

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ÁREA DE POSGRADO

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



“LABORATORIO VIRTUAL DE INGENIERÍA DE MÉTODOS”

TESIS

Que presenta para obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS

ING. CÉSAR ORLANDO SALAS MOROYOQUI

DIRECTOR DE TESIS:

M.C. JUAN CEBALLOS CORRAL

MEXICALI, B.C.

OCTUBRE DE 2010

Agradecimientos

A Rodrigo Pargo Rentería, por su gran apoyo.

Al Dr. Israel Saucedá Meza, por ser mi guía en el proceso de ingreso al programa.

Al Dr. Álvaro González Ángeles y al Dr. Jesús Márquez González, por sus recomendaciones para la elaboración de mi tesis.

Al MC Juan Ceballos Corral, mi director de tesis.

A la UABC, por ser mi segundo hogar.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo brindado.

A mi primo CP Jesús Noé Salas Leyva: sin su apoyo yo no estaría aquí.

ÍNDICE

Índice de tablas	vi
Índice de figuras	viii
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii
CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE	1
1.1 Introducción.....	2
1.2 Hipótesis	2
1.3 Objetivo	2
1.4 Metas	2
1.5 Justificación	2
1.6 Limitaciones del estudio.....	3
1.7 Definición de términos	3
1.8 Realidad virtual	3
1.8.1 ¿Qué es la realidad virtual?	3
1.8.2 Inicios de la realidad virtual	4
1.8.3 Elementos de un sistema de realidad virtual	5
1.8.4 Objetivos de la realidad virtual.....	5
1.9 Laboratorios virtuales	6
1.9.1 ¿Qué son los laboratorios virtuales?.....	6
1.9.2 Requisitos de los laboratorios virtuales	6
1.9.3 Historia de los laboratorios virtuales.....	6
1.9.4 Los laboratorios virtuales hoy	8
1.9.5 Niveles de los laboratorios virtuales.....	11

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	14
2.1 Simulación	15
2.1.1 ¿Por qué simular?	15
2.1.2 Simulando.....	16
2.1.3 Uso de la simulación	18
2.1.4 ¿Cuándo es apropiado simular?.....	20
2.1.5 Requisitos para simular	21
2.1.6 Justificación económica de la simulación	22
2.2 Sistemas	23
2.2.1 Dinámica de sistemas	23
2.2.2 Técnicas de análisis de sistemas.....	32
2.3 Bases de la simulación.....	36
2.3.1 Tipos de simulación.....	36
2.4 Simulación de comportamiento aleatorio	38
2.4.1 Generación de números aleatorios.....	38
2.4.2 Números aleatorios	41
2.5 Simulación de eventos discretos.....	44
2.5.1 Simulación de eventos continuos vs. discretos.....	44
2.5.2 Ecuaciones diferenciales	45
2.5.3 Ecuaciones de diferencia	45
2.5.4 Simulación continua y discreta combinada	45
2.5.5 Forma de trabajar de la simulación de eventos discretos	46
2.5.6 Ejemplo de una simulación manual de eventos discretos	47
2.6 Programas comerciales de simulación.....	50

2.6.1 Quest.....	52
2.6.2 Arena	53
2.6.3 Witness	54
2.6.4 DELMIA.....	55
2.6.5 Plant Simulation	57
2.6.6 ProModel	58
2.7 Lenguajes de simulación y simuladores	60
2.7.1 Lenguajes vs. simuladores.....	60
2.8 Futuro de la simulación	62
2.9 Estadística.....	62
2.9.1 Descripción de un conjunto de mediciones: métodos gráficos	63
2.9.2 Descripción de un conjunto de mediciones: métodos numéricos.....	64
2.9.3 ¿Cómo se hacen las inferencias?	67
2.9.4 Muestreo	68
2.9.5 Pruebas de hipótesis	73
2.9.6 Pruebas de bondad de ajuste.....	87
2.10 Ingeniería industrial.....	93
2.10.1 Importancia de la productividad.....	93
2.10.2 Balanceo de líneas de ensamble	94
2.10.3 Línea de fabricación y línea de ensamble.....	95
2.11 Ingeniería de métodos.....	95
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS EXPERIMENTAL.....	98
3.1 Introducción.....	99
3.2 Metodología.....	100

3.3 Aplicación del QFD.....	101
3.3.1 El gráfico de calidad.....	101
3.3.2 El gráfico de despliegue de elementos de calidad.....	103
3.3.3 Bosquejo del despliegue de funciones de calidad.....	105
3.3.4 Elección del tamaño apropiado de la muestra.....	109
3.3.5 Características requeridas de cada práctica.....	124
3.4 Simulación de las prácticas del laboratorio virtual.....	124
3.4.1 Formulación del problema del estudio de simulación.....	124
3.4.2 Construcción del modelo conceptual.....	125
3.4.3 Modelación de las prácticas del laboratorio virtual.....	127
3.4.4 Construcción del modelo de simulación.....	139
3.4.5 Realización de corridas piloto.....	140
3.4.6 Diseño y ejecución de experimentos.....	142
3.4.7 Realización de corridas de producción.....	142
3.4.8 Análisis de resultados de salida.....	143
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	144
4.1 Resultados.....	145
4.1.1 Comparación de la práctica 1.....	145
4.1.2 Comparación de la práctica 2.....	147
4.1.3 Comparación de la práctica 3.....	148
4.1.4 Comparación de la práctica 4.....	148
4.1.5 Comparación de la práctica 5.....	150
4.1.6 Comparación de la práctica 6.....	151
4.1.7 Comparación de la práctica 7.....	152

4.1.8 Comparación de la práctica 8	153
4.1.9 Comparación de la práctica 9	154
CONCLUSIONES.....	155
RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS	157
REFERENCIAS	158
ANEXOS	161

