5.e-002) 2.49  
 p-value 0.352  
 result DO NOT REJECT  
 Uniform  
 minimum = 3.3e-003  
 maximum = 5.7e-003  
 Kolmogorov-Smirnov  
 data points 50  
 ks stat 0.178  
 alpha 5.e-002  
 ks stat(50.5.e-002) 0.188  
 p-value 7.31e-002  
 result DO NOT REJECT  
 Anderson-Darling  
 data points 45  
 ad stat 1.72  
 alpha 5.e-002  
 ad stat(5.e-002) 2.49  
 p-value 0.132  
 result DO NOT REJECT

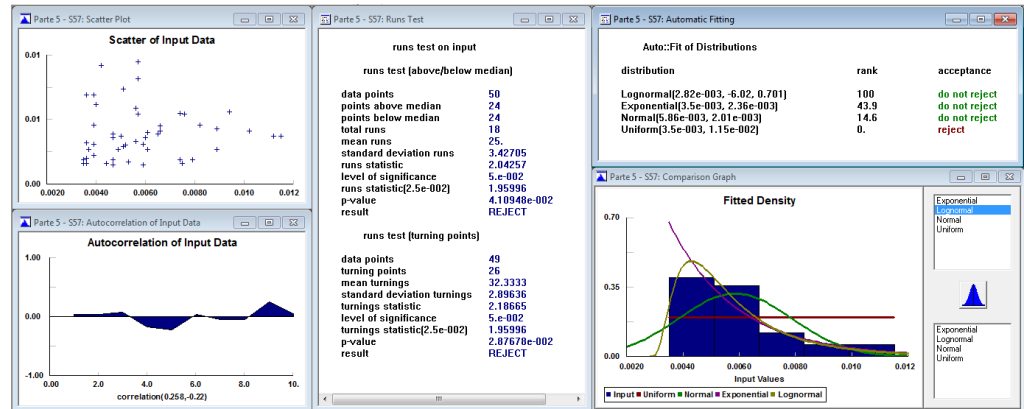


## Parte 5 – máquina S57

0.0044 0.0037 0.0039 0.0057 0.0066  
 0.0036 0.0047 0.0042 0.0115 0.0065  
 0.0089 0.0059 0.0112 0.0057 0.0059  
 0.0047 0.0035 0.0057 0.0102 0.0051  
 0.0039 0.0039 0.0074 0.0061 0.0094  
 0.0066 0.0051 0.0075 0.0047 0.0076  
 0.0061 0.0049 0.0036 0.0035 0.0074  
 0.006 0.0047 0.0036 0.0036 0.0039  
 0.0056 0.0056 0.0052 0.004 0.0089  
 0.0053 0.0079 0.005 0.0082 0.0063

Exponential  
 minimum = 3.5e-003  
 beta = 2.362e-003  
 Kolmogorov-Smirnov  
 data points 50  
 ks stat 0.118  
 alpha 5.e-002  
 ks stat(50.5.e-002) 0.188  
 p-value 0.451  
 result DO NOT REJECT  
 Anderson-Darling  
 data points 48  
 ad stat 0.836  
 alpha 5.e-002  
 ad stat(5.e-002) 2.49  
 p-value 0.456  
 result DO NOT REJECT  
 Lognormal  
 minimum = 2.82294e-003  
 mu = -6.02392  
 sigma = 0.701273  
 Kolmogorov-Smirnov  
 data points 50  
 ks stat 9.78e-002  
 alpha 5.e-002  
 ks stat(50.5.e-002) 0.188  
 p-value 0.689  
 result DO NOT REJECT  
 Anderson-Darling  
 data points 50  
 ad stat 0.567  
 alpha 5.e-002  
 ad stat(5.e-002) 2.49  
 p-value 0.68  
 result DO NOT REJECT

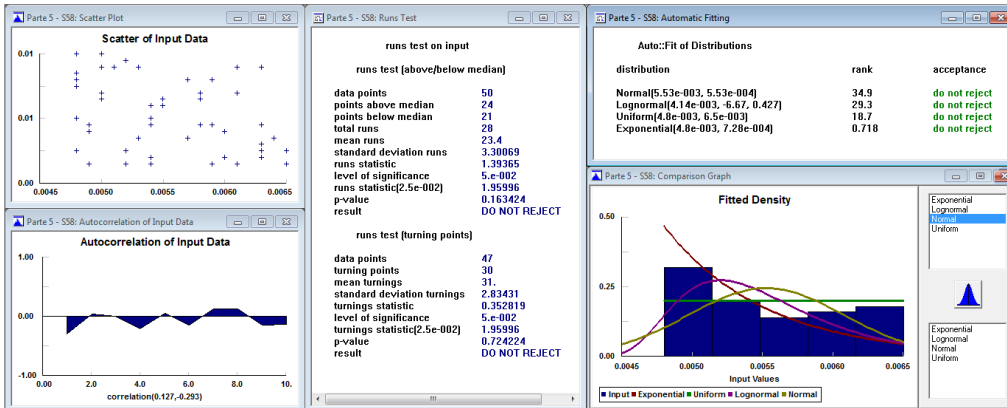
Normal  
 mean = 5.862e-003  
 sigma = 2.00608e-003  
 Kolmogorov-Smirnov  
 data points 50  
 ks stat 0.133  
 alpha 5.e-002  
 ks stat(50.5.e-002) 0.188  
 p-value 0.313  
 result DO NOT REJECT  
 Anderson-Darling  
 data points 50  
 ad stat 1.34  
 alpha 5.e-002  
 ad stat(5.e-002) 2.49  
 p-value 0.219  
 result DO NOT REJECT  
 Uniform  
 minimum = 3.5e-003  
 maximum = 1.15e-002  
 Kolmogorov-Smirnov  
 data points 50  
 ks stat 0.373  
 alpha 5.e-002  
 ks stat(50.5.e-002) 0.188  
 p-value 0.  
 result REJECT  
 Anderson-Darling  
 data points 47  
 ad stat 12.6  
 alpha 5.e-002  
 ad stat(5.e-002) 2.49  
 p-value 0.  
 result REJECT



## Parte 5 – máquina S58

0.0049 0.0049 0.0059 0.0054 0.0054  
 0.0053 0.0048 0.0048 0.0054 0.0057  
 0.0052 0.0065 0.006 0.0055 0.0061  
 0.0048 0.005 0.0049 0.0057 0.0048  
 0.006 0.0063 0.0048 0.0052 0.0055  
 0.0053 0.0063 0.005 0.0064 0.0058  
 0.0063 0.005 0.0059 0.0052 0.0059  
 0.0051 0.0065 0.0061 0.005 0.0054  
 0.0063 0.0048 0.0063 0.0058 0.0048  
 0.0054 0.0061 0.0049 0.0058 0.0062

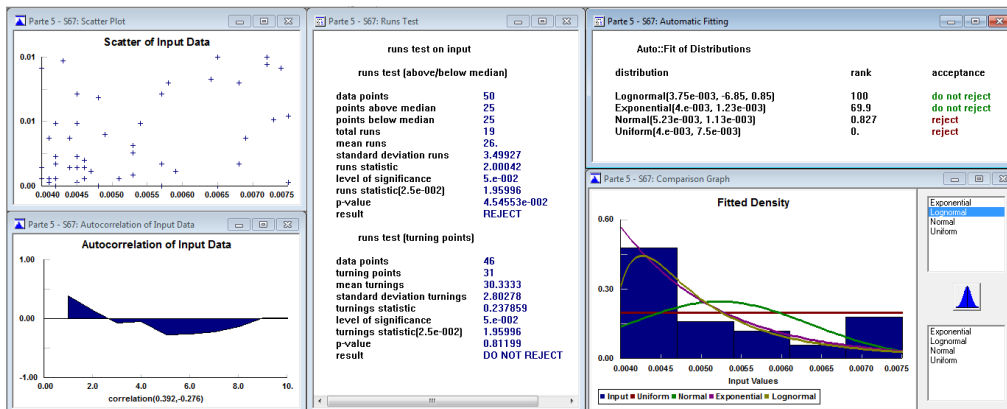
Exponential minimum = 4.8e-003 beta = 7.28e-004	Normal mean = 5.529e-003 sigma = 5.53187e-004
Kolmogorov-Smirnov data points 50 ks stat 0.15 alpha 5.e-002 ks sta[50,5.e-002] 0.188 p-value 0.193 result DO NOT REJECT	Kolmogorov-Smirnov data points 50 ks stat 0.13 alpha 5.e-002 ks sta[50,5.e-002] 0.188 p-value 0.337 result DO NOT REJECT
Anderson-Darling data points 43 ad stat 4. alpha 5.e-002 ad sta[5.e-002] 2.49 p-value 8.69e-003 result REJECT	Anderson-Darling data points 50 ad stat 1.27 alpha 5.e-002 ad sta[5.e-002] 2.49 p-value 0.242 result DO NOT REJECT
Lognormal minimum = 4.14244e-003 mu = -6.66859 sigma = 0.427114	Uniform minimum = 4.8e-003 maximum = 6.5e-003
Kolmogorov-Smirnov data points 50 ks stat 0.133 alpha 5.e-002 ks sta[50,5.e-002] 0.188 p-value 0.308 result DO NOT REJECT	Kolmogorov-Smirnov data points 50 ks stat 0.182 alpha 5.e-002 ks sta[50,5.e-002] 0.188 p-value 6.3e-002 result DO NOT REJECT
Anderson-Darling data points 50 ad stat 1.33 alpha 5.e-002 ad sta[5.e-002] 2.49 p-value 0.222 result DO NOT REJECT	Anderson-Darling data points 41 ad stat 5.e-002 alpha 5.e-002 ad sta[5.e-002] 2.49 p-value 0.655 result DO NOT REJECT



## Parte 5 – máquina S67

0.0045 0.0075 0.0059 0.0057 0.0043  
 0.0057 0.0041 0.0044 0.004 0.0074  
 0.0046 0.0041 0.0045 0.0042 0.0072  
 0.0047 0.0042 0.0045 0.0048 0.0073  
 0.004 0.0046 0.0048 0.004 0.0058  
 0.0053 0.0045 0.0064 0.0042 0.0068  
 0.0051 0.0065 0.0069 0.004 0.0068  
 0.0042 0.004 0.0053 0.0045 0.0046  
 0.0057 0.0072 0.0049 0.0041 0.0042  
 0.0065 0.0075 0.0054 0.0053 0.0042

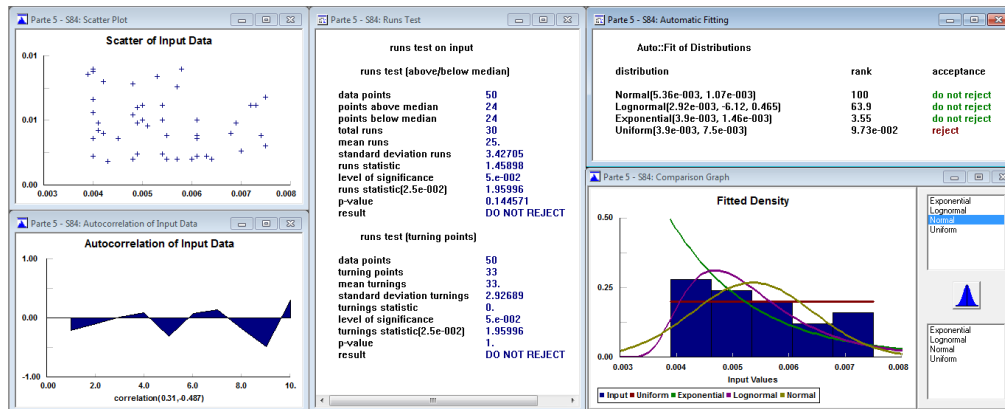
Exponential minimum = 4.e-003 beta = 1.226e-003	Normal mean = 5.226e-003 sigma = 1.13116e-003
Kolmogorov-Smirnov data points 50 ks stat 0.109 alpha 5.e-002 ks sta[50,5.e-002] 0.188 p-value 0.55 result DO NOT REJECT	Kolmogorov-Smirnov data points 50 ks stat 0.19 alpha 5.e-002 ks sta[50,5.e-002] 0.188 p-value 4.7e-002 result REJECT
Anderson-Darling data points 46 ad stat 1.02 alpha 5.e-002 ad sta[5.e-002] 2.49 p-value 0.349 result DO NOT REJECT	Anderson-Darling data points 50 ad stat 2.52 alpha 5.e-002 ad sta[5.e-002] 2.49 p-value 4.83e-002 result REJECT
Lognormal minimum = 3.75287e-003 mu = -6.85207 sigma = 0.850159	Uniform minimum = 4.e-003 maximum = 7.5e-003
Kolmogorov-Smirnov data points 50 ks stat 0.104 alpha 5.e-002 ks sta[50,5.e-002] 0.188 p-value 0.611 result DO NOT REJECT	Kolmogorov-Smirnov data points 50 ks stat 0.311 alpha 5.e-002 ks sta[50,5.e-002] 0.188 p-value 8.29e-005 result REJECT
Anderson-Darling data points 50 ad stat 0.846 alpha 5.e-002 ad sta[5.e-002] 2.49 p-value 0.449 result DO NOT REJECT	Anderson-Darling data points 44 ad stat 7.06 alpha 5.e-002 ad sta[5.e-002] 2.49 p-value 0. result REJECT



## Parte 5 – máquina S84

0.0057	0.0072	0.0054	0.0055	0.0064
0.004	0.0061	0.0042	0.004	0.004
0.0048	0.0055	0.007	0.0074	0.0075
0.0057	0.0049	0.0043	0.0049	0.0045
0.0068	0.0054	0.0039	0.0042	0.0048
0.005	0.0061	0.0073	0.005	0.004
0.0061	0.0049	0.0061	0.0055	0.0063
0.0041	0.006	0.0048	0.004	0.0041
0.0051	0.004	0.0069	0.0058	0.0051
0.0053	0.0041	0.0054	0.0075	0.0053

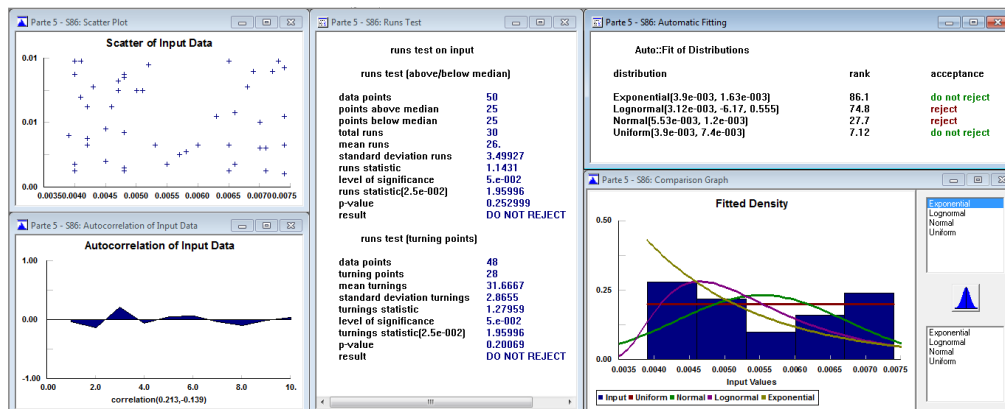
Exponential	minimum =	3.9e-003	Normal	mean =	5.350e-003
	beta =	1.458e-003		sigma =	1.06941e-003
Kolmogorov-Smirnov			Kolmogorov-Smirnov		
data points		50	data points		50
ks stat		0.181	ks stat		0.101
alpha		5.e-002	alpha		5.e-002
ks stat[50,5.e-002]		0.188	ks stat[50,5.e-002]		0.188
p-value		6.73e-002	p-value		0.655
result		DO NOT REJECT	result		DO NOT REJECT
Anderson-Darling			Anderson-Darling		
data points		49	data points		50
ad stat		1.63	ad stat		0.881
alpha		5.e-002	alpha		5.e-002
ad stat[5.e-002]		2.49	ad stat[5.e-002]		2.49
p-value		0.147	p-value		0.426
result		DO NOT REJECT	result		DO NOT REJECT
Lognormal			Uniform		
minimum	=	2.92064e-003	minimum	=	3.9e-003
mu	=	-6.11973	maximum	=	7.5e-003
sigma	=	0.464921	Kolmogorov-Smirnov		
Kolmogorov-Smirnov			data points		50
data points		50	ks stat		0.196
ks stat		0.118	alpha		5.e-002
alpha		5.e-002	ks stat[50,5.e-002]		0.188
ks stat[50,5.e-002]		0.188	p-value		3.77e-002
p-value		0.455	result		REJECT
result		DO NOT REJECT	Anderson-Darling		
Anderson-Darling			data points		47
data points		50	ad stat		4.17
ad stat		0.936	alpha		5.e-002
alpha		5.e-002	ad stat[5.e-002]		2.49
ad stat[5.e-002]		2.49	p-value		7.21e-003
p-value		0.393	result		REJECT
result		DO NOT REJECT			



## Parte 5 – máquina S86

0.0041	0.004	0.0042	0.0065	0.0043
0.0074	0.0074	0.005	0.0074	0.0066
0.0048	0.0039	0.0065	0.0057	0.0058
0.004	0.0051	0.0048	0.0045	0.0046
0.004	0.0065	0.0052	0.0053	0.006
0.0042	0.004	0.0073	0.0048	0.0048
0.0048	0.007	0.0074	0.0041	0.007
0.0069	0.0047	0.0072	0.0063	0.0055
0.0071	0.0068	0.0071	0.0057	0.0042
0.004	0.0066	0.0047	0.0045	0.006

Exponential	minimum =	3.9e-003	Normal	mean =	5.526e-003
	beta =	1.626e-003		sigma =	1.1980e-003
Kolmogorov-Smirnov			Kolmogorov-Smirnov		
data points		50	data points		50
ks stat		0.138	ks stat		0.168
alpha		5.e-002	alpha		5.e-002
ks stat[50,5.e-002]		0.188	ks stat[50,5.e-002]		0.188
p-value		0.272	p-value		0.187
result		DO NOT REJECT	result		DO NOT REJECT
Anderson-Darling			Anderson-Darling		
data points		49	data points		50
ad stat		1.54	ad stat		1.69
alpha		5.e-002	alpha		5.e-002
ad stat[5.e-002]		2.49	ad stat[5.e-002]		2.49
p-value		0.167	p-value		0.137
result		DO NOT REJECT	result		DO NOT REJECT
Lognormal			Uniform		
minimum	=	3.12142e-003	minimum	=	3.9e-003
mu	=	-6.17321	maximum	=	7.4e-003
sigma	=	0.555064	Kolmogorov-Smirnov		
Kolmogorov-Smirnov			data points		50
data points		50	ks stat		0.183
ks stat		0.148	alpha		5.e-002
alpha		5.e-002	ks stat[50,5.e-002]		0.188
ks stat[50,5.e-002]		0.188	p-value		6.18e-002
p-value		0.293	result		DO NOT REJECT
result		DO NOT REJECT	Anderson-Darling		
Anderson-Darling			data points		45
data points		50	ad stat		2.33
ad stat		1.43	alpha		5.e-002
alpha		5.e-002	ad stat[5.e-002]		2.49
ad stat[5.e-002]		2.49	p-value		6.00e-002
p-value		0.194	result		DO NOT REJECT
result		DO NOT REJECT			

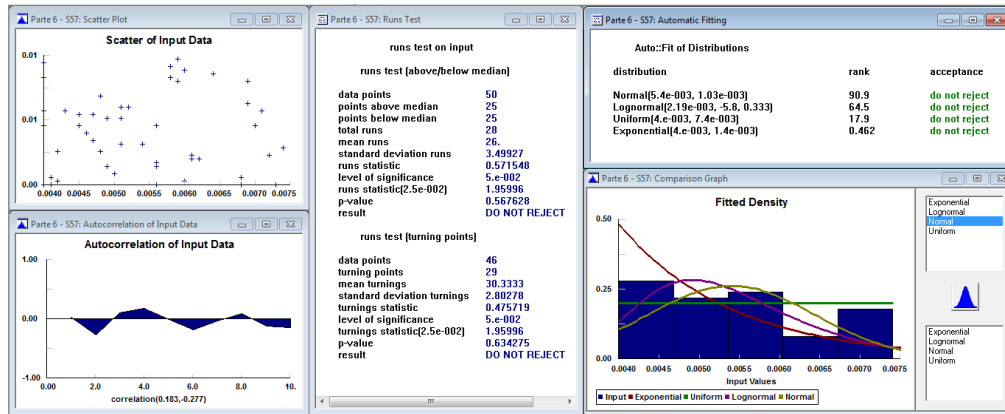




## Parte 6 – máquina S57

0.0051	0.0045	0.0068	0.0049	0.0069
0.0061	0.0056	0.004	0.0058	0.0062
0.0047	0.004	0.0056	0.0069	0.0047
0.0052	0.004	0.0046	0.0068	0.0059
0.0061	0.006	0.0054	0.0042	0.0074
0.0048	0.0041	0.0051	0.0041	0.005
0.0064	0.0042	0.0051	0.004	0.0043
0.007	0.0049	0.0058	0.0073	0.006
0.0056	0.0045	0.0072	0.004	0.0071
0.0056	0.0059	0.0048	0.004	0.006

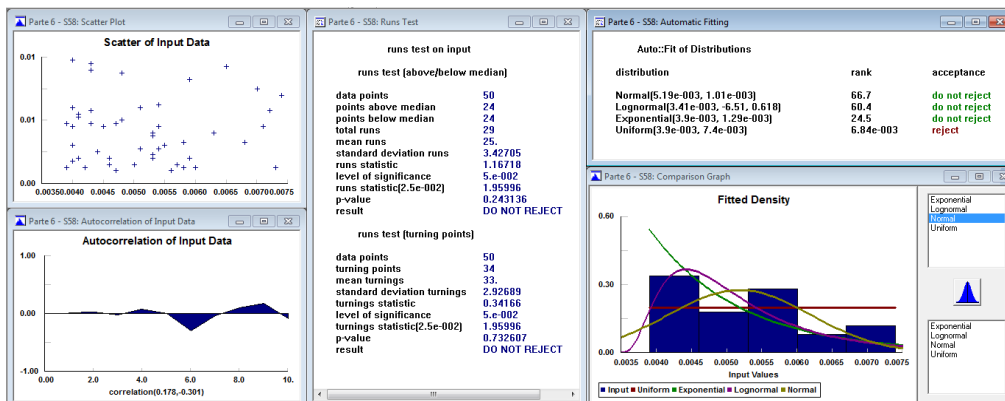
Exponential	Normal
minimum = 4.e-003	mean = 5.404e-003
beta = 1.404e-003	sigma = 1.03498e-003
Kolmogorov-Smirnov	Kolmogorov-Smirnov
data points 50	data points 50
ks stat 0.16	ks stat 0.162
alpha 5.e-002	alpha 5.e-002
ks stat[50,5.e-002] 0.188	ks stat[50,5.e-002] 0.188
p-value 0.138	p-value 0.188
result DO NOT REJECT	result DO NOT REJECT
Anderson-Darling	Anderson-Darling
data points 44	data points 50
ad stat 3.69	ad stat 0.815
alpha 5.e-002	alpha 5.e-002
ad stat[5.e-002] 2.49	ad stat[5.e-002] 2.49
p-value 1.24e-002	p-value 0.47
result REJECT	result DO NOT REJECT
Lognormal	Uniform
minimum = 2.19404e-003	minimum = 4.e-003
mu = -5.79548	maximum = 7.4e-003
sigma = 0.332741	Kolmogorov-Smirnov
Kolmogorov-Smirnov	data points 50
data points 50	ks stat 0.162
ks stat 0.113	alpha 5.e-002
alpha 5.e-002	ks stat[50,5.e-002] 0.188
ks stat[50,5.e-002] 0.188	p-value 0.128
p-value 0.507	result DO NOT REJECT
result DO NOT REJECT	Anderson-Darling
Anderson-Darling	data points 43
data points 50	ad stat 0.751
ad stat 0.814	alpha 5.e-002
alpha 5.e-002	ad stat[5.e-002] 2.49
ad stat[5.e-002] 2.49	p-value 0.518
p-value 0.471	result DO NOT REJECT
result DO NOT REJECT	



## Parte 6 – máquina S58

0.0063	0.004	0.0043	0.0053	0.0065
0.0051	0.0053	0.0071	0.005	0.0072
0.0046	0.0043	0.0053	0.0041	0.0058
0.0041	0.0073	0.0044	0.0043	0.0048
0.0057	0.004	0.0045	0.0058	0.0055
0.0041	0.0042	0.0053	0.004	0.0047
0.0056	0.004	0.0051	0.0059	0.0039
0.0039	0.0047	0.0059	0.0068	0.004
0.0054	0.0054	0.0043	0.0048	0.0074
0.006	0.0046	0.0054	0.007	0.0063

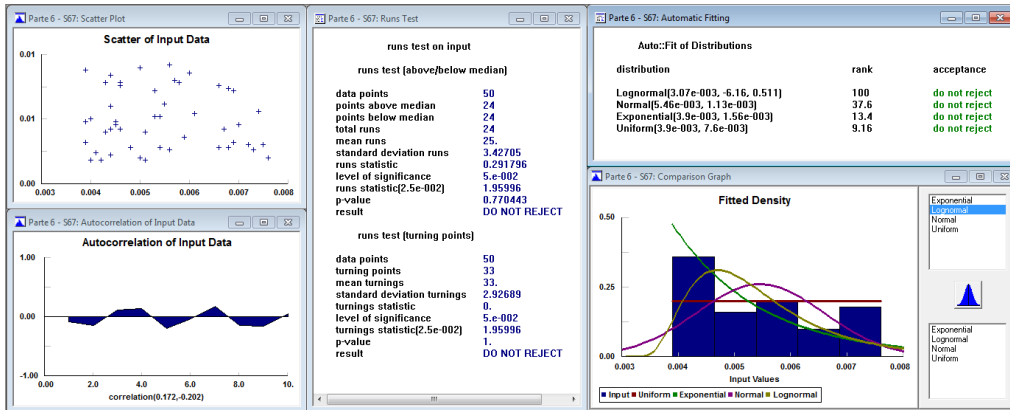
Exponential	Normal
minimum = 3.9e-003	mean = 5.186e-003
beta = 1.286e-003	sigma = 1.00936e-003
Kolmogorov-Smirnov	Kolmogorov-Smirnov
data points 50	data points 50
ks stat 0.143	ks stat 0.11
alpha 5.e-002	alpha 5.e-002
ks stat[50,5.e-002] 0.188	ks stat[50,5.e-002] 0.188
p-value 0.233	p-value 0.544
result DO NOT REJECT	result DO NOT REJECT
Anderson-Darling	Anderson-Darling
data points 48	data points 50
ad stat 1.17	ad stat 1.07
alpha 5.e-002	alpha 5.e-002
ad stat[5.e-002] 2.49	ad stat[5.e-002] 2.49
p-value 0.279	p-value 0.324
result DO NOT REJECT	result DO NOT REJECT
Lognormal	Uniform
minimum = 3.40876e-003	minimum = 3.9e-003
mu = -6.51006	maximum = 7.4e-003
sigma = 0.617592	Kolmogorov-Smirnov
Kolmogorov-Smirnov	data points 50
data points 50	ks stat 0.231
ks stat 0.131	alpha 5.e-002
alpha 5.e-002	ks stat[50,5.e-002] 0.188
ks stat[50,5.e-002] 0.188	p-value 7.75e-003
p-value 0.329	result REJECT
result DO NOT REJECT	Anderson-Darling
Anderson-Darling	data points 47
data points 50	ad stat 5.19
ad stat 0.793	alpha 5.e-002
alpha 5.e-002	ad stat[5.e-002] 2.49
ad stat[5.e-002] 2.49	p-value 2.34e-003
p-value 0.486	result REJECT
result DO NOT REJECT	



## Parte 6 – máquina S67

0.0059	0.0044	0.0046	0.0076	0.0067
0.0048	0.0072	0.0051	0.004	0.0051
0.0044	0.0045	0.005	0.0039	0.0039
0.006	0.0053	0.004	0.0074	0.0054
0.0073	0.0066	0.0055	0.0058	0.0056
0.0043	0.0068	0.0061	0.0069	0.0043
0.005	0.0044	0.0057	0.0046	0.0069
0.0075	0.0041	0.007	0.0069	0.0066
0.0045	0.0042	0.0053	0.0046	0.0044
0.0054	0.0039	0.0056	0.0068	0.0051