Índice de tablas

Tabla 1. Tipos de variación aleatoria típicas.	27
Tabla 2. Ejemplo de un generador lineal congruencial $Z_i = (1Z_i - 1 + 3) \bmod 6$	39
Tabla 3. Comparativo de distintos <i>software</i> de simulación.	60
Tabla 4. Posibles muestras no ordenadas de tamaño $n = 2$	68
Tabla 5. Números generados por un algoritmo.	89
Tabla 6. Valores críticos para la prueba de Smirnov – Kolmogorov.	91
Tabla 7. Valores agrupados para ejercicio de prueba S – K.	92
Tabla 8. Conversión de expresiones del cliente en datos reformulados.	101
Tabla 9. Resultados de la encuesta.	112
Tabla 10. Características obtenidas de las entrevistas con profesores.	112
Tabla 11. Conversión de las expresiones del cliente.	113
Tabla 12. Relación entre los elementos demandados y los elementos de calidad.	115
Tabla 13. Diagrama de matriz-L.	116
Tabla 14. Diagrama de matriz con las evaluaciones competitivas de tres laboratorios.	116
Tabla 15. Valores meta del laboratorio virtual.	117
Tabla 16. <i>Ratio</i> de mejoramiento de las demandas del consumidor.	118
Tabla 17. Peso de la fila del gráfico de calidad.	118
Tabla 18. Peso de las columnas del gráfico de calidad.	120
Tabla 19. Características óptimas de cada práctica.	124
Tabla 20. Componentes aleatorios de la práctica 1.	127
Tabla 21. Entidades de la práctica 1.	128
Tabla 22. Recursos de la práctica 1.	128
Tabla 23. Locaciones de la práctica 1.	128

Tabla 24. Componentes aleatorios de la práctica 2.	130
Tabla 25. Entidades de la práctica 2.	130
Tabla 26. Recursos de la práctica 2.	131
Tabla 27. Locaciones de la práctica 2.	131
Tabla 28. Componentes aleatorios de la práctica 3.	133
Tabla 29. Entidades de la práctica 3.	133
Tabla 30. Locaciones de la práctica 3.	134
Tabla 31. Componentes aleatorios de la práctica 4.	135
Tabla 32. Entidades de la práctica 4.	135
Tabla 33. Locaciones de la práctica 4.	136
Tabla 34. Componentes aleatorios de la práctica 5.	137
Tabla 35. Entidades de la práctica 5.	137
Tabla 36. Locaciones de la práctica 5.	138
Tabla 37. Períodos de operación de las prácticas.	141
Tabla 38. Valores p de las operaciones en la práctica 1.	146
Tabla 39. Valores p de las operaciones en la práctica 2.	147
Tabla 40. Valores p de las operaciones en la práctica 4.	149
Tabla 41. Valores p de dos operaciones en la práctica 5.	150
Tabla 42. Valores p de las operaciones en la práctica 6.	152
Tabla 43. Valores p de las operaciones en la práctica 7.	152
Tabla 44. Valores p de las operaciones en la práctica 8.	153

Índice de figuras

Figura 1. <i>Virtual frog dissection kit</i>	8
Figura 2. <i>New Cannon</i> , Oregon university.....	8
Figura 3. Laboratorios virtuales de física, Oregon university.....	9
Figura 4. Laboratorio virtual de Madrid.....	9
Figura 5. Experimentos disponibles en el laboratorio virtual de Oxford university.....	10
Figura 6. Tableros <i>LiveWire</i>	10
Figura 7. Proceso de experimentación por simulación.....	17
Figura 8. Costos de hacer cambios en las estaciones subsecuentes del desarrollo del sistema.....	22
Figura 9. Comparación de los costos acumulativos del sistema con y sin simulación.....	23
Figura 10. Elementos de un sistema.....	24
Figura 11. Curvas de costos que muestran el número óptimo de recursos.....	30
Figura 12. Diagrama de cuatro pasos para mejora en el enfoque de sistemas.....	31
Figura 13. La simulación mejora la predicción del desempeño.....	32
Figura 14. Configuración de un sistema de colas.....	33
Figura 15. Ejemplos de una (a) simulación determinística y (b) simulación estocástica.....	37
Figura 16. Ejemplos de distribución de probabilidad discreta y continua.....	38
Figura 17. Método de la transformación inversa para variables continuas.....	42
Figura 18. Método de la transformación inversa para variables discretas.....	43
Figura 19. Comparación entre una variable de estado discreto y una con cambio continuo.....	44
Figura 20. Diagrama lógico de cómo funciona la simulación de eventos discretos.....	46
Figura 21. Flujo de las entidades en el ejemplo del sistema ATM.....	47
Figura 22. Componentes típicos de un programa de simulación.....	50
Figura 23. Modelo tridimensional elaborado en el <i>software</i> Quest.....	53

Figura 24. Modelo de simulación elaborado en el <i>software</i> Arena.	54
Figura 25. Modelo tridimensional elaborado en el <i>software</i> Witness.	55
Figura 26. Modelo tridimensional elaborado en el <i>software</i> DELMIA.	57
Figura 27. Modelo tridimensional elaborado en el <i>software</i> Plant Simulation.	58
Figura 28. Modelo tridimensional elaborado en el <i>software</i> ProModel.	59
Figura 29. Nuevo paradigma acerca de la facilidad de uso y flexibilidad.	61
Figura 30. Histograma de frecuencias relativas.	63
Figura 31. Distribución de frecuencias relativas.	64
Figura 32. Distribución de frecuencias con la misma media, pero diferentes varianzas.	65
Figura 33. Curva normal.	66
Figura 34. Distribuciones muestrales del estimador $\hat{\theta}$ para diversos valores de θ	75
Figura 35. Región de rechazo para muestras grandes de $H_0: \theta = \theta_0$ frente a $H_1: \theta > \theta_0$	75
Figura 36. Región de rechazo para el ejemplo 5.	78
Figura 37. Valor p para el ejemplo 6.	81
Figura 38. Regiones de rechazo RR	84
Figura 39. Región de rechazo RR para probar $H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ frente a $H_1: \sigma_1^2 > \sigma_2^2$	86
Figura 40. Representación gráfica de e_i y O_i	88
Figura 41. Método KJ para agrupar la información expresada en palabras.	102
Figura 42. Extracción de elementos de calidad.	102
Figura 43. Gráfico de calidad.	104
Figura 44. Planificación de calidad.	105
Figura 45. Diseño de calidad.	106
Figura 46. Despliegue de subsistema.	107
Figura 47. Gráfico de planificación de proceso QC (carcasa superior).	108