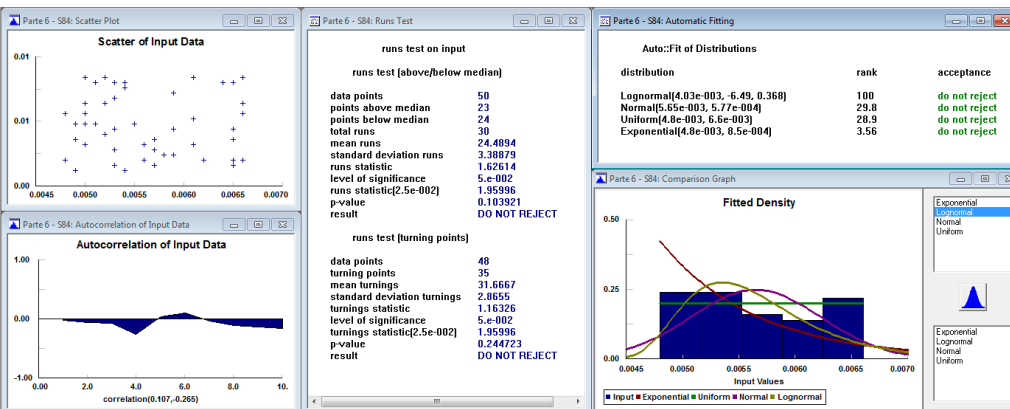
Exponential	=	3.9e-003	Normal	=	5.458e-003
minimum	=	1.558e-003	mean	=	1.1305e-003
beta	=		sigma	=	
Kolmogorov-Smirnov			Kolmogorov-Smirnov		
data points	=	50	data points	=	50
ks stat	=	0.126	ks stat	=	0.136
alpha	=	5.e-002	alpha	=	5.e-002
ks stat(50,5.e-002)	=	0.188	ks stat(50,5.e-002)	=	0.188
p-value	=	0.37	p-value	=	0.286
result	=	DO NOT REJECT	result	=	DO NOT REJECT
Anderson-Darling			Anderson-Darling		
data points	=	47	data points	=	50
ad stat	=	2.19	ad stat	=	1.22
alpha	=	5.e-002	alpha	=	5.e-002
ad stat(5.e-002)	=	2.49	ad stat(5.e-002)	=	2.49
p-value	=	7.2e-002	p-value	=	0.261
result	=	DO NOT REJECT	result	=	DO NOT REJECT
Lognormal			Uniform		
minimum	=	3.07073e-003	minimum	=	3.9e-003
mu	=	-6.16049	maximum	=	7.6e-003
sigma	=	0.510655	Kolmogorov-Smirnov		
Kolmogorov-Smirnov			data points	=	50
data points	=	50	ks stat	=	0.171
ks stat	=	0.123	alpha	=	5.e-002
alpha	=	5.e-002	ks stat(50,5.e-002)	=	0.188
ks stat(50,5.e-002)	=	0.188	p-value	=	9.58e-002
p-value	=	0.405	result	=	DO NOT REJECT
result	=	DO NOT REJECT	Anderson-Darling		
Anderson-Darling			data points	=	46
data points	=	50	ad stat	=	1.45
ad stat	=	0.788	alpha	=	5.e-002
alpha	=	5.e-002	ad stat(5.e-002)	=	2.49
ad stat(5.e-002)	=	2.49	p-value	=	0.189
p-value	=	0.49	result	=	DO NOT REJECT
result	=	DO NOT REJECT			



## Parte 6 – máquina S84

0.0053	0.0053	0.0049	0.0061	0.0052
0.0049	0.0062	0.0048	0.0066	0.0055
0.0057	0.005	0.0059	0.005	0.0057
0.0049	0.0059	0.0051	0.0061	0.0054
0.0054	0.0056	0.0065	0.0053	0.0048
0.0064	0.0053	0.0056	0.0052	0.005
0.0065	0.0065	0.005	0.0061	0.0066
0.005	0.0054	0.0057	0.0058	0.0066
0.0053	0.0065	0.0052	0.0051	0.0059
0.0056	0.0065	0.0066	0.0057	0.0063

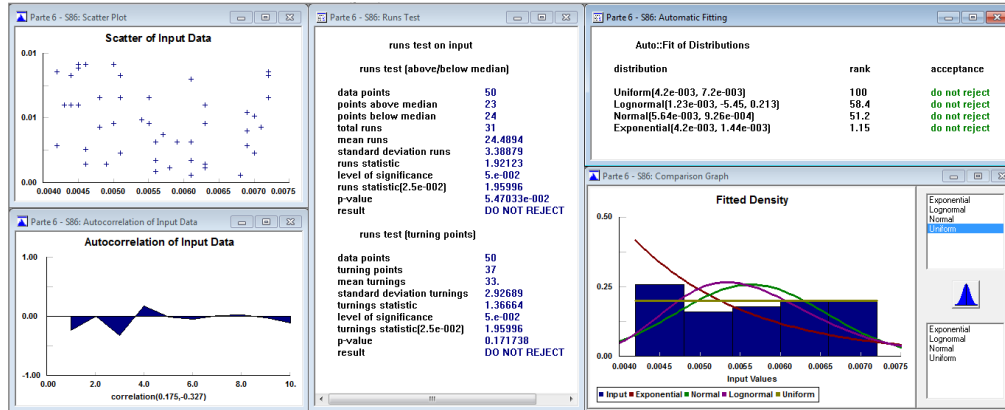
Exponential	=	4.8e-003	Normal	=	5.65e-003
minimum	=	8.5e-004	mean	=	5.76628e-004
beta	=		sigma	=	
Kolmogorov-Smirnov			Kolmogorov-Smirnov		
data points	=	50	data points	=	50
ks stat	=	0.145	ks stat	=	0.128
alpha	=	5.e-002	alpha	=	5.e-002
ks stat(50,5.e-002)	=	0.188	ks stat(50,5.e-002)	=	0.188
p-value	=	0.223	p-value	=	0.355
result	=	DO NOT REJECT	result	=	DO NOT REJECT
Anderson-Darling			Anderson-Darling		
data points	=	48	data points	=	50
ad stat	=	2.51	ad stat	=	1.22
alpha	=	5.e-002	alpha	=	5.e-002
ad stat(5.e-002)	=	2.49	ad stat(5.e-002)	=	2.49
p-value	=	4.9e-002	p-value	=	0.258
result	=	REJECT	result	=	DO NOT REJECT
Lognormal			Uniform		
minimum	=	4.02983e-003	minimum	=	4.8e-003
mu	=	-6.49107	maximum	=	6.6e-003
sigma	=	0.367597	Kolmogorov-Smirnov		
Kolmogorov-Smirnov			data points	=	50
data points	=	50	ks stat	=	0.127
ks stat	=	0.101	alpha	=	5.e-002
alpha	=	5.e-002	ks stat(50,5.e-002)	=	0.188
ks stat(50,5.e-002)	=	0.188	p-value	=	0.368
p-value	=	0.640	result	=	DO NOT REJECT
result	=	DO NOT REJECT	Anderson-Darling		
Anderson-Darling			data points	=	44
data points	=	50	ad stat	=	1.27
ad stat	=	0.81	alpha	=	5.e-002
alpha	=	5.e-002	ad stat(5.e-002)	=	2.49
ad stat(5.e-002)	=	2.49	p-value	=	0.241
p-value	=	0.474	result	=	DO NOT REJECT
result	=	DO NOT REJECT			



## Parte 6 – máquina S86

0.0051	0.0061	0.0072	0.0072	0.0049
0.0063	0.0042	0.0069	0.0063	0.0045
0.0045	0.007	0.0059	0.0056	0.0072
0.0071	0.0048	0.0051	0.0043	0.007
0.0055	0.0055	0.0063	0.0061	0.0058
0.0056	0.0063	0.0061	0.0051	0.0044
0.0051	0.0061	0.0046	0.0069	0.0069
0.0048	0.0068	0.0045	0.005	0.0054
0.0063	0.0042	0.0061	0.0056	0.0057
0.0044	0.005	0.0046	0.0046	0.0053

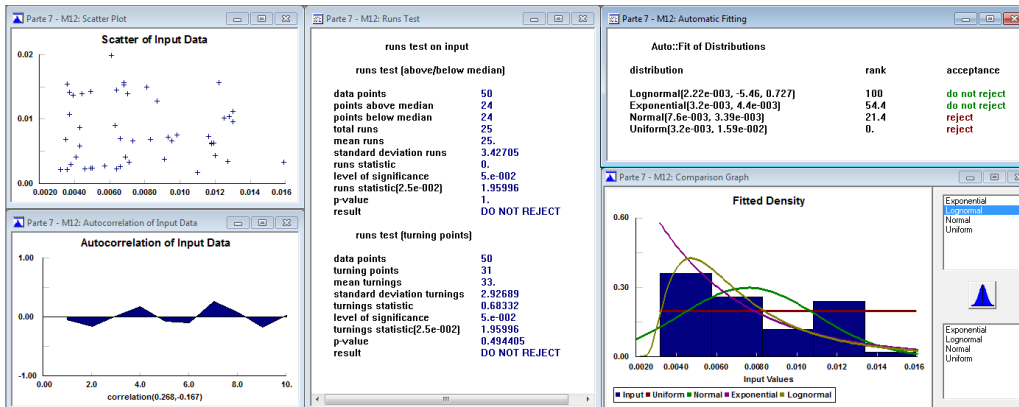
Exponential	=	4.2e-003	Normal	=	5.636e-003
minimum	=	1.436e-003	mean	=	9.26231e-004
beta	=		sigma	=	
Kolmogorov-Smirnov			Kolmogorov-Smirnov		
data points		50	data points		50
ks stat		0.156	ks stat		0.119
alpha		5.e-002	alpha		5.e-002
ks stat[50,5.e-002]		0.188	ks stat[50,5.e-002]		0.188
p-value		0.16	p-value		0.448
result		DO NOT REJECT	result		DO NOT REJECT
Anderson-Darling			Anderson-Darling		
data points		48	data points		50
ad stat		2.96	ad stat		0.839
alpha		5.e-002	alpha		5.e-002
ad stat[5.e-002]		2.49	ad stat[5.e-002]		2.49
p-value		2.86e-002	p-value		0.454
result		REJECT	result		DO NOT REJECT
Lognormal			Uniform		
minimum	=	1.23181e-003	minimum	=	4.2e-003
mu	=	-5.44767	maximum	=	7.2e-003
sigma	=	0.213111	Kolmogorov-Smirnov		
Kolmogorov-Smirnov			data points		50
data points		50	ks stat		1.e-001
ks stat		0.118	alpha		5.e-002
alpha		5.e-002	ks stat[50,5.e-002]		0.188
ks stat[50,5.e-002]		0.188	p-value		0.862
p-value		0.46	result		DO NOT REJECT
result		DO NOT REJECT	Anderson-Darling		
Anderson-Darling			data points		45
data points		50	ad stat		0.652
ad stat		0.768	alpha		5.e-002
alpha		5.e-002	ad stat[5.e-002]		2.49
ad stat[5.e-002]		2.49	p-value		0.6
p-value		0.505	result		DO NOT REJECT
result		DO NOT REJECT			



## Parte 7 – máquina M12

0.0057	0.0091	0.0127	0.0049	0.0119
0.0039	0.0046	0.0044	0.0037	0.0064
0.0116	0.0036	0.0118	0.0095	0.0036
0.0071	0.0128	0.0064	0.0066	0.0035
0.0043	0.0093	0.0122	0.0038	0.0068
0.0061	0.007	0.013	0.0041	0.013
0.0159	0.0118	0.0098	0.0049	0.0087
0.0043	0.0063	0.0073	0.012	0.011
0.0081	0.0083	0.0066	0.005	0.0032
0.0125	0.0068	0.0069	0.0037	0.0035

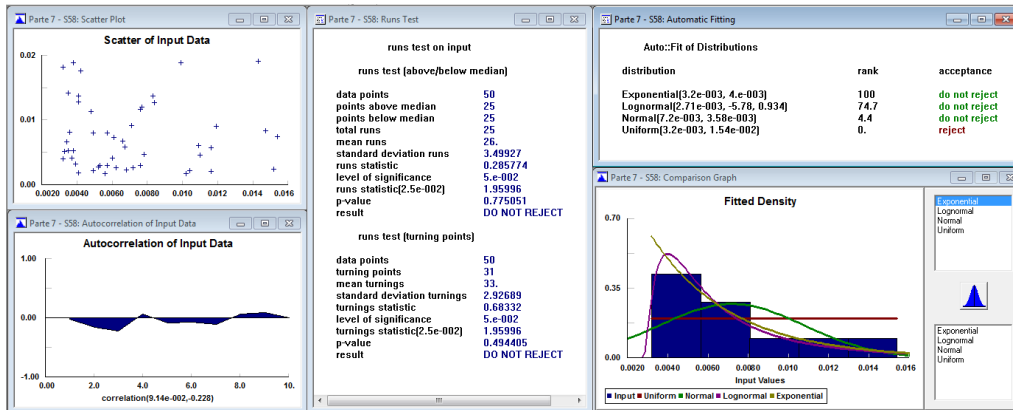
Exponential	=	3.2e-003	Normal	=	7.6e-003
minimum	=	4.4e-003	mean	=	3.39026e-003
beta	=		sigma	=	
Kolmogorov-Smirnov			Kolmogorov-Smirnov		
data points		50	data points		50
ks stat		0.126	ks stat		0.139
alpha		5.e-002	alpha		5.e-002
ks stat[50,5.e-002]		0.188	ks stat[50,5.e-002]		0.188
p-value		0.377	p-value		0.266
result		DO NOT REJECT	result		DO NOT REJECT
Anderson-Darling			Anderson-Darling		
data points		49	data points		50
ad stat		1.08	ad stat		1.5
alpha		5.e-002	alpha		5.e-002
ad stat[5.e-002]		2.49	ad stat[5.e-002]		2.49
p-value		0.317	p-value		0.176
result		DO NOT REJECT	result		DO NOT REJECT
Lognormal			Uniform		
minimum	=	2.21615e-003	minimum	=	3.2e-003
mu	=	-5.45991	maximum	=	1.59e-002
sigma	=	0.72674	Kolmogorov-Smirnov		
Kolmogorov-Smirnov			data points		50
data points		50	ks stat		0.277
ks stat		0.102	alpha		5.e-002
alpha		5.e-002	ks stat[50,5.e-002]		0.188
ks stat[50,5.e-002]		0.188	p-value		6.9e-004
p-value		0.64	result		REJECT
result		DO NOT REJECT	Anderson-Darling		
Anderson-Darling			data points		48
data points		50	ad stat		7.93
ad stat		1.03	alpha		5.e-002
alpha		5.e-002	ad stat[5.e-002]		2.49
ad stat[5.e-002]		2.49	p-value		0
p-value		0.343	result		REJECT
result		DO NOT REJECT			



## Parte 7 – máquina S58

0.0068	0.0042	0.0066	0.0049	0.0147
0.0036	0.0143	0.0067	0.0035	0.0078
0.0077	0.0154	0.0061	0.0119	0.0053
0.0104	0.0072	0.0071	0.0083	0.0041
0.0035	0.0038	0.0084	0.0116	0.0033
0.0057	0.0057	0.0109	0.006	0.0056
0.0041	0.0076	0.0062	0.0049	0.0032
0.011	0.0041	0.0038	0.0076	0.0048
0.0052	0.0116	0.0152	0.0102	0.0099
0.0039	0.0034	0.0037	0.0032	0.0152