Figura 48. Gráfico de calidad obtenido al aplicar el QFD.....	123
Figura 49. Gráfico de la operación Aserrado aproximado de bastidores.	145
Figura 50. Gráfico de la operación Barnizado.....	146
Figura 51. Gráfico de la operación Ensamblar dos llantas a eje.....	147
Figura 52. Gráfico de la operación Ensamblar guardafangos.	149
Figura 53. Gráfico de la operación Servir un plato con comida.....	150
Figura 54. Gráfico de la operación Servir un plato con postre.....	150
Figura 55. Gráfico de la operación Ensamblar abrazadera.....	151
Figura 56. Gráfico de la operación Ensamblar tuerca.	151
Figura 57. Gráfico de la operación Ensamblar vástago.....	152
Figura 58. Gráfico de la operación Sellado.	153

RESUMEN

El presente trabajo de tesis se desarrolló con la finalidad de crear un laboratorio virtual de ingeniería de métodos, para que los estudiantes tuvieran acceso a procesos de empresas reales en una forma virtual.

Para determinar las características de las prácticas contenidas en el laboratorio virtual, se aplicó el método QFD (Despliegue de Funciones de Calidad) el cuál sirvió como justificación al recoger todas las demandas y necesidades del cliente.

Una vez obtenidas las características óptimas de cada práctica, éstas se programaron en el *software* de simulación *ProModel*. La programación fue la tarea más ardua en el desarrollo del proyecto debido a que hubo muchos errores.

Las metas del proyecto fueron:

- Estructuración de las prácticas virtuales.
- Modelación de las prácticas virtuales.
- Aplicación del laboratorio virtual.
- Mejoramiento del laboratorio virtual.

Todas las metas se cumplieron en tiempo y forma.

Finalmente, se hizo una comparación entre los resultados arrojados por el laboratorio virtual y la realidad. Con esto se demostró que el comportamiento del laboratorio virtual es semejante a la realidad.

ABSTRACT

The main goal of this thesis was to create a virtual lab, so the students could have access to real processes.

The virtual lab characteristics were defined by using QFD (Quality Function Deployment) method; these characteristics were programmed in *ProModel* (simulation software). The programming was the hardest part of the project.

The first step to build the virtual lab was the design and construction of the lab sessions. The second step was the lab sessions programming in *ProModel*. The third step was the virtual lab testing, it was done by a group of students. The last step was the virtual lab improvement, which included several modifications.

Finally, a comparison between the virtual lab and reality was done. This proved that the virtual lab is like reality.

CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE

1.1 Introducción

En las últimas décadas el desarrollo tecnológico ha llevado a la creación de la realidad virtual, generando una serie de prototipos y simulaciones muy sofisticadas que son utilizadas en las diferentes áreas del conocimiento como herramienta para la solución de múltiples tareas. [1]

1.2 Hipótesis

El laboratorio virtual de ingeniería de métodos ofrecerá los mismos resultados que los laboratorios reales.

1.3 Objetivo

Elaborar un laboratorio virtual de ingeniería de métodos.

1.4 Metas

Los proyectos amplios tienden a convertirse en tareas tediosas, sobre todo para el investigador principiante. Lo aconsejable es dividir el trabajo y asignar fechas exactas para cada una de las secciones. Éste es el plan de trabajo. Se puede modificar el calendario cada vez que se encuentre retrasado, pero el hecho de tener una fecha fija obliga a trabajar de forma constante. [2]

A continuación se presentan las metas:

1. Estructuración de las prácticas de laboratorio (Desde el 1 de septiembre de 2008 hasta diciembre de 2008).
2. Modelación de las prácticas en el *software ProModel* (Desde enero de 2009 hasta diciembre de 2009).
3. Aplicación de las prácticas virtuales (Desde agosto de 2009 hasta diciembre de 2009).
4. Mejoramiento de las prácticas virtuales (A partir de enero de 2010).

1.5 Justificación

Un laboratorio virtual de ingeniería de métodos ampliará la capacidad de atención a los alumnos, mostrará el funcionamiento virtual de una empresa real y permitirá una gran variedad de modificaciones a las prácticas; todo esto en una pantalla de computadora.

1.6 Limitaciones del estudio

1. Realizar cualquier práctica virtual nunca reemplazará a hacer lo mismo en la vida real, porque hay factores que nunca podrán integrarse en la realidad virtual.
2. El objetivo de este proyecto es elaborar un laboratorio virtual de las prácticas que se llevan a cabo en los laboratorios de ingeniería de métodos, esto es, un laboratorio virtual del nivel 2 (ver “1.9.5 Niveles de los laboratorios virtuales”), por lo que las opciones de interacción entre el usuario y el ambiente virtual serán limitadas.

1.7 Definición de términos

Inteligencia artificial. Disciplina que se encarga de construir procesos que al ser ejecutados sobre una arquitectura física producen acciones o resultados que maximizan una medida de rendimiento determinada, basándose en la secuencia de entradas percibidas y en el conocimiento almacenado en tal arquitectura. [3]

Holística. Se refiere a la manera de ver las cosas enteras, en su totalidad, en su conjunto, en su complejidad. [4]

Preceptiva. Que contiene preceptos, es obligatorio o debe ser obedecido: reglamento preceptivo. [5]

Interdependencia. Es la dinámica de ser mutuamente responsable y de compartir un conjunto común de principios con otros. [6]

Benchmarking. Anglicismo definido como un proceso sistemático y continuo para evaluar comparativamente los productos, servicios y procesos de trabajo en organizaciones. [7]

Heurística. Capacidad de un sistema para realizar de forma inmediata innovaciones positivas para sus fines. [8]

1.8 Realidad virtual

1.8.1 ¿Qué es la realidad virtual?

"La realidad virtual es un medio compuesto por simulaciones de computadora interactivas que reaccionan a la posición y acciones del usuario, por lo que producen retroalimentación en uno o más sentidos, generando la sensación de estar inmerso o presente en una simulación". [1]

Otra, podría ser la definición que da la enciclopedia Santillana: “*virtual es lo que tiene la posibilidad o la capacidad de ser o producir lo que expresa el sustantivo, aunque actualmente no lo es o no lo ha producido todavía*”. Dado que es una tecnología en evolución, cualquier definición actual de realidad virtual debe ser considerada sólo con carácter transitorio. [9]

Un ambiente virtual es una simulación por computadora que proporciona información a uno o varios de nuestros sentidos: visión, sonido, tacto y gusto, con el propósito de que el usuario se sienta inmerso en un mundo que reacciona ante sus acciones.

1.8.2 Inicios de la realidad virtual

En 1940, Link Aviation fabrica los primeros simuladores de vuelo en los Estados Unidos. Los simuladores de vuelo, aunque no utilizaban los computadores en sus comienzos, siempre han sumergido al usuario en un ambiente artificial que responde a sus acciones. Se puede decir entonces que desde sus primeras versiones eran ya una aproximación a la realidad virtual. [10]

En 1952 aparecen otras manifestaciones de simulación como es el simulador de vuelo mecánico. Algunos expertos consideran que ese año es la fecha de nacimiento de la realidad virtual.

En 1958 la Philco corporation desarrolla un sistema basado en un dispositivo visual de casco controlado por los movimientos de la cabeza del usuario. [9]

Aunque la idea generalizada de la realidad virtual comenzó a gestarse en estamentos militares (fuerza aérea, marina), con la colaboración de la NASA, en realidad los primeros conocimientos de esta tecnología surgieron simultáneamente en varios frentes, siendo los laboratorios de las universidades los lugares de trabajo más activos. En 1966 Ivan Sutherland construyó el primer dispositivo estereoscópico controlado por computadora y tres años más tarde, el departamento de defensa de los Estados Unidos financió el primer casco de visualización. [1]

En 1969 la NASA puso en marcha un programa de investigación con el fin de desarrollar herramientas adecuadas para la formación, con el máximo realismo posible, de posteriores tripulaciones espaciales. [9]

A finales de la década de los sesenta, comenzó una etapa de intenso trabajo en torno a la realidad virtual, cuando la fuerza aérea de los EE. UU. tuvo la idea de sumergir a los pilotos en simuladores de entrenamiento en la base Wright Patterson, en Dayton Ohio. Los pilotos vivían la experiencia simulada de encontrarse dentro de una aeronave y eran capaces de probar situaciones de vuelo específicas en cualquier punto en el tiempo.

Este y otros proyectos similares demostraron que la simulación por computadora y la visualización asociada podían emplearse para crear valiosos escenarios útiles para el entrenamiento.

En 1979, se dio a conocer el primer simulador de vuelo totalmente basado en computadora; Ivan Sutherland, construyó el primer sistema de realidad virtual con gráficos vectoriales y rastreo mecánico de cabezas.

En 1985 se produjeron los primeros *googles* (visores) estereoscópicos prácticos con sonido estéreo en la universidad de Carolina del Norte. [1]

1.8.3 Elementos de un sistema de realidad virtual

- Simulación: La simulación para modelar un sistema, tiene que ser realista. En la simulación del modelo o del mundo a experimentar, debe existir una serie de normas, las cuales no tienen que ser necesariamente iguales a las de la vida real.
- Interacción: La interacción es necesaria para tener control de la exploración del sistema; de no tenerla, el sistema no deja de ser una simple película o visita guiada. Para la interacción existen diversas interfases que van desde teclados hasta guantes o trajes.
- Percepción: Es el factor más importante, ya que la mayoría de los sistemas de realidad virtual se dirigen principalmente a los sentidos.

Características de la realidad virtual

- Responde a la metáfora de "mundo" que contiene "objetos" y opera en base a reglas de juego que varían en flexibilidad dependiendo de su compromiso con la inteligencia artificial.
- Se expresa en lenguaje gráfico tridimensional.
- Su comportamiento es dinámico y opera en tiempo real.
- Incorporación del usuario en el "interior" del medio computarizado.
- Requiere que haya una "suspensión de la incredulidad" para lograr la integración del usuario al mundo virtual al que ingresa.
- Posee la capacidad de reaccionar ante el usuario, ofreciéndole, en su modalidad más avanzada, una experiencia inmersiva, interactiva y multisensorial. [9]

1.8.4 Objetivos de la realidad virtual

- Crear un mundo posible, crearlo con objetos, definir las relaciones entre ellos y la naturaleza de las interacciones entre los mismos.
- Poder presenciar un objeto o estar dentro de él, es decir, penetrar en ese mundo que sólo existirá en la memoria del observador.
- Interacción de varias personas en entornos que no existen en la realidad, sino que han sido creados para distintos fines. En estos entornos el individuo solo debe preocuparse por actuar, ya que el espacio que antes se debía imaginar, es facilitado por medios tecnológicos.

1.9 Laboratorios virtuales

1.9.1 ¿Qué son los laboratorios virtuales?

Una de las definiciones de “laboratorios virtuales” que se ha aplicado a la enseñanza a distancia es la de Monge-Nájera (1999), que las definen como “simulaciones de prácticas manipulativas que pueden ser hechas por el estudiante lejos de la universidad y el docente”. Los laboratorios virtuales son imitaciones digitales de prácticas de laboratorio o de campo, reducidas a la pantalla de la computadora (simulación bidimensional) o en sentido estricto, a una visión más realista con profundidad de campo y visión binocular, que requiere que la persona se coloque un casco de realidad virtual.

1.9.2 Requisitos de los laboratorios virtuales

Kappelman (2002) presenta los requisitos de un buen laboratorio virtual:

1. Ser auto contenido.
2. Ser interactivo.
3. Combinar imágenes bidimensionales y tridimensionales.
4. Tener animación tridimensional, video y sonido.
5. Incluir ejercicios (cuya calificación puede ser enviada automáticamente al docente).
6. Instalación automática.
7. Que la navegación no sea necesariamente lineal.
8. Posibilidad de guardar notas sin necesidad de procesador de textos externo.
9. Un buscador.