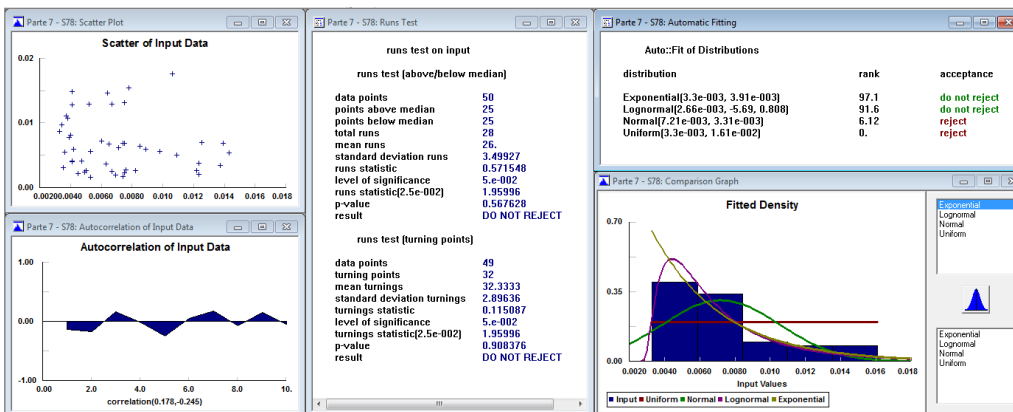
Exponential	minimum =	3.2e-003	Normal	mean =	7.198e-003
	beta =	3.996e-003		sigma =	3.58461e-003
Kolmogorov-Smirnov			Kolmogorov-Smirnov		
data points		50	data points		50
ks stat		7.87e-002	ks stat		0.133
alpha		5.e-002	alpha		5.e-002
ks stat[50,5.e-002]		0.188	ks stat[50,5.e-002]		0.188
p-value		0.892	p-value		0.809
result		DO NOT REJECT	result		DO NOT REJECT
Anderson-Darling			Anderson-Darling		
data points		48	data points		50
ad stat		0.44	ad stat		1.91
alpha		5.e-002	alpha		5.e-002
ad stat[5.e-002]		2.49	ad stat[5.e-002]		2.49
p-value		0.808	p-value		2.49
result		DO NOT REJECT	result		DO NOT REJECT
Lognormal			Uniform		
minimum =		2.71096e-003	minimum =		3.2e-003
mu =		-5.78325	maximum =		1.54e-002
sigma =		0.934343	Kolmogorov-Smirnov		
Kolmogorov-Smirnov			data points		50
data points		50	ks stat		0.323
ks stat		8.20e-002	alpha		5.e-002
alpha		5.e-002	ks stat[50,5.e-002]		0.188
ks stat[50,5.e-002]		0.188	p-value		3.8e-005
p-value		0.854	result		REJECT
result		DO NOT REJECT	Anderson-Darling		
Anderson-Darling			data points		47
data points		50	ad stat		9.47
ad stat		0.618	alpha		5.e-002
alpha		5.e-002	ad stat[5.e-002]		2.49
ad stat[5.e-002]		2.49	p-value		0.
p-value		0.631	result		REJECT
result		DO NOT REJECT			



## Parte 7 – máquina S78

0.0041	0.0137	0.0035	0.0082	0.0074
0.0139	0.0047	0.0045	0.0041	0.0034
0.0075	0.0053	0.0037	0.0052	0.0098
0.0125	0.0033	0.0109	0.0123	0.0065
0.0076	0.0089	0.006	0.005	0.0074
0.0042	0.0067	0.0078	0.0041	0.0075
0.0067	0.004	0.0143	0.0122	0.0075
0.0123	0.0085	0.0063	0.0041	0.0038
0.0036	0.0071	0.0049	0.0053	0.0106
0.0064	0.0069	0.0039	0.0065	0.0161

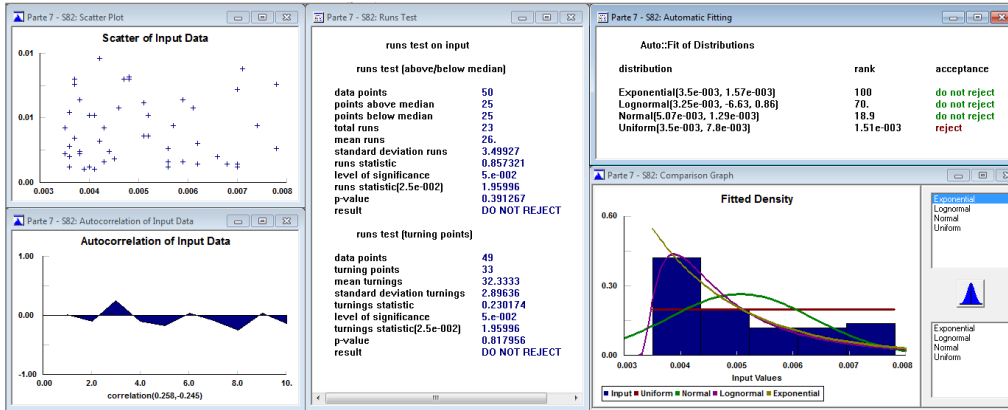
Exponential	minimum =	3.3e-003	Normal	mean =	7.214e-003
	beta =	3.914e-003		sigma =	3.31168e-003
Kolmogorov-Smirnov			Kolmogorov-Smirnov		
data points		50	data points		50
ks stat		0.115	ks stat		0.154
alpha		5.e-002	alpha		5.e-002
ks stat[50,5.e-002]		0.188	ks stat[50,5.e-002]		0.188
p-value		0.483	p-value		0.17
result		DO NOT REJECT	result		DO NOT REJECT
Anderson-Darling			Anderson-Darling		
data points		49	data points		50
ad stat		0.566	ad stat		1.78
alpha		5.e-002	alpha		5.e-002
ad stat[5.e-002]		2.49	ad stat[5.e-002]		2.49
p-value		0.681	p-value		0.122
result		DO NOT REJECT	result		DO NOT REJECT
Lognormal			Uniform		
minimum =		2.661e-003	minimum =		3.3e-003
mu =		-5.68511	maximum =		1.61e-002
sigma =		0.807988	Kolmogorov-Smirnov		
Kolmogorov-Smirnov			data points		50
data points		50	ks stat		0.368
ks stat		0.114	alpha		5.e-002
alpha		5.e-002	ks stat[50,5.e-002]		0.188
ks stat[50,5.e-002]		0.188	p-value		6.51e-007
p-value		0.498	result		REJECT
result		DO NOT REJECT	Anderson-Darling		
Anderson-Darling			data points		48
data points		50	ad stat		12.4
ad stat		0.626	alpha		5.e-002
alpha		5.e-002	ad stat[5.e-002]		2.49
ad stat[5.e-002]		2.49	p-value		0.
p-value		0.623	result		REJECT
result		DO NOT REJECT			



## Parte 7 – máquina S82

0.0078	0.0056	0.0043	0.0036	0.007
0.0043	0.0038	0.0038	0.0044	0.0066
0.0051	0.0041	0.0062	0.0042	0.004
0.0061	0.0035	0.0037	0.0046	0.0036
0.0059	0.0051	0.0047	0.0059	0.0057
0.0062	0.0048	0.007	0.0038	0.0052
0.0045	0.0071	0.0036	0.0042	0.0048
0.0039	0.0074	0.004	0.0078	0.007
0.0035	0.0052	0.0056	0.0068	0.0037
0.0041	0.0056	0.0036	0.0037	0.0068

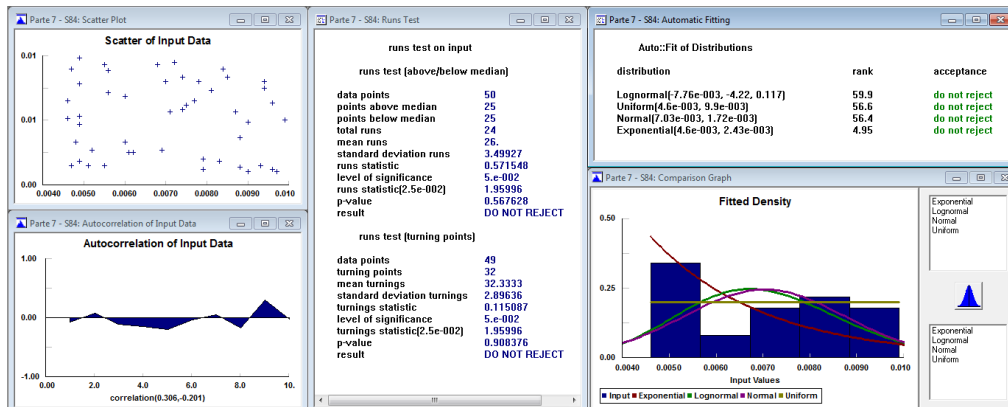
Exponential	Normal	Lognormal	Uniform
minimum = 3.5e-003	mean = 5.07e-003	minimum = 3.25346e-003	minimum = 3.5e-003
beta = 1.57e-003	sigma = 1.29449e-003	mu = -6.62937	maximum = 7.8e-003
Kolmogorov-Smirnov	Kolmogorov-Smirnov	Kolmogorov-Smirnov	Kolmogorov-Smirnov
data points = 50	data points = 50	data points = 50	data points = 50
ks stat = 0.118	ks stat = 0.144	ks stat = 0.128	ks stat = 0.230
alpha = 5.e-002	alpha = 5.e-002	alpha = 5.e-002	alpha = 5.e-002
ks stat[50,5.e-002] = 0.188	ks stat[50,5.e-002] = 0.188	ks stat[50,5.e-002] = 0.188	ks stat[50,5.e-002] = 0.188
p-value = 0.46	p-value = 0.228	p-value = 0.355	p-value = 5.72e-003
result = DO NOT REJECT	result = DO NOT REJECT	result = DO NOT REJECT	result = REJECT
Anderson-Darling	Anderson-Darling	Anderson-Darling	Anderson-Darling
data points = 48	data points = 50	data points = 50	data points = 46
ad stat = 0.864	ad stat = 1.54	ad stat = 0.929	ad stat = 6.55
alpha = 5.e-002	alpha = 5.e-002	alpha = 5.e-002	alpha = 5.e-002
ad stat[5.e-002] = 2.49	ad stat[5.e-002] = 2.49	ad stat[5.e-002] = 2.49	ad stat[5.e-002] = 2.49
p-value = 0.437	p-value = 0.166	p-value = 0.397	p-value = 5.29e-004
result = DO NOT REJECT	result = DO NOT REJECT	result = DO NOT REJECT	result = REJECT



## Parte 7 – máquina S84

0.0061	0.0094	0.0072	0.0087	0.007
0.0055	0.0085	0.0097	0.0074	0.0088
0.0096	0.009	0.0046	0.0075	0.0062
0.0078	0.0069	0.0071	0.0077	0.0055
0.0088	0.0056	0.0074	0.0079	0.0049
0.0048	0.0083	0.009	0.0052	0.0068
0.006	0.0051	0.0046	0.0056	0.0096
0.006	0.0049	0.0079	0.0093	0.0047
0.0081	0.0051	0.0047	0.0049	0.0094
0.0084	0.0049	0.0049	0.0099	0.0088

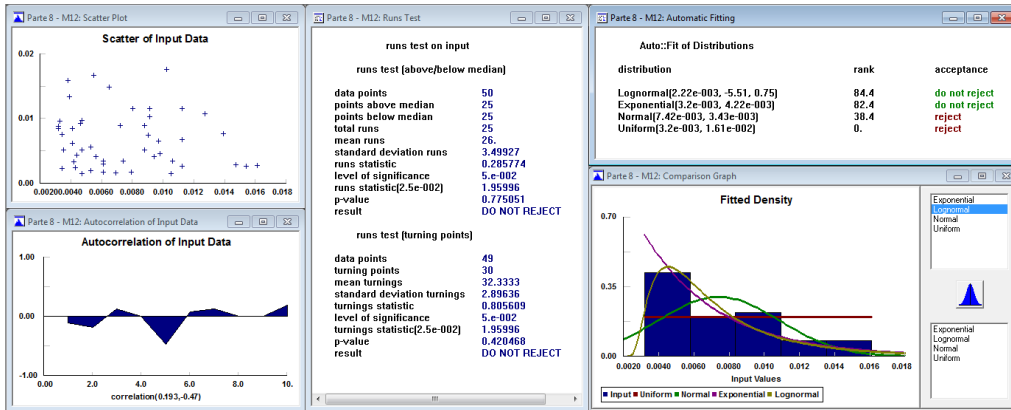
Exponential	Normal	Lognormal	Uniform
minimum = 4.6e-003	mean = 7.034e-003	minimum = -7.7614e-003	minimum = 4.6e-003
beta = 2.434e-003	sigma = 1.72298e-003	mu = -4.22027	maximum = 9.9e-003
Kolmogorov-Smirnov	Kolmogorov-Smirnov	Kolmogorov-Smirnov	Kolmogorov-Smirnov
data points = 50	data points = 50	data points = 50	data points = 50
ks stat = 0.175	ks stat = 0.137	ks stat = 0.132	ks stat = 0.151
alpha = 5.e-002	alpha = 5.e-002	alpha = 5.e-002	alpha = 5.e-002
ks stat[50,5.e-002] = 0.188	ks stat[50,5.e-002] = 0.188	ks stat[50,5.e-002] = 0.188	ks stat[50,5.e-002] = 0.188
p-value = 0.26e-002	p-value = 0.276	p-value = 0.323	p-value = 0.183
result = DO NOT REJECT	result = DO NOT REJECT	result = DO NOT REJECT	result = DO NOT REJECT
Anderson-Darling	Anderson-Darling	Anderson-Darling	Anderson-Darling
data points = 48	data points = 50	data points = 50	data points = 47
ad stat = 2.3	ad stat = 1.35	ad stat = 1.42	ad stat = 1.06
alpha = 5.e-002	alpha = 5.e-002	alpha = 5.e-002	alpha = 5.e-002
ad stat[5.e-002] = 2.49	ad stat[5.e-002] = 2.49	ad stat[5.e-002] = 2.49	ad stat[5.e-002] = 2.49
p-value = 6.33e-002	p-value = 0.216	p-value = 0.196	p-value = 0.327
result = DO NOT REJECT	result = DO NOT REJECT	result = DO NOT REJECT	result = DO NOT REJECT



## Parte 8 – máquina M12

0.0105 0.0061 0.0127 0.0154 0.0091  
 0.0032 0.0047 0.0106 0.0041 0.0102  
 0.0088 0.0032 0.0047 0.0088 0.0161  
 0.0061 0.009 0.0098 0.0091 0.0042  
 0.0034 0.0079 0.0056 0.0112 0.0046  
 0.008 0.0034 0.0053 0.0041 0.0094  
 0.0112 0.0038 0.0035 0.0069 0.0053  
 0.0112 0.0147 0.0061 0.0033 0.0065  
 0.0074 0.0043 0.0044 0.0097 0.0139  
 0.0047 0.0039 0.0055 0.0072 0.0081