1.9.3 Historia de los laboratorios virtuales

Los laboratorios computarizados, también llamados laboratorios virtuales, tienen su principal antecedente en Estados Unidos y en el Reino Unido, desde hace más de veinticinco años.

Robert Tinker (EE.UU.) fue pionero en la década de 1980, desarrollando la idea de equipar a las computadoras con dispositivos para realizar experimentos de ciencias en tiempo real y utilizando las redes de computadoras para que los alumnos compartieran la adquisición de datos, la información derivada de su proceso y sus propios recorridos de investigación, desde una perspectiva de aprendizaje colaborativo. [11]

Robert Tinker actualmente es presidente de *The Concord Consortium*, Concorde, Massachussets, EE.UU., una organización sin fines de lucro especializada en tecnología educativa y en particular, en proyectos fuertemente vinculados con la química.

A nivel institucional, el TERC (*Technology Education Research Center*), creado en 1965, constituyó un hito fundamental en la investigación y desarrollo del aprendizaje de la matemática y las ciencias, basado en el uso de tecnología de base electrónica. Aún hoy sigue trabajando las ciencias en forma transdisciplinaria, con la modalidad de proyectos. También en Estados Unidos se creó, en 1982, la división educativa de la ACS (*American Chemical Society*).

Por otro lado, la Europa más desarrollada tecnológicamente recorrió su propio camino, hoy centralizado en el Reino Unido. Secundado por Holanda y los países escandinavos, el Reino Unido fue el primer país que desarrolló proyectos basados en el uso de tecnologías de base electrónica para el aprendizaje de las ciencias y en especial, de la química.

Todas estas organizaciones abarcan, y siempre lo hicieron, desde los fundamentos pedagógicos y didácticos de la simulación de procesos, hasta el diseño y desarrollo de los dispositivos físicos de experimentación (interfases analógico-digitales, sensores y sondas) y el *software* basado en la modelización científica.

Forrester (1968), reconocido como el padre de la modelización dinámica (y creador del diagrama de flujos), sostenía que la creación y ejecución de modelos dinámicos tenía como principal objetivo clarificar los propios modelos mentales y promover una comprensión más profunda de sistemas complejos. Gee (1978) observó el paralelo entre la creación de modelos como una heurística para el desarrollo de una teoría científica y el modelo en sí mismo como una herramienta pedagógica para el crecimiento intelectual del alumno.

Para el inicio de los 90 los sistemas de realidad virtual emergen de los ambientes de laboratorio en búsqueda de aplicaciones comerciales.

En 1994, en la universidad de Carolina del norte, Fred Srools y Henry Fuchs experimentaron con la visualización en implementaciones médicas y científicas, también en aplicaciones arquitectónicas en las cuales el usuario podía caminar a través de un modelo CAD. [1]

Algunos otros laboratorios comenzaron a desarrollarse en 1997 en el centro de investigación académica de la universidad estatal a distancia de Costa Rica. Si se juzga con base en la información disponible en Internet, fueron de los primeros laboratorios virtuales para enseñanza a distancia a nivel mundial. Cuatro años después, había un proyecto comercial similar, el *virtual frog dissection kit 1.0* (“Equipo de Disección de Rana Virtual”) (figura 1) y otros proyectos académicos: *virtual hand laboratory*, (“Laboratorio de Mano Virtual”), university of British Columbia [12], *diffusion processes virtual laboratory* (“Laboratorio Virtual de Procesos de Difusión”) desarrollado por Johns Hopkins university [13] y *the virtual microscope* (“Microscopio Virtual”) por la universidad de Winnipeg [14]. Había también un proyecto con nivel de realidad virtual, nivel que requiere cascos tipo VR, en Estados Unidos y Canadá, llamado *NASA virtual reality object manipulation*, (“Manipulación de Objeto de Realidad Virtual de la NASA”) [15].



Figura 1. Virtual frog dissection kit.

No se sabe de proyectos similares en América Latina, fuera del de la UNED. En tal universidad, el primer bloque se desarrolló durante tres años y correspondió al curso de biología. El objetivo básico no ha cambiado desde entonces: lograr un producto tan bueno como los de los países más avanzados en docencia electrónica, a un costo muy inferior al de ellos y que solo requiriera programas que son gratuitos en todo el mundo.

1.9.4 Los laboratorios virtuales hoy

La mayoría de los laboratorios virtuales en la actualidad se refieren al área de la física, aunque también los hay de química y biología. La mayor parte de los laboratorios de física son pequeñas simulaciones escritas en JAVA, un lenguaje de programación interactivo. Ejemplo de los tipos de micro prácticas en física son los de la universidad nacional de Columbia, Oregon university [16] y un material privado brasileño llamado “sala de física” [17].

En la figura 2 se presenta una imagen del laboratorio virtual “New cannon” donde el usuario debe llenar distintos campos y en base a esto se observará la trayectoria de la bala de cañón.

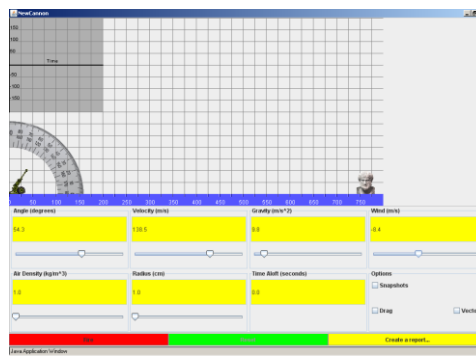


Figura 2. New Cannon, Oregon university.

En la figura 3 se muestra la página principal de los laboratorios virtuales de Oregon university. Los temas son: astrofísica, energía y ambiente, mecánica y termodinámica.



Figura 3. Laboratorios virtuales de física, Oregon university.

También hay simulaciones donde se modifican datos en una tabla y se ve la modificación resultante en un esquema, en el centro nacional de información y comunicación educativa de Madrid [18] (figura 4).

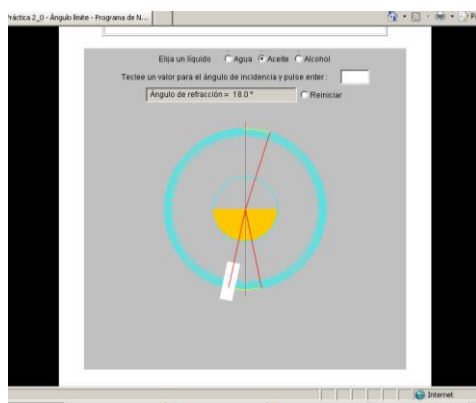


Figura 4. Laboratorio virtual de Madrid.

Un nivel algo más avanzado existe en dos laboratorios en los que se usan sonido e imágenes realistas, en lugar de esquemas: el sintetizador de sonido “Tempes” de la compañía *Virtual Laboratories* de Singapur y el "filtro de polarización" de la red *physicsweb* [19].

Los laboratorios virtuales de química parecen ser escasos. La Oxford university presenta, de manera gratuita vía Internet, laboratorios virtuales de experimentos químicos que usan animaciones, videos y moléculas que pueden hacerse girar en la pantalla, manipulables en tres dimensiones [20]. El estudiante debe responder a una serie de preguntas, y si lo hace correctamente, tiene acceso a una fotografía de la mesa de trabajo de la cual puede seleccionar compuestos y experimentos para ver videos sobre su uso. En algunas escenas aparecen rótulos de apoyo que explican el procedimiento. Hay además un texto sobre química en formato HTML con problemas y cuestionarios (figura 5).

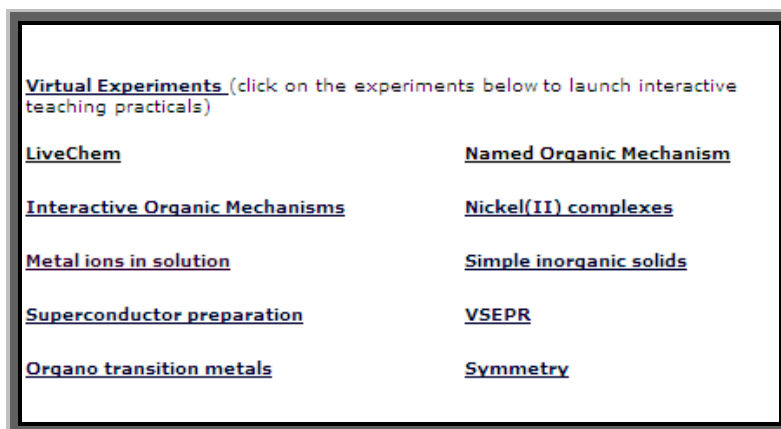


Figura 5. Experimentos disponibles en el laboratorio virtual de Oxford university.

La disponibilidad de laboratorios virtuales de biología es intermedio entre los de física y química. [21]

En la actualidad se ha desarrollado una arquitectura básica para el desarrollo de una variedad casi ilimitada de laboratorios virtuales. En ellos, los científicos de disciplinas muy diversas son capaces de penetrar en horizontes antes inalcanzables gracias a la posibilidad de estar ahí: dentro de una molécula, en medio de una violenta tormenta o en una galaxia distante.

Profesionales de otros campos, como la medicina, economía y exploración espacial, utilizan los laboratorios virtuales para una gran variedad de funciones. Los cirujanos pueden realizar operaciones simuladas para ensayar las técnicas más complicadas, antes de una operación real. Los economistas exploran un modelo de acción de un sistema económico para poder entender mejor las complejas relaciones existentes entre sus distintos componentes, etcétera. [9]

Un ejemplo de laboratorio virtual de circuitos es *LiveWire*, el cual permite simular y experimentar con circuitos para saber cómo funcionan sin tener que montarlos, al igual que otro *software* como lo es el *Circuit Maker*.

En la figura 6 se puede observar la representación virtual de un circuito eléctrico.

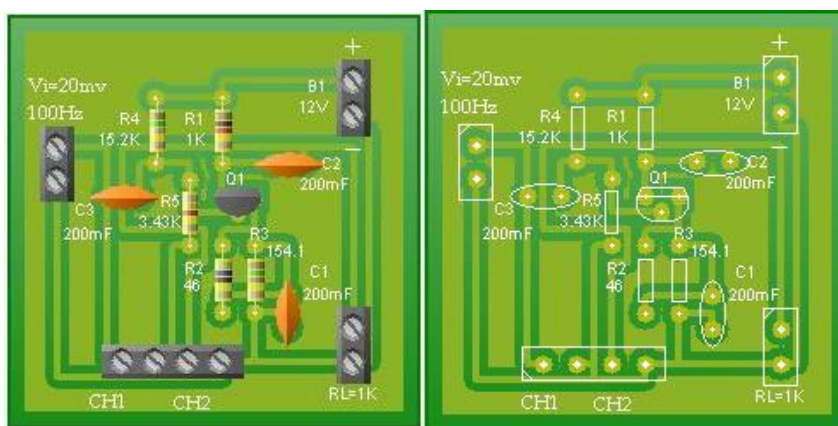


Figura 6. Tableros *LiveWire*.

Realmente *LiveWire* permite hacer simulaciones virtuales empleando animación y sonido que demuestran los principios de funcionamiento de los circuitos electrónicos, teniendo la oportunidad de visualizar qué ocurre con el desempeño del circuito cuando se realiza alguna modificación. Es decir, si se quiere montar un circuito y no hay seguridad de que va a funcionar, primero se puede dibujar con *LiveWire* y después averiguar cómo se comporta.

En este laboratorio podemos encontrar: interruptores, transistores, diodos, circuitos integrados, bobinas, resistencias, capacitores y cientos de otros componentes que pueden ser conectados para investigar los conceptos de voltaje, corriente y carga. [22]

1.9.5 Niveles de los laboratorios virtuales

El nivel más sencillo es el que tiene básicamente un texto y dibujos sin movimiento. Ejemplos de este nivel son el *digital frog* de 1995 y el laboratorio virtual de nutrición de la UNED de 1997 (Monge-Nájera, 1998). *Digital frog* permite hacer una disección simulada de una rana, evitando los problemas éticos y psicológicos de hacerlo con un animal real. El laboratorio de nutrición de la UNED permite "alimentar" a una mascota digital o *tamagotchi* y ver los efectos de la dieta sobre su salud.