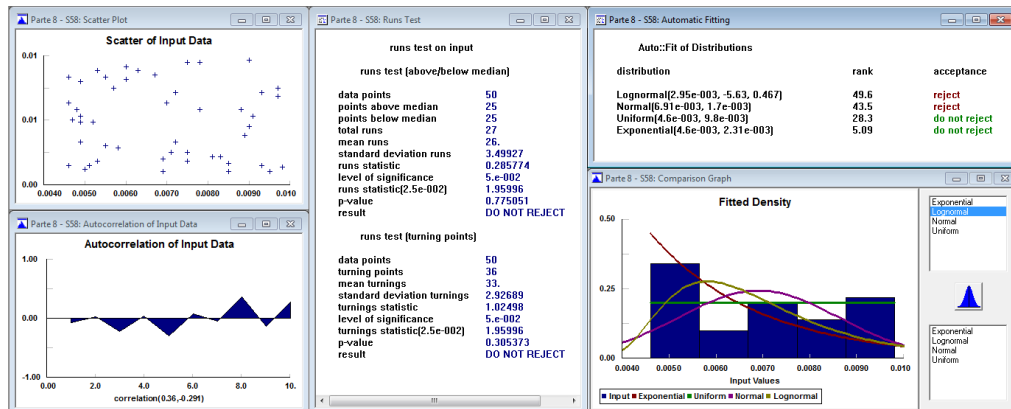
<p>Exponential                  minimum = 3.2e-003                  beta = 4.218e-003                  Kolmogorov-Smirnov                  data points 50                  ks stat 0.115                  alpha 5.e-002                  ks stat(50,5.e-002) 0.188                  p-value 0.488                  result DO NOT REJECT</p> <p>Anderson-Darling                  data points 48                  ad stat 0.856                  alpha 5.e-002                  ad stat(5.e-002) 2.49                  p-value 0.442                  result DO NOT REJECT</p> <p>Lognormal                  minimum = 2.228e-003                  mu = -5.5114                  sigma = 0.749868                  Kolmogorov-Smirnov                  data points 50                  ks stat 0.122                  alpha 5.e-002                  ks stat(50,5.e-002) 0.188                  p-value 0.412                  result DO NOT REJECT</p> <p>Anderson-Darling                  data points 50                  ad stat 0.727                  alpha 5.e-002                  ad stat(5.e-002) 2.49                  p-value 0.537                  result DO NOT REJECT</p>	<p>Normal                  mean = 7.418e-003                  sigma = 3.43341e-003                  Kolmogorov-Smirnov                  data points 50                  ks stat 0.129                  alpha 5.e-002                  ks stat(50,5.e-002) 0.188                  p-value 0.342                  result DO NOT REJECT</p> <p>Anderson-Darling                  data points 50                  ad stat 1.13                  alpha 5.e-002                  ad stat(5.e-002) 2.49                  p-value 0.294                  result DO NOT REJECT</p> <p>Uniform                  minimum = 3.2e-003                  maximum = 1.61e-002                  Kolmogorov-Smirnov                  data points 50                  ks stat 0.28                  alpha 5.e-002                  ks stat(50,5.e-002) 0.188                  p-value 5.9e-004                  result REJECT</p> <p>Anderson-Darling                  data points 47                  ad stat 8.77                  alpha 5.e-002                  ad stat(5.e-002) 2.49                  p-value 0.                  result REJECT</p>
--	---



## Parte 8 – máquina S58

0.0071 0.0093 0.0083 0.007 0.0072  
 0.0055 0.0049 0.0053 0.0078 0.006  
 0.0058 0.0069 0.0051 0.0075 0.0095  
 0.0057 0.0052 0.0049 0.0055 0.0046  
 0.0085 0.0069 0.0088 0.009 0.0078  
 0.0046 0.0046 0.0075 0.0098 0.0097  
 0.0049 0.009 0.0097 0.0048 0.0081  
 0.006 0.0067 0.0085 0.0075 0.0053  
 0.0089 0.0091 0.005 0.0051 0.0093  
 0.0063 0.0072 0.0047 0.0049 0.0083

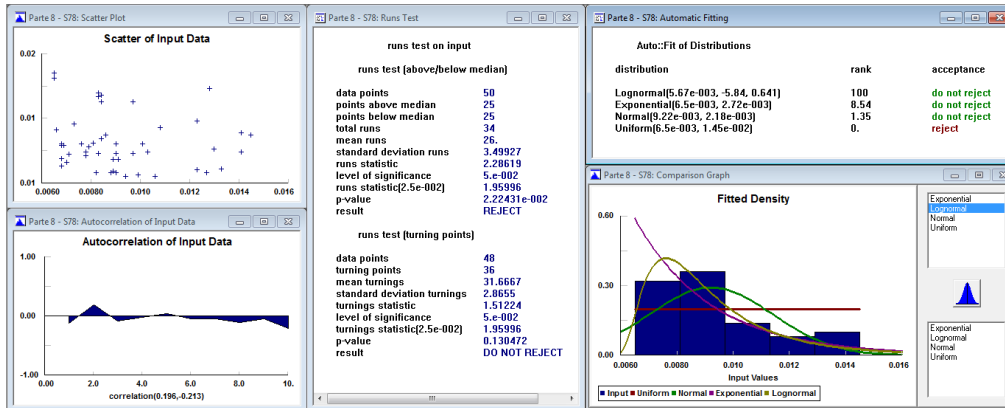
<p>Exponential                  minimum = 4.6e-003                  beta = 2.312e-003                  Kolmogorov-Smirnov                  data points 50                  ks stat 0.17                  alpha 5.e-002                  ks stat(50,5.e-002) 0.188                  p-value 9.79e-002                  result DO NOT REJECT</p> <p>Anderson-Darling                  data points 47                  ad stat 2.17                  alpha 5.e-002                  ad stat(5.e-002) 2.49                  p-value 7.33e-002                  result DO NOT REJECT</p> <p>Lognormal                  minimum = 2.94724e-003                  mu = -5.63324                  sigma = 0.467279                  Kolmogorov-Smirnov                  data points 50                  ks stat 0.125                  alpha 5.e-002                  ks stat(50,5.e-002) 0.188                  p-value 0.387                  result DO NOT REJECT</p> <p>Anderson-Darling                  data points 50                  ad stat 1.48                  alpha 5.e-002                  ad stat(5.e-002) 2.49                  p-value 0.182                  result DO NOT REJECT</p>	<p>Normal                  mean = 6.912e-003                  sigma = 1.70207e-003                  Kolmogorov-Smirnov                  data points 50                  ks stat 0.137                  alpha 5.e-002                  ks stat(50,5.e-002) 0.188                  p-value 0.282                  result DO NOT REJECT</p> <p>Anderson-Darling                  data points 50                  ad stat 1.34                  alpha 5.e-002                  ad stat(5.e-002) 2.49                  p-value 0.219                  result DO NOT REJECT</p> <p>Uniform                  minimum = 4.6e-003                  maximum = 9.0e-003                  Kolmogorov-Smirnov                  data points 50                  ks stat 0.167                  alpha 5.e-002                  ks stat(50,5.e-002) 0.188                  p-value 0.11                  result DO NOT REJECT</p> <p>Anderson-Darling                  data points 46                  ad stat 0.982                  alpha 5.e-002                  ad stat(5.e-002) 2.49                  p-value 0.367                  result DO NOT REJECT</p>
--	---



## Parte 8 – máquina S78

0.0141	0.0068	0.0108	0.0089	0.0123
0.0099	0.0079	0.0103	0.0078	0.007
0.0066	0.0088	0.0084	0.0081	0.0076
0.0101	0.0068	0.0128	0.0091	0.009
0.009	0.0073	0.0133	0.0078	0.0083
0.009	0.0106	0.0071	0.0084	0.013
0.0068	0.0065	0.0082	0.0094	0.0086
0.009	0.0145	0.0068	0.0065	0.0097
0.0083	0.0097	0.0089	0.0141	0.0083
0.0127	0.0123	0.0069	0.0084	0.0083

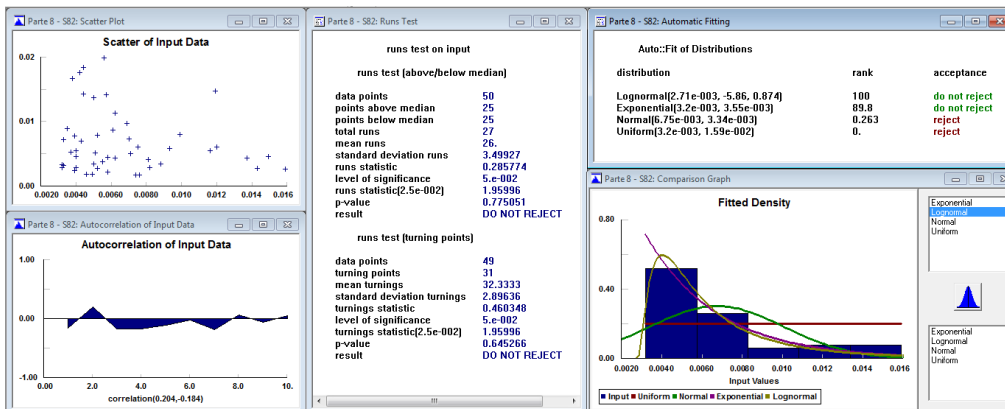
Exponential	Normal	Lognormal	Uniform
minimum = 6.5e-003	mean = 9.216e-003	minimum = 5.6723e-003	minimum = 6.5e-003
beta = 2.716e-003	sigma = 2.18306e-003	mu = -5.83638	maximum = 1.45e-002
Kolmogorov-Smirnov	Kolmogorov-Smirnov	Kolmogorov-Smirnov	Kolmogorov-Smirnov
data points = 50	data points = 50	data points = 50	data points = 50
ks stat = 0.145	ks stat = 0.181	ks stat = 9.48e-002	ks stat = 0.335
alpha = 5.e-002	alpha = 5.e-002	alpha = 5.e-002	alpha = 5.e-002
ks stat[50,5.e-002] = 0.188	ks stat[50,5.e-002] = 0.188	ks stat[50,5.e-002] = 0.188	ks stat[50,5.e-002] = 0.188
p-value = 0.22	p-value = 0.188	p-value = 0.724	p-value = 1.53e-005
result = DO NOT REJECT	result = DO NOT REJECT	result = DO NOT REJECT	result = REJECT
Anderson-Darling	Anderson-Darling	Anderson-Darling	Anderson-Darling
data points = 48	data points = 48	data points = 50	data points = 47
ad stat = 1.44	ad stat = 1.92	ad stat = 0.563	ad stat = 7.91
alpha = 5.e-002	alpha = 5.e-002	alpha = 5.e-002	alpha = 5.e-002
ad stat[5.e-002] = 2.49	ad stat[5.e-002] = 2.49	ad stat[5.e-002] = 2.49	ad stat[5.e-002] = 2.49
p-value = 0.192	p-value = 0.102	p-value = 0.684	p-value = 0.
result = DO NOT REJECT	result = DO NOT REJECT	result = DO NOT REJECT	result = REJECT



## Parte 8 – máquina S82

0.0093	0.0042	0.0052	0.004	0.0058
0.0061	0.0143	0.0075	0.004	0.0035
0.0081	0.0039	0.0062	0.0058	0.0082
0.0049	0.0074	0.005	0.0051	0.004
0.0033	0.0032	0.0044	0.0056	0.0052
0.007	0.0043	0.012	0.0159	0.0039
0.0071	0.0069	0.0062	0.0038	0.0037
0.0055	0.0088	0.0099	0.0137	0.0057
0.0046	0.0044	0.0076	0.005	0.0119
0.0033	0.0149	0.0032	0.0116	0.0123

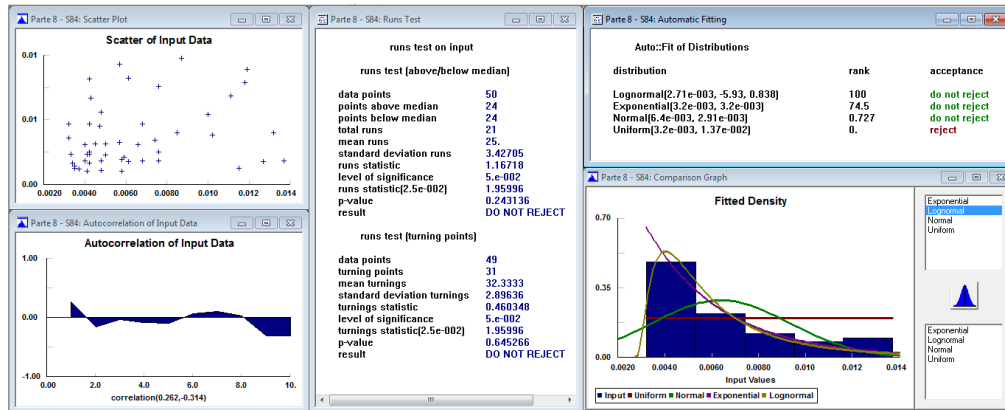
Exponential	Normal	Lognormal	Uniform
minimum = 3.2e-003	mean = 6.748e-003	minimum = 2.71099e-003	minimum = 3.2e-003
beta = 3.548e-003	sigma = 3.34337e-003	mu = -5.86317	maximum = 1.59e-002
Kolmogorov-Smirnov	Kolmogorov-Smirnov	Kolmogorov-Smirnov	Kolmogorov-Smirnov
data points = 50	data points = 50	data points = 50	data points = 50
ks stat = 6.63e-002	ks stat = 0.185	ks stat = 6.4e-002	ks stat = 0.394
alpha = 5.e-002	alpha = 5.e-002	alpha = 5.e-002	alpha = 5.e-002
ks stat[50,5.e-002] = 0.188	ks stat[50,5.e-002] = 0.188	ks stat[50,5.e-002] = 0.188	ks stat[50,5.e-002] = 0.188
p-value = 0.97	p-value = 5.88e-002	p-value = 0.979	p-value = 0.263
result = DO NOT REJECT	result = DO NOT REJECT	result = DO NOT REJECT	result = REJECT
Anderson-Darling	Anderson-Darling	Anderson-Darling	Anderson-Darling
data points = 48	data points = 48	data points = 50	data points = 47
ad stat = 0.366	ad stat = 2.6	ad stat = 0.244	ad stat = 15.3
alpha = 5.e-002	alpha = 5.e-002	alpha = 5.e-002	alpha = 5.e-002
ad stat[5.e-002] = 0.882	ad stat[5.e-002] = 4.41e-002	ad stat[5.e-002] = 2.49	ad stat[5.e-002] = 2.49
p-value = 0.882	p-value = 0.	p-value = 0.775051	p-value = 0.
result = DO NOT REJECT	result = REJECT	result = DO NOT REJECT	result = REJECT



## Parte 8 – máquina S84

0.0061	0.0048	0.0059	0.0066	0.0076
0.0041	0.0042	0.0045	0.0057	0.005
0.0048	0.0118	0.0058	0.0132	0.0047
0.0033	0.0115	0.0043	0.0068	0.0074
0.0048	0.0035	0.01	0.0042	0.0061
0.0087	0.0035	0.0085	0.0076	0.0119
0.0137	0.0037	0.0068	0.0042	0.0127
0.0042	0.0034	0.0076	0.005	0.0041
0.004	0.004	0.0111	0.0058	0.0032
0.0042	0.0057	0.0102	0.0032	0.0063