En un segundo nivel de complejidad, existen laboratorios que usan animaciones usando el formato GIF, compatible con Internet. Un ejemplo es el laboratorio virtual de reproducción de la UNED de 1997 (Monge-Nájera, 1998), en el cual se pueden seleccionar organismos para ver una animación que muestra su secuencia reproductiva, incluyendo imágenes de microscopio electrónico. El laboratorio virtual de depredadores y presas (UNED, 2002) permite variar la proporción de organismos en un ambiente y ver el efecto sobre la población.

El tercer nivel corresponde a los laboratorios que usan videos para mostrar prácticas verdaderas. Algunos ejemplos de laboratorios virtuales en este nivel son el laboratorio virtual de digestión desarrollado por la UNED en 1997 (Monge-Nájera, 1998) y el *digital frog 2*, versión mejorada del ya mencionado, en que además de las imágenes fijas hay videos donde se muestran algunas situaciones en el proceso de disecar ranas.

En el cuarto nivel de complejidad están aquellos laboratorios en los cuales se ven en pantalla objetos o escenas que pueden ser manipulados por el (la) estudiante. La UNED desarrolló entre 1997 y el 2002 una serie de laboratorios virtuales de este nivel. En el laboratorio virtual de tejidos humanos, se separan capas de tejidos de un cuerpo humano y se les lleva a un microscopio para verlos ampliados. El laboratorio virtual de ecología permite ubicar organismos en una pirámide ecológica y la computadora indica si se les ha ubicado correctamente. En el laboratorio virtual sobre lepidópteros (los lepidópteros son una orden de insectos que agrupa a mariposas y polillas), se puede manipular un panorama que simula el efecto de girar la cabeza mientras se camina por un bosque e incluso obtener información sobre cada organismo que se descubra. Laboratorios similares en su nivel son el *virtual drosophila Project* japonés (Kioda y Kitano, 1999) y *mouse genetics*.

En el quinto nivel se tienen laboratorios en que la falta de certeza en las mediciones y la variabilidad aleatoria de algunos parámetros limitan el control que tiene el usuario. Para

explicar esto se puede usar un símil: en las simulaciones actuales, se puede lanzar una canica digital a un frasco y si se apunta en la dirección correcta, cae dentro. En las futuras, factores como el viento y la oscuridad en la habitación digital afectarán la trayectoria: será más difícil acertar.

Estos laboratorios que imitan, por ejemplo, la falibilidad de la puntería humana, están siendo desarrollados en Quebec por Marc Couture y Alexandre Francis [23].

Algunos de los desarrollos más importantes se han dado en el área de los entretenimientos para adultos, tal vez por su gran potencial comercial, y ha seguido etapas de creciente complejidad.

Aunque todavía se vende una simulación básica de imagen y sonido con poca interactividad similar al nivel tercero o cuarto de los laboratorios ya descritos [24], se ha alcanzado ya el sexto nivel, con máquinas que permiten al usuario mirar una imagen y percibir en su piel las sensaciones correspondientes [25], aunque tiene muy poco control sobre la secuencia de eventos.

El séptimo nivel corresponde a la nueva tecnología que permite una interacción con otra persona conectada a la red Internet, usando casco y traje [26].

El octavo nivel, que una vez desarrollado podría permitir una buena relación costo/beneficio en los laboratorios virtuales, se relacionaría con reproducir experiencias mediante implantes eléctricos dentro del cuerpo. A pesar del enorme potencial de esta tecnología para el campo educativo, su desarrollo es todavía tan preliminar que es difícil juzgar si tendrá uso práctico en este y otros campos.

¿Cuándo se deben usar los laboratorios virtuales?

Si se parte de un prejuicio negativo contra los laboratorios virtuales, puede decirse que las simulaciones o "laboratorios virtuales" son incapaces de reemplazar a la vida real. Obviamente ello es cierto, al menos con los niveles 1° a 7°, pero si el laboratorio real no es posible o conveniente, el laboratorio virtual es bueno como sustituto o al menos para entrenamiento antes de realizar prácticas peligrosas, especialmente si se cuentan con simuladores mecánicos o realidad virtual en lugar de una simple pantalla. Como hacen automáticamente algunos cálculos rutinarios, liberan tiempo para comprender y dado que presentan los cambios de manera gráfica, facilitan el aprendizaje.

El futuro de los laboratorios virtuales

Dado que los laboratorios virtuales han demostrado su eficacia, es probable que en el futuro se vuelva común su venta mediante versiones protegidas contra copiado. El *digital frog*, que se vende por miles a escuelas secundarias en los Estados Unidos, tiene un precio de \$170 la copia, aunque el disco compacto tiene únicamente ese laboratorio.

Actualmente se está trabajando en niveles aún más cercanos a la realidad virtual, que serán aplicables a los laboratorios virtuales cuando estén disponibles los equipos necesarios para los estudiantes. [21]

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 Simulación

El diccionario americano *Oxford* (1980) define a la simulación como “una forma de reproducir las condiciones de alguna situación para fines de modelado, estudio, prueba, entrenamiento, etcétera.”

Schriber (1987), define a la simulación como “el modelado de un proceso o sistema de tal manera que las imitaciones del modelo respondan como el sistema real lo hace en los eventos que ocurren con el tiempo”. Así, estudiando el comportamiento del modelo, podremos obtener ideas acerca del sistema real.

En la práctica, la simulación es usualmente hecha usando *software* comerciales de simulación, como *ProModel*, que tienen modelos específicamente diseñados para capturar los comportamientos dinámicos de los sistemas. La información estadística es incluida durante la simulación y automáticamente resumida para su análisis.

Los programas modernos de simulación proporcionan una realística animación gráfica del sistema que está siendo modelado. Durante la simulación, el usuario puede ajustar la velocidad de la animación y cambiar los valores de los parámetros del modelo para ver qué sucede.

2.1.1 ¿Por qué simular?

Para evitar tomar decisiones al azar, la simulación nos permite validar el que las mejores decisiones están siendo tomadas o no. La simulación evita las costosas, largas y perturbadoras técnicas de prueba y error. Hoy día la competencia no permite pérdida de tiempo, por eso las técnicas de prueba y error ya no son adecuadas.