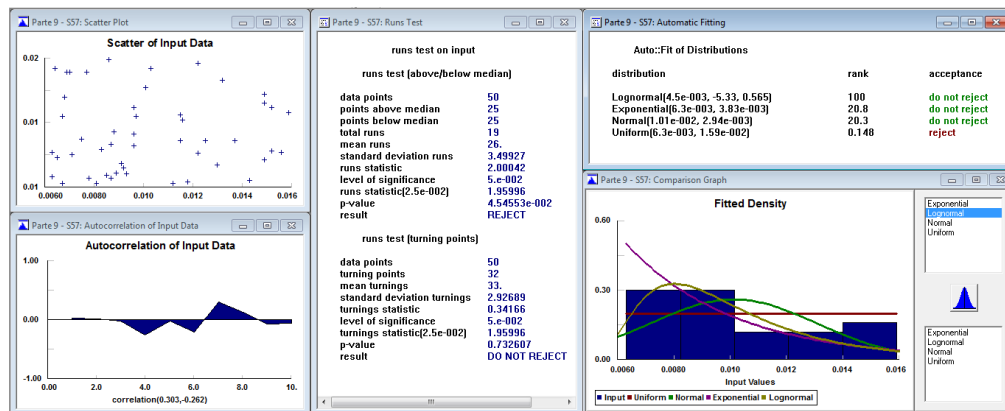
Exponential	=	3.2e-003	Normal	=	6.4e-003
beta	=	3.2e-003	sigma	=	2.91088e-003
Kolmogorov-Smirnov			Kolmogorov-Smirnov		
data points		50	data points		50
ks stat		8.12e-002	ks stat		0.165
alpha		5.e-002	alpha		5.e-002
ks stat[50,5.e-002]		0.188	ks stat[50,5.e-002]		0.188
p-value		0.87	p-value		0.118
result		DO NOT REJECT	result		DO NOT REJECT
Anderson-Darling			Anderson-Darling		
data points		48	data points		50
ad stat		0.565	ad stat		2.51
alpha		5.e-002	alpha		5.e-002
ad stat[5.e-002]		2.49	ad stat[5.e-002]		2.49
p-value		0.681	p-value		4.89e-002
result		DO NOT REJECT	result		REJECT
Lognormal			Uniform		
minimum	=	2.71082e-003	minimum	=	3.2e-003
mu	=	-5.92643	maximum	=	1.37e-002
sigma	=	0.83804	Kolmogorov-Smirnov		
Kolmogorov-Smirnov			data points		50
data points		50	ks stat		0.361
ks stat		7.67e-002	alpha		5.e-002
alpha		5.e-002	ks stat[50,5.e-002]		0.188
ks stat[50,5.e-002]		0.188	p-value		0
p-value		0.908	result		REJECT
result		DO NOT REJECT	Anderson-Darling		
Anderson-Darling			data points		47
data points		50	ad stat		12
ad stat		0.372	alpha		5.e-002
alpha		5.e-002	ad stat[5.e-002]		2.49
ad stat[5.e-002]		2.49	p-value		0
p-value		0.876	result		REJECT
result		DO NOT REJECT			



## Parte 9 – máquina S57

0.0091	0.0159	0.0067	0.0097	0.0143
0.0078	0.0118	0.0063	0.0115	0.0065
0.0067	0.0064	0.0087	0.0116	0.0083
0.0115	0.0152	0.0093	0.0112	0.0089
0.0096	0.0088	0.007	0.0063	0.0071
0.0101	0.0103	0.0149	0.0068	0.0085
0.0137	0.0152	0.0125	0.013	0.0069
0.0096	0.0122	0.0096	0.0077	0.0149
0.0122	0.0156	0.0092	0.0149	0.0081
0.0086	0.0087	0.0075	0.0132	0.0063

Exponential	=	6.3e-003	Normal	=	1.0128e-002
beta	=	3.828e-003	sigma	=	2.93803e-003
Kolmogorov-Smirnov			Kolmogorov-Smirnov		
data points		50	data points		50
ks stat		0.117	ks stat		0.138
alpha		5.e-002	alpha		5.e-002
ks stat[50,5.e-002]		0.188	ks stat[50,5.e-002]		0.188
p-value		0.464	p-value		0.272
result		DO NOT REJECT	result		DO NOT REJECT
Anderson-Darling			Anderson-Darling		
data points		47	data points		50
ad stat		1.57	ad stat		1.2
alpha		5.e-002	alpha		5.e-002
ad stat[5.e-002]		2.49	ad stat[5.e-002]		2.49
p-value		0.16	p-value		0.866
result		DO NOT REJECT	result		DO NOT REJECT
Lognormal			Uniform		
minimum	=	4.4961e-003	minimum	=	6.3e-003
mu	=	-5.32863	maximum	=	1.59e-002
sigma	=	0.564769	Kolmogorov-Smirnov		
Kolmogorov-Smirnov			data points		50
data points		50	ks stat		0.226
ks stat		0.102	alpha		5.e-002
alpha		5.e-002	ks stat[50,5.e-002]		0.188
ks stat[50,5.e-002]		0.188	p-value		1.01e-002
p-value		0.635	result		REJECT
result		DO NOT REJECT	Anderson-Darling		
Anderson-Darling			data points		46
data points		50	ad stat		2.46
ad stat		0.699	alpha		5.e-002
alpha		5.e-002	ad stat[5.e-002]		2.49
ad stat[5.e-002]		2.49	p-value		5.21e-002
p-value		0.56	result		DO NOT REJECT
result		DO NOT REJECT			

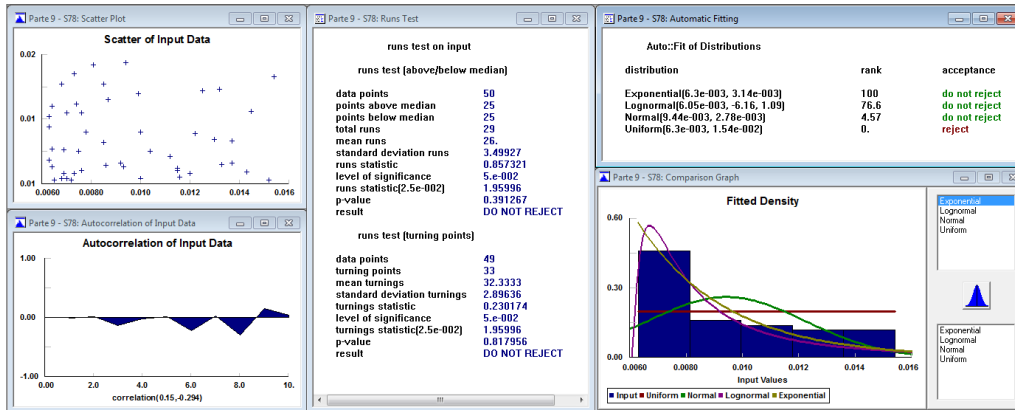




## Parte 9 – máquina S78

0.0069	0.0068	0.0063	0.0133	0.0112
0.0086	0.0064	0.0104	0.0075	0.0081
0.0074	0.012	0.0085	0.0085	0.0152
0.0122	0.0068	0.0092	0.0137	0.0063
0.0099	0.0137	0.0076	0.0076	0.0078
0.013	0.0093	0.007	0.0115	0.01
0.0094	0.0073	0.0064	0.007	0.01
0.0154	0.0145	0.0087	0.0115	0.0064
0.0143	0.0116	0.0125	0.0072	0.0073
0.0069	0.0065	0.0132	0.0063	0.0068

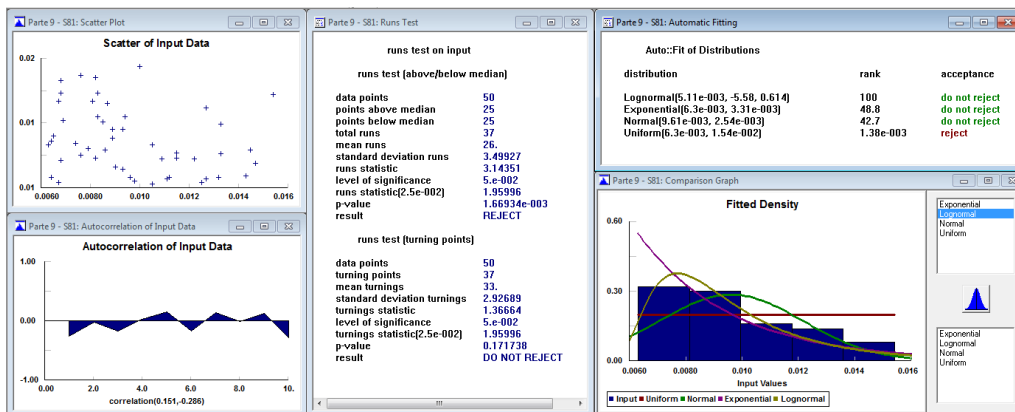
Exponential	=	6.3e-003	Normal	=	9.438e-003
minimum	=	3.138e-003	mean	=	2.77704e-003
beta	=		sigma	=	
Kolmogorov-Smirnov					
data points		50	Kolmogorov-Smirnov		50
ks stat		0.11	data points		ks stat
alpha		5.e-002	ks stat		0.166
ks sta[50.5.e-002]		0.188	alpha		5.e-002
p-value		0.542	ks sta[50.5.e-002]		0.188
result		DO NOT REJECT	p-value		0.113
Anderson-Darling			result		DO NOT REJECT
data points		47	Anderson-Darling		
ad stat		0.842	data points		50
alpha		5.e-002	ad stat		1.94
ad sta[5.e-002]		2.49	alpha		5.e-002
p-value		0.452	ad sta[5.e-002]		2.49
result		DO NOT REJECT	p-value		9.86e-002
			result		DO NOT REJECT
Lognormal			Uniform		
minimum	=	6.05477e-003	minimum	=	6.3e-003
mu	=	-6.15841	maximum	=	1.54e-002
sigma	=	1.08718			
Kolmogorov-Smirnov			Kolmogorov-Smirnov		
data points		50	data points		50
ks stat		0.113	ks stat		0.277
alpha		5.e-002	alpha		5.e-002
ks sta[50.5.e-002]		0.188	ks sta[50.5.e-002]		0.188
p-value		0.508	p-value		6.91e-004
result		DO NOT REJECT	result		REJECT
Anderson-Darling			Anderson-Darling		
data points		50	data points		46
ad stat		0.978	ad stat		6.99
alpha		5.e-002	alpha		5.e-002
ad sta[5.e-002]		2.49	ad sta[5.e-002]		2.49
p-value		0.369	p-value		0.
result		DO NOT REJECT	result		REJECT



## Parte 9 – máquina S81

0.0076	0.0082	0.0063	0.0143	0.0109
0.0147	0.0083	0.0093	0.0069	0.0082
0.0079	0.0115	0.0074	0.0112	0.0145
0.009	0.0083	0.0094	0.0068	0.0089
0.0076	0.0133	0.0115	0.0081	0.0098
0.0085	0.0086	0.0087	0.0127	0.0065
0.0111	0.0089	0.0125	0.0067	0.01
0.0067	0.0105	0.0064	0.0064	0.0154
0.0127	0.0093	0.0096	0.0068	0.0132
0.0122	0.0105	0.0068	0.0133	0.0068

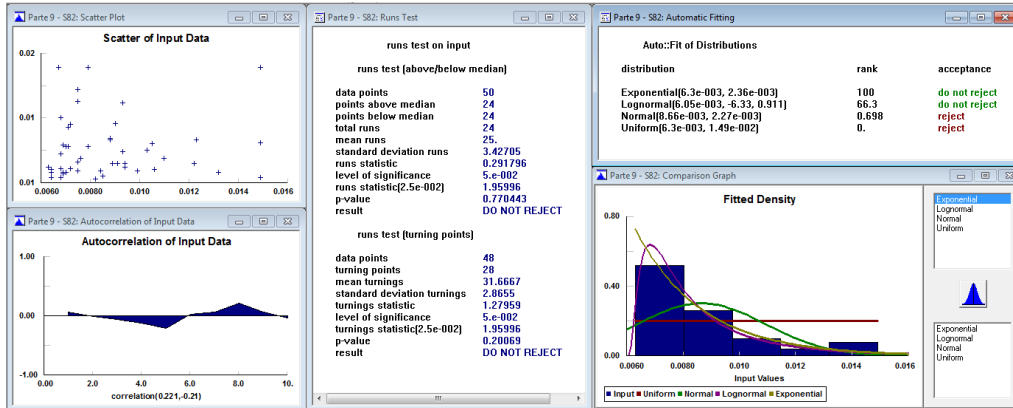
Exponential	=	6.3e-003	Normal	=	9.614e-003
minimum	=	3.314e-003	mean	=	2.53898e-003
beta	=		sigma	=	
Kolmogorov-Smirnov					
data points		50	Kolmogorov-Smirnov		50
ks stat		0.119	data points		ks stat
alpha		5.e-002	ks stat		0.116
ks sta[50.5.e-002]		0.188	alpha		5.e-002
p-value		0.443	ks sta[50.5.e-002]		0.188
result		DO NOT REJECT	p-value		0.481
Anderson-Darling			result		DO NOT REJECT
data points		49	Anderson-Darling		
ad stat		0.959	data points		50
alpha		5.e-002	ad stat		1.11
ad sta[5.e-002]		2.49	alpha		5.e-002
p-value		0.379	ad sta[5.e-002]		2.49
result		DO NOT REJECT	p-value		0.306
			result		DO NOT REJECT
Lognormal			Uniform		
minimum	=	5.10625e-003	minimum	=	6.3e-003
mu	=	-5.57675	maximum	=	1.54e-002
sigma	=	0.613899			
Kolmogorov-Smirnov			Kolmogorov-Smirnov		
data points		50	data points		50
ks stat		0.108	ks stat		0.239
alpha		5.e-002	alpha		5.e-002
ks sta[50.5.e-002]		0.188	ks sta[50.5.e-002]		0.188
p-value		0.566	p-value		5.27e-003
result		DO NOT REJECT	result		REJECT
Anderson-Darling			Anderson-Darling		
data points		50	data points		48
ad stat		0.643	ad stat		6.06
alpha		5.e-002	alpha		5.e-002
ad sta[5.e-002]		2.49	ad sta[5.e-002]		2.49
p-value		0.688	p-value		9.05e-004
result		DO NOT REJECT	result		REJECT



## Parte 9 – máquina S82

0.0099	0.0079	0.0072	0.0093	0.0067
0.0069	0.0088	0.0105	0.0122	0.0149
0.0068	0.0094	0.009	0.0075	0.0064
0.011	0.0075	0.0106	0.0123	0.0064
0.0079	0.0132	0.007	0.0093	0.007
0.0149	0.0068	0.0088	0.0084	0.0068
0.0149	0.0064	0.0094	0.0069	0.0071
0.0091	0.0068	0.0072	0.0089	0.0103
0.0075	0.0082	0.0071	0.0075	0.0085
0.0076	0.0063	0.0088	0.0069	0.0065

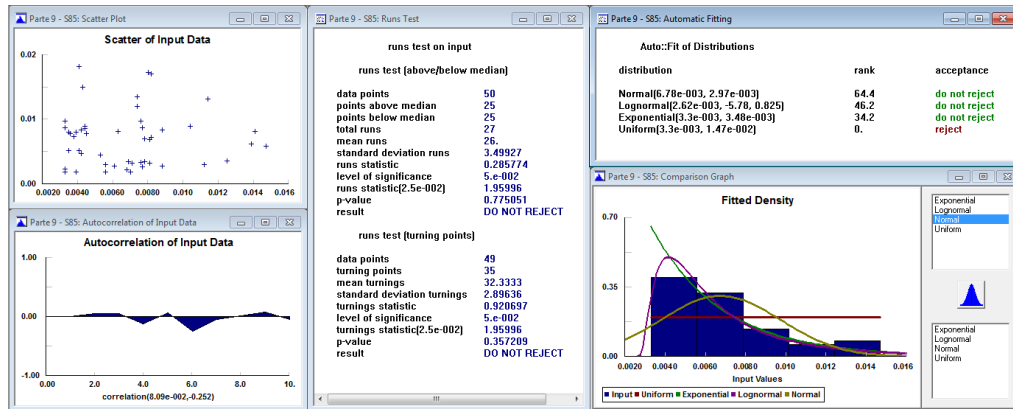
Exponential	minimum =	6.3e-003	Normal	mean =	0.664e-003
beta	beta	2.364e-003	sigma	sigma	2.26952e-003
Kolmogorov-Smirnov	data points	50	Kolmogorov-Smirnov	data points	50
ks stat	ks stat	7.27e-002	ks stat	ks stat	0.16
alpha	alpha	5.e-002	alpha	alpha	5.e-002
ks stat(50,5.e-002)	ks stat(50,5.e-002)	0.188	ks stat(50,5.e-002)	ks stat(50,5.e-002)	0.188
p-value	p-value	0.937	p-value	p-value	0.137
result	result	DO NOT REJECT	result	result	DO NOT REJECT
Anderson-Darling	data points	49	Anderson-Darling	data points	50
ad stat	ad stat	0.342	ad stat	ad stat	2.61
alpha	alpha	5.e-002	alpha	alpha	5.e-002
ad stat(5.e-002)	ad stat(5.e-002)	2.49	ad stat(5.e-002)	ad stat(5.e-002)	2.49
p-value	p-value	0.904	p-value	p-value	4.33e-002
result	result	DO NOT REJECT	result	result	REJECT
Lognormal	minimum =	6.05471e-003	Uniform	minimum =	6.3e-003
mu	mu	-6.3286	maximum =	maximum =	1.49e-002
sigma	sigma	0.911172	Kolmogorov-Smirnov	data points	50
Kolmogorov-Smirnov	data points	50	ks stat	ks stat	0.42
ks stat	ks stat	0.102	alpha	alpha	5.e-002
alpha	alpha	5.e-002	ks stat(50,5.e-002)	ks stat(50,5.e-002)	0.188
ks stat(50,5.e-002)	ks stat(50,5.e-002)	0.188	p-value	p-value	0.
p-value	p-value	0.641	result	result	REJECT
result	result	DO NOT REJECT	Anderson-Darling	data points	46
Anderson-Darling	data points	50	ad stat	ad stat	20.8
ad stat	ad stat	0.372	alpha	alpha	5.e-002
alpha	alpha	5.e-002	ad stat(5.e-002)	ad stat(5.e-002)	2.49
ad stat(5.e-002)	ad stat(5.e-002)	2.49	p-value	p-value	0.
p-value	p-value	0.876	result	result	REJECT
result	result	DO NOT REJECT			



## Parte 9 – máquina S85

0.0035	0.0147	0.0139	0.007	0.0088
0.0076	0.0061	0.0063	0.0033	0.0078
0.0088	0.0039	0.0077	0.0081	0.0044
0.0039	0.0076	0.0038	0.0068	0.008
0.0033	0.0043	0.0071	0.0035	0.0141
0.0036	0.0125	0.0042	0.0056	0.0077
0.0074	0.0045	0.0078	0.0041	0.0081
0.0114	0.0074	0.0069	0.0056	0.0042
0.0112	0.0104	0.0044	0.0033	0.0053
0.0041	0.0082	0.0082	0.0033	0.0051

Exponential	minimum =	3.3e-003	Normal	mean =	6.776e-003
beta	beta	3.476e-003	sigma	sigma	2.9709e-003
Kolmogorov-Smirnov	data points	50	Kolmogorov-Smirnov	data points	50
ks stat	ks stat	0.155	ks stat	ks stat	0.138
alpha	alpha	5.e-002	alpha	alpha	5.e-002
ks stat(50,5.e-002)	ks stat(50,5.e-002)	0.188	ks stat(50,5.e-002)	ks stat(50,5.e-002)	0.188
p-value	p-value	0.165	p-value	p-value	0.27
result	result	DO NOT REJECT	result	result	DO NOT REJECT
Anderson-Darling	data points	46	Anderson-Darling	data points	50
ad stat	ad stat	1.61	ad stat	ad stat	1.5
alpha	alpha	5.e-002	alpha	alpha	5.e-002
ad stat(5.e-002)	ad stat(5.e-002)	2.49	ad stat(5.e-002)	ad stat(5.e-002)	2.49
p-value	p-value	0.153	p-value	p-value	0.176
result	result	DO NOT REJECT	result	result	DO NOT REJECT
Lognormal	minimum =	2.62211e-003	Uniform	minimum =	3.3e-003
mu	mu	-5.78079	maximum =	maximum =	1.47e-002
sigma	sigma	0.825265	Kolmogorov-Smirnov	data points	50
Kolmogorov-Smirnov	data points	50	ks stat	ks stat	0.39
ks stat	ks stat	0.163	alpha	alpha	5.e-002
alpha	alpha	5.e-002	ks stat(50,5.e-002)	ks stat(50,5.e-002)	0.188
ks stat(50,5.e-002)	ks stat(50,5.e-002)	0.188	p-value	p-value	0.
p-value	p-value	0.125	result	result	REJECT
result	result	DO NOT REJECT	Anderson-Darling	data points	45
Anderson-Darling	data points	50	ad stat	ad stat	9.7
ad stat	ad stat	1.18	alpha	alpha	5.e-002
alpha	alpha	5.e-002	ad stat(5.e-002)	ad stat(5.e-002)	2.49
ad stat(5.e-002)	ad stat(5.e-002)	2.49	p-value	p-value	0.
p-value	p-value	0.273	result	result	REJECT
result	result	DO NOT REJECT			



## Parte 10 – máquina S57

0.0063	0.0147	0.0095	0.0067	0.0088
0.0074	0.01	0.0072	0.0102	0.0078
0.011	0.0093	0.0081	0.0156	0.013
0.0095	0.0147	0.0101	0.0076	0.008
0.0093	0.0064	0.0115	0.0063	0.0123
0.0091	0.0112	0.0154	0.0068	0.0102
0.011	0.0102	0.0104	0.0085	0.012
0.0075	0.0072	0.0085	0.0147	0.0088
0.0069	0.0149	0.0078	0.0139	0.01
0.0132	0.0075	0.013	0.0086	0.013

```

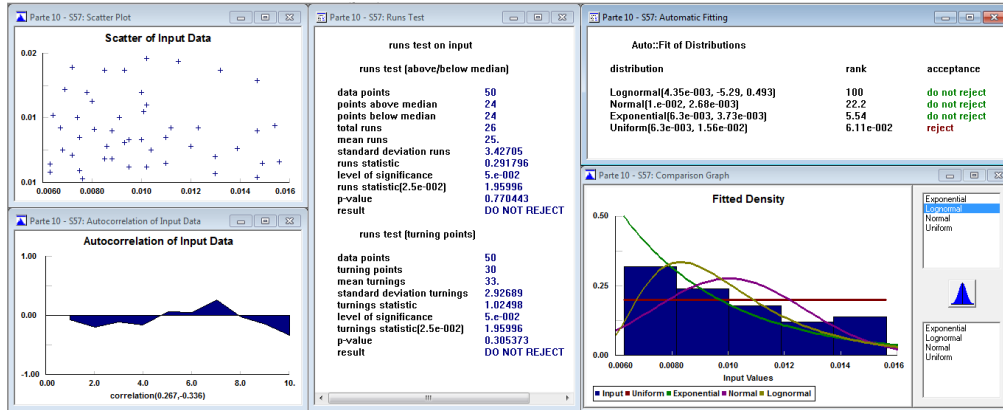
Exponential minimum = 6.3e-003
              beta = 3.732e-003
Kolmogorov-Smirnov
data points = 50
ks stat = 0.125
alpha = 5.e-002
ks stat(50,5.e-002) = 0.188
p-value = 0.38
result = DO NOT REJECT
Anderson-Darling
data points = 48
ad stat = 1.87
alpha = 5.e-002
ad stat(5.e-002) = 2.49
p-value = 0.108
result = DO NOT REJECT

Lognormal minimum = 4.34607e-003
           mu = -5.20827
           sigma = 0.493352
Kolmogorov-Smirnov
data points = 50
ks stat = 0.15e-002
alpha = 5.e-002
ks stat(50,5.e-002) = 0.188
p-value = 0.866
result = DO NOT REJECT
Anderson-Darling
data points = 50
ad stat = 0.39
alpha = 5.e-002
ad stat(5.e-002) = 2.49
p-value = 0.858
result = DO NOT REJECT
    
```

```

Normal mean = 1.0032e-002
       sigma = 2.68016e-003
Kolmogorov-Smirnov
data points = 50
ks stat = 0.115
alpha = 5.e-002
ks stat(50,5.e-002) = 0.188
p-value = 0.487
result = DO NOT REJECT
Anderson-Darling
data points = 50
ad stat = 1.04
alpha = 5.e-002
ad stat(5.e-002) = 2.49
p-value = 0.339
result = DO NOT REJECT

Uniform minimum = 6.3e-003
         maximum = 1.56e-002
Kolmogorov-Smirnov
data points = 50
ks stat = 0.221
alpha = 5.e-002
ks stat(50,5.e-002) = 0.188
p-value = 1.28e-002
result = REJECT
Anderson-Darling
data points = 47
ad stat = 2.78
alpha = 5.e-002
ad stat(5.e-002) = 2.49
p-value = 3.54e-002
result = REJECT
    
```



## Parte 10 – máquina S78

0.0073	0.009	0.0085	0.0154	0.0154
0.0112	0.0075	0.0069	0.0084	0.0074
0.01	0.0081	0.0123	0.0114	0.0092
0.0064	0.0132	0.0094	0.012	0.0082
0.0083	0.0109	0.0081	0.0123	0.0114
0.0099	0.0072	0.0105	0.009	0.0097
0.0154	0.0079	0.0094	0.0078	0.0063
0.0112	0.0159	0.0105	0.0083	0.0152
0.0118	0.0137	0.0105	0.0154	0.0139
0.0122	0.0127	0.0063	0.0069	0.0078

```

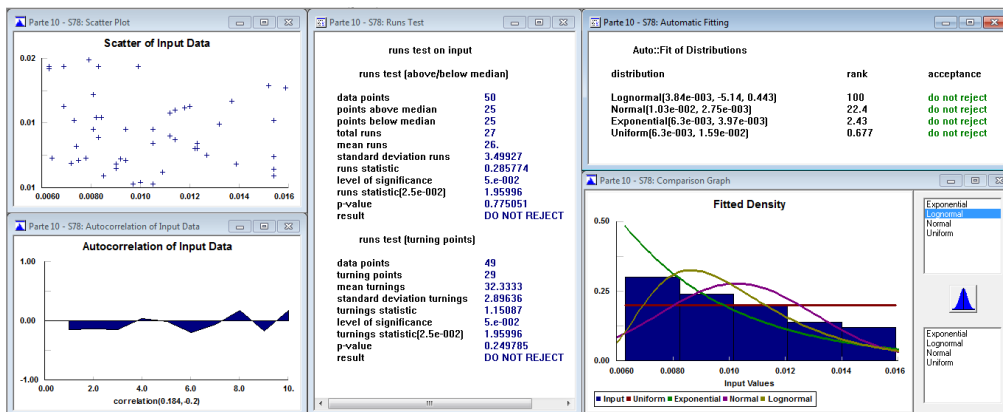
Exponential minimum = 6.3e-003
              beta = 3.972e-003
Kolmogorov-Smirnov
data points = 50
ks stat = 0.135
alpha = 5.e-002
ks stat(50,5.e-002) = 0.188
p-value = 0.299
result = DO NOT REJECT
Anderson-Darling
data points = 48
ad stat = 2.32
alpha = 5.e-002
ad stat(5.e-002) = 2.49
p-value = 6.17e-002
result = DO NOT REJECT

Lognormal minimum = 3.8407e-003
           mu = -5.14144
           sigma = 0.443128
Kolmogorov-Smirnov
data points = 50
ks stat = 7.73e-002
alpha = 5.e-002
ks stat(50,5.e-002) = 0.188
p-value = 0.899
result = DO NOT REJECT
Anderson-Darling
data points = 50
ad stat = 0.405
alpha = 5.e-002
ad stat(5.e-002) = 2.49
p-value = 0.843
result = DO NOT REJECT
    
```

```

Normal mean = 1.0272e-002
       sigma = 2.75151e-003
Kolmogorov-Smirnov
data points = 50
ks stat = 0.12
alpha = 5.e-002
ks stat(50,5.e-002) = 0.188
p-value = 0.432
result = DO NOT REJECT
Anderson-Darling
data points = 50
ad stat = 0.934
alpha = 5.e-002
ad stat(5.e-002) = 2.49
p-value = 0.294
result = DO NOT REJECT

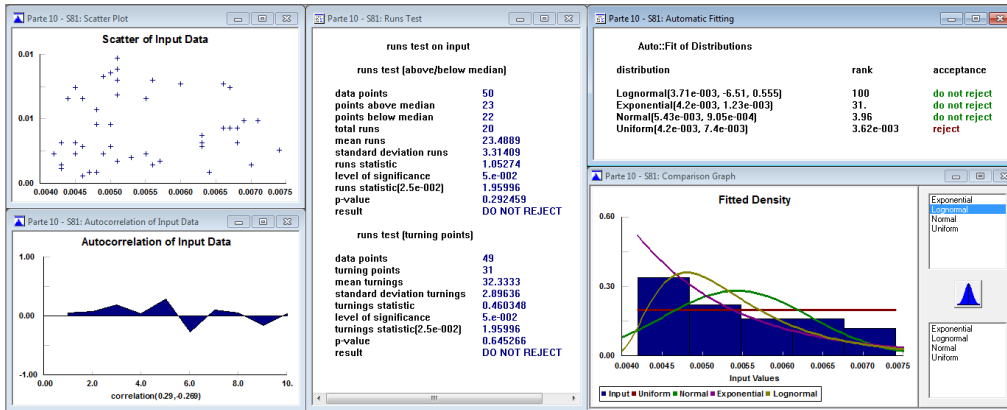
Uniform minimum = 6.3e-003
         maximum = 1.59e-002
Kolmogorov-Smirnov
data points = 50
ks stat = 0.175
alpha = 5.e-002
ks stat(50,5.e-002) = 0.188
p-value = 8.25e-002
result = DO NOT REJECT
Anderson-Darling
data points = 47
ad stat = 2.31
alpha = 5.e-002
ad stat(5.e-002) = 2.49
p-value = 6.22e-002
result = DO NOT REJECT
    
```



## Parte 10 – máquina S81

0.0049	0.0055	0.0051	0.0068	0.0056
0.0069	0.0063	0.0046	0.0055	0.0068
0.0057	0.0051	0.0042	0.0048	0.0051
0.0046	0.0071	0.0048	0.0056	0.0074
0.005	0.0057	0.0043	0.0045	0.0049
0.005	0.0046	0.0051	0.0048	0.0048
0.007	0.0063	0.0064	0.0043	0.006
0.0045	0.0053	0.0043	0.0044	0.0067
0.0066	0.0047	0.0045	0.0063	0.0066
0.0067	0.0043	0.0051	0.005	0.0055

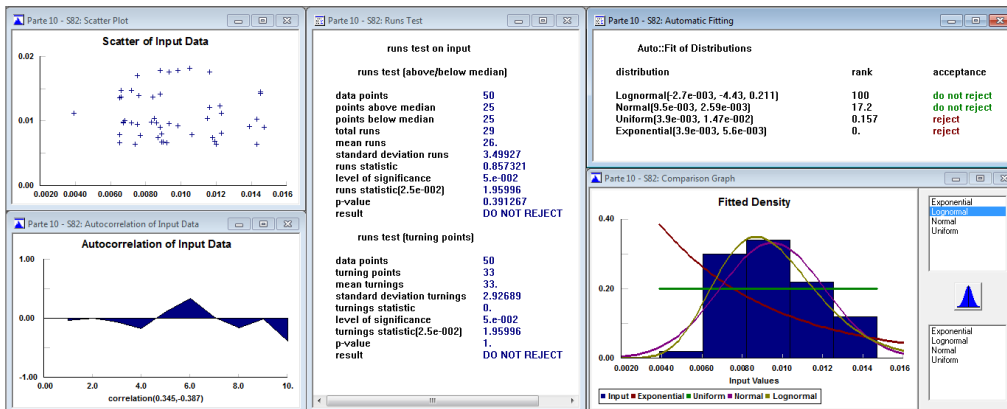
Exponential	minimum =	4.2e-003	Normal	mean =	5.432e-003
	beta =	1.232e-003		sigma =	9.04531e-004
Kolmogorov-Smirnov	data points	50	Kolmogorov-Smirnov	data points	50
	ks stat	0.176		ks stat	0.183
	alpha	5.e-002		alpha	5.e-002
	ks stat(50,5.e-002)	0.188		ks stat(50,5.e-002)	0.188
	p-value	0.378		p-value	6.1e-002
	result	DO NOT REJECT		result	DO NOT REJECT
Anderson-Darling	data points	49	Anderson-Darling	data points	50
	ad stat	1.38		ad stat	1.56
	alpha	5.e-002		alpha	5.e-002
	ad stat(5.e-002)	2.49		ad stat(5.e-002)	2.49
	p-value	0.207		p-value	0.164
	result	DO NOT REJECT		result	DO NOT REJECT
Lognormal	minimum =	3.70846e-003	Uniform	minimum =	4.2e-003
	mu =	-6.51013		maximum =	7.4e-003
	sigma =	0.555498	Kolmogorov-Smirnov	data points	50
Kolmogorov-Smirnov	ks stat	0.121		ks stat	0.259
	alpha	5.e-002		alpha	5.e-002
	ks stat(50,5.e-002)	0.188		ks stat(50,5.e-002)	0.188
	p-value	0.424		p-value	1.93e-003
	result	DO NOT REJECT		result	REJECT
Anderson-Darling	data points	50	Anderson-Darling	data points	48
	ad stat	6.657		ad stat	4.55
	alpha	5.e-002		alpha	5.e-002
	ad stat(5.e-002)	2.49		ad stat(5.e-002)	2.49
	p-value	0.595		p-value	4.73e-003
	result	DO NOT REJECT		result	REJECT



## Parte 10 – máquina S82

0.0039	0.0122	0.0088	0.0074	0.0119
0.0098	0.0106	0.0145	0.0065	0.0068
0.0085	0.0075	0.012	0.0066	0.009
0.0093	0.0139	0.0065	0.0116	0.0067
0.0143	0.0084	0.0115	0.0105	0.0089
0.0092	0.0116	0.0093	0.0147	0.0076
0.0066	0.0143	0.0087	0.0083	0.0118
0.0123	0.0065	0.0072	0.0089	0.0072
0.0098	0.0075	0.0123	0.0067	0.0088
0.0145	0.0086	0.0077	0.0088	0.0083

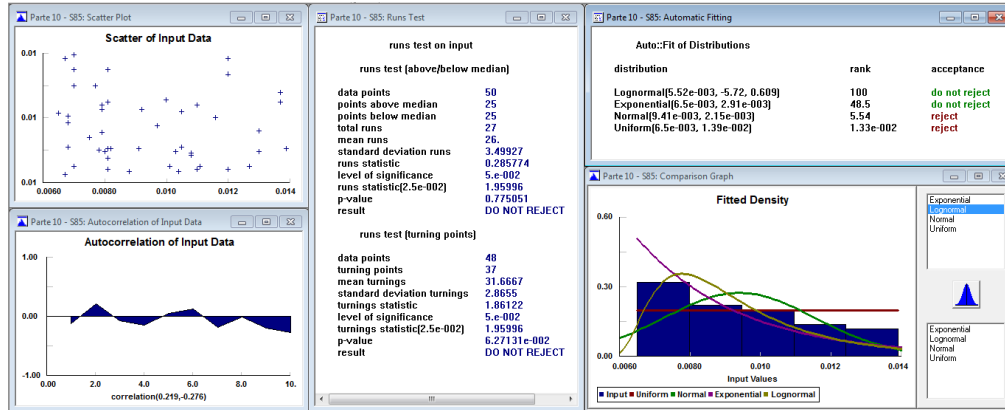
Exponential	minimum =	3.9e-003	Normal	mean =	9.496e-003
	beta =	5.596e-003		sigma =	2.58882e-003
Kolmogorov-Smirnov	data points	50	Kolmogorov-Smirnov	data points	50
	ks stat	0.352		ks stat	0.15
	alpha	5.e-002		alpha	5.e-002
	ks stat(50,5.e-002)	0.188		ks stat(50,5.e-002)	0.188
	p-value	1.81e-006		p-value	0.189
	result	REJECT		result	DO NOT REJECT
Anderson-Darling	data points	49	Anderson-Darling	data points	50
	ad stat	7.69		ad stat	1.16
	alpha	5.e-002		alpha	5.e-002
	ad stat(5.e-002)	2.49		ad stat(5.e-002)	2.49
	p-value	0		p-value	0.284
	result	REJECT		result	DO NOT REJECT
Lognormal	minimum =	-2.70164e-003	Uniform	minimum =	3.9e-003
	mu =	-4.42878		maximum =	1.47e-002
	sigma =	0.211257	Kolmogorov-Smirnov	data points	50
Kolmogorov-Smirnov	ks stat	0.109		ks stat	0.221
	alpha	5.e-002		alpha	5.e-002
	ks stat(50,5.e-002)	0.188		ks stat(50,5.e-002)	0.188
	p-value	0.561		p-value	1.28e-002
	result	DO NOT REJECT		result	REJECT
Anderson-Darling	data points	50	Anderson-Darling	data points	48
	ad stat	0.701		ad stat	2.71
	alpha	5.e-002		alpha	5.e-002
	ad stat(5.e-002)	2.49		ad stat(5.e-002)	2.49
	p-value	0.558		p-value	3.85e-002
	result	DO NOT REJECT		result	REJECT



## Parte 10 – máquina S85

0.012	0.0067	0.0078	0.0068	0.0067
0.0127	0.0137	0.008	0.0101	0.0065
0.007	0.0116	0.0079	0.007	0.0103
0.013	0.01	0.0108	0.007	0.0079
0.0079	0.0111	0.0077	0.0139	0.0091
0.0105	0.007	0.012	0.0081	0.0081
0.0082	0.012	0.0068	0.013	0.0081
0.0081	0.0137	0.0082	0.0092	0.0068
0.0075	0.011	0.0081	0.0105	0.0097
0.0088	0.0108	0.011	0.0104	0.0095

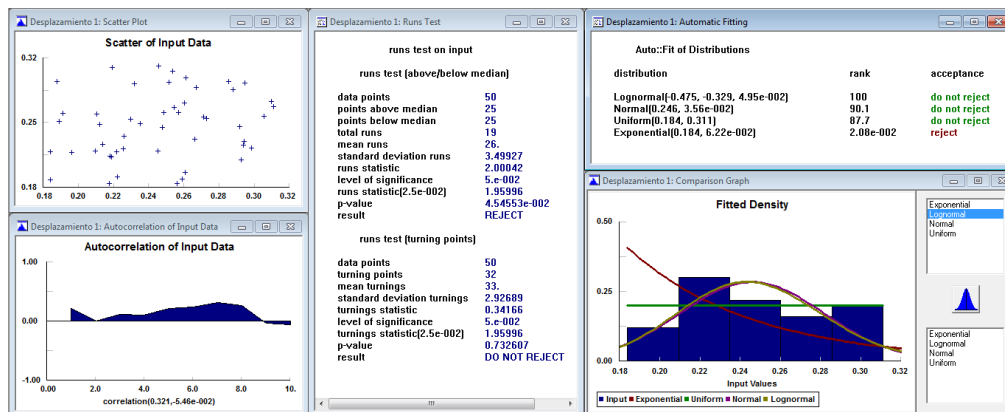
Exponential	minimum =	6.5e-003	Normal	mean =	9.406e-003
	beta =	2.906e-003		sigma =	2.15485e-003
Kolmogorov-Smirnov	data points	50	Kolmogorov-Smirnov	data points	50
	ks stat	0.122		ks stat	0.192
	alpha	5.e-002		alpha	5.e-002
	ks stat[50,5.e-002]	0.188		ks stat[50,5.e-002]	0.188
	p-value	0.41		p-value	4.32e-002
	result	DO NOT REJECT		result	REJECT
Anderson-Darling	data points	49	Anderson-Darling	data points	50
	ad stat	1.32		ad stat	1.27
	alpha	5.e-002		alpha	5.e-002
	ad stat[5.e-002]	2.49		ad stat[5.e-002]	2.49
	p-value	0.225		p-value	0.244
	result	DO NOT REJECT		result	DO NOT REJECT
Lognormal	minimum =	5.51787e-003	Uniform	minimum =	6.5e-003
	mu =	-5.72155		maximum =	1.39e-002
	sigma =	0.609120	Kolmogorov-Smirnov	data points	50
Kolmogorov-Smirnov	data points	50		ks stat	0.25
	ks stat	0.117		alpha	5.e-002
	alpha	5.e-002		ks stat[50,5.e-002]	0.188
	ks stat[50,5.e-002]	0.188		p-value	3.02e-003
	p-value	0.467		result	REJECT
	result	DO NOT REJECT	Anderson-Darling	data points	48
Anderson-Darling	data points	50		ad stat	4.04
	ad stat	0.913		alpha	5.e-002
	alpha	5.e-002		ad stat[5.e-002]	2.49
	ad stat[5.e-002]	2.49		p-value	8.34e-003
	p-value	0.407		result	REJECT
	result	DO NOT REJECT			



## Desplazamiento 1: desde el almacén de materiales hasta la estación de trabajo

0.2103	0.2351	0.2187	0.2917	0.257
0.2591	0.2484	0.2123	0.2456	0.2612
0.189	0.2609	0.2476	0.3109	0.2985
0.2513	0.1961	0.2451	0.2671	0.2221
0.2937	0.2178	0.2192	0.2878	0.1912
0.2253	0.184	0.3098	0.2855	0.2602
0.2218	0.1879	0.273	0.2942	0.271
0.218	0.2946	0.2542	0.2296	0.2559
0.2137	0.2925	0.2661	0.2537	0.1839
0.2261	0.2096	0.2317	0.3055	0.2182

Exponential	minimum =	0.1839	Normal	mean =	0.246074
	beta =	6.2174e-002		sigma =	3.56358e-002
Kolmogorov-Smirnov	data points	50	Kolmogorov-Smirnov	data points	50
	ks stat	0.22		ks stat	9.24e-002
	alpha	5.e-002		alpha	5.e-002
	ks stat[50,5.e-002]	0.188		ks stat[50,5.e-002]	0.188
	p-value	1.3e-002		p-value	0.752
	result	REJECT		result	DO NOT REJECT
Anderson-Darling	data points	49	Anderson-Darling	data points	50
	ad stat	3.92		ad stat	0.525
	alpha	5.e-002		alpha	5.e-002
	ad stat[5.e-002]	2.49		ad stat[5.e-002]	2.49
	p-value	9.59e-003		p-value	0.722
	result	REJECT		result	DO NOT REJECT
Lognormal	minimum =	-0.474627	Uniform	minimum =	0.1839
	mu =	-0.328754		maximum =	0.3109
	sigma =	4.94696e-002	Kolmogorov-Smirnov	data points	50
Kolmogorov-Smirnov	data points	50		ks stat	9.13e-002
	ks stat	8.66e-002		alpha	5.e-002
	alpha	5.e-002		ks stat[50,5.e-002]	0.188
	ks stat[50,5.e-002]	0.188		p-value	0.764
	p-value	0.817		result	DO NOT REJECT
	result	DO NOT REJECT	Anderson-Darling	data points	48
Anderson-Darling	data points	50		ad stat	0.556
	ad stat	0.51		alpha	5.e-002
	alpha	5.e-002		ad stat[5.e-002]	2.49
	ad stat[5.e-002]	2.49		p-value	0.691
	p-value	0.737		result	DO NOT REJECT
	result	DO NOT REJECT			



## Desplazamiento 2: desde la estación de trabajo hasta el almacén de productos semiterminados

0.3145	0.1899	0.2729	0.2111	0.21
0.2297	0.2636	0.2855	0.2451	0.2085
0.2188	0.2497	0.2392	0.1989	0.2245
0.2333	0.2431	0.2206	0.2953	0.2622
0.2667	0.1941	0.2926	0.3135	0.1952
0.2271	0.1855	0.2714	0.2283	0.235
0.3067	0.2642	0.2219	0.2821	0.2666
0.243	0.3056	0.1934	0.1986	0.3013
0.2425	0.3048	0.2568	0.2326	0.1843
0.3061	0.2145	0.2599	0.2269	0.004

<b>Lognormal</b>		minimum =	4.e-003	
		mu =	-1.4324	
		sigma =	0.156343	
<b>Kolmogorov-Smirnov</b>		data points	50	
		ks stat	0.28e-002	
		alpha	5.e-002	
		ks sta[50,5.e-002]	0.188	
		p-value	0.855	
		result	DO NOT REJECT	
<b>Anderson-Darling</b>		data points	49	
		ad stat	0.434	
		alpha	5.e-002	
		ad sta[5.e-002]	2.49	
		p-value	0.815	
		result	DO NOT REJECT	
<b>Normal</b>		mean =	0.240832	
		sigma =	5.04095e-002	
<b>Kolmogorov-Smirnov</b>		data points	50	
		ks stat	0.111	
		alpha	5.e-002	
		ks sta[50,5.e-002]	0.188	
		p-value	0.532	
		result	DO NOT REJECT	
<b>Anderson-Darling</b>		data points	50	
		ad stat	0.921	
		alpha	5.e-002	
		ad sta[5.e-002]	2.49	
		p-value	0.402	
		result	DO NOT REJECT	
<b>Uniform</b>		minimum =	4.e-003	
		maximum =	0.3145	
<b>Kolmogorov-Smirnov</b>		data points	50	
		ks stat	0.561	
		alpha	5.e-002	
		ks sta[50,5.e-002]	0.188	
		p-value	2.55e-015	
		result	REJECT	
<b>Anderson-Darling</b>		data points	48	
		ad stat	22.9	
		alpha	5.e-002	
		ad sta[5.e-002]	2.49	
		p-value	0.	
		result	REJECT	