El poder de la simulación reside en el hecho de que brinda un método de análisis que no sólo es correcto y predictivo, sino que también es capaz de predecir correctamente el desempeño de los sistemas más complejos. Deming (1989) dijo: “la administración de un sistema es acción basada en predicción. La predicción racional requiere aprendizaje sistemático y comparación de los resultados de las predicciones a corto y a largo plazo provenientes de los posibles cursos de acción”. Precisamente ese tipo de previsión es lo que provee la simulación. Simulando los programas alternativos de producción, políticas de operación, niveles de personal, prioridades de trabajo, y cosas así, un administrador puede predecir más adecuadamente los resultados, y, por lo tanto, tomar mejores decisiones.

Cuando se usa una computadora para modelar un sistema antes de construirlo o probar las políticas de operación antes de ser implementadas, se pueden evitar algunas de las dificultades que frecuentemente se presentan en el inicio de un sistema nuevo o la modificación de alguno existente.

Las características de la simulación que la hacen una poderosa herramienta de toma de decisiones y planeación son:

- Captura la interdependencia de los sistemas.

- Informa la variabilidad en el sistema.
- Es suficientemente versátil para modelar cualquier sistema.
- Muestra el comportamiento con el paso del tiempo.
- Es menos costoso, consume menos tiempo y no es tan perturbador como experimentar en el sistema real.
- Brinda información sobre las medidas de desempeño múltiples.
- Es visualmente atractivo y atrae el interés de la gente.
- Proporciona resultados que son fáciles de entender y comunicar.
- Funciona en tiempo rápido, real o retardado.
- Obliga a prestar atención en los detalles de diseño.

Dado que la simulación informa acerca de las interdependencias y variación, puede proporcionar ideas acerca de las funciones dinámicas complejas del sistema que no pueden ser obtenidas usando otras técnicas de análisis. La simulación brinda a los programadores de sistemas, libertad para probar ideas de mejoramiento sin riesgo, y virtualmente, sin costo, pérdida de tiempo o daños al sistema real. Además, los resultados son visuales y cuantitativos con resultados estadísticos reportados automáticamente.

Incluso si no hay problemas cuando se analizan los resultados de la simulación, el hecho de desarrollar un modelo es, por sí mismo, benéfico porque obliga a pensar a través de los detalles operacionales del proceso. La simulación puede realizarse con información incorrecta, pero no con información incompleta. Frecuentemente las soluciones se presentan cuando el modelo ya está construido –antes de realizar cualquier simulación–. Es una tendencia humana el ignorar los detalles operacionales de un diseño o plan hasta la fase de implementación, cuando ya es muy tarde para tomar decisiones que tengan un impacto relevante.

La simulación promueve una actitud de “inténtalo y observa” que estimula la innovación y motiva a pensar “desde afuera”. Ayuda a profundizar en el sistema para encontrar soluciones. También pone punto final a los infructíferos debates acerca de cuál solución puede funcionar mejor y por cuánto. La simulación apresura el proceso de tomar decisiones proporcionando evidencias objetivas que son difíciles de refutar.

2.1.2 Simulando

La simulación es casi siempre parte de un proceso más largo de un diseño de sistema o mejoramiento de proceso. Las soluciones alternas son generadas y evaluadas, y la mejor solución es seleccionada e implementada. La simulación es realizada en la fase de evaluación. Primero, un modelo es desarrollado para una solución alterna. Cuando el modelo de

simulación es puesto en práctica, se pone en operación para el período de interés. Los datos estadísticos son reunidos y reportados al final de la simulación. Usualmente varias réplicas (simulaciones independientes) de la simulación son hechas. Promedios y varianzas de las réplicas son calculados para proporcionar estimaciones estadísticas del desempeño del modelo.

El procedimiento para hacer simulaciones sigue el método científico:

1. Formular una hipótesis.
2. Preparar el experimento.
3. Comprobar la hipótesis a través de la experimentación.
4. Sacar conclusiones acerca de la validación de la hipótesis.

En simulación, se formula una hipótesis acerca de cuál diseño o norma de operación funciona mejor. Después se prepara un experimento en forma de modelo de simulación para probar la hipótesis. Con el modelo, se realizan múltiples réplicas del experimento. Finalmente, se analizan los resultados de la simulación y obtenemos conclusiones acerca de la hipótesis.

Como se muestra en la figura 7, este proceso es repetido hasta que los resultados son satisfactorios.

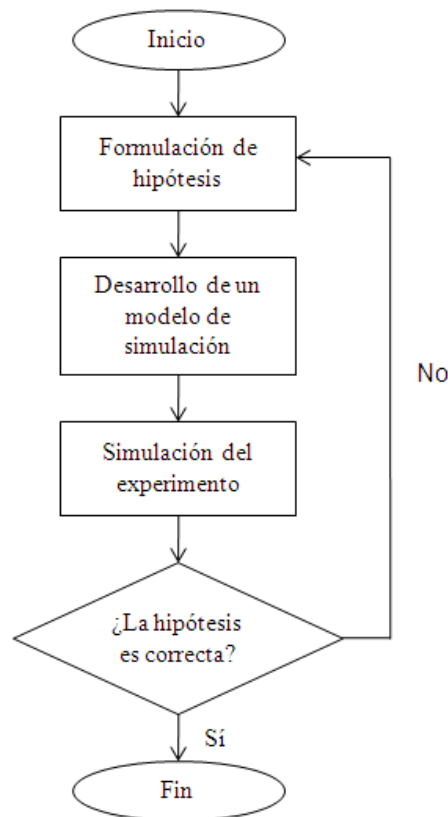


Figura 7. Proceso de experimentación por simulación.

Por ahora es obvio que la simulación por sí misma no es una herramienta de solución sino una herramienta de evaluación. La simulación describe cómo un sistema definido se comportará; no prescribe como debe de ser diseñado. La simulación no compensa la ignorancia de cómo se supone que un sistema debe de operar. Más que ser percibida como un sustituto de pensamiento, la simulación debe ser vista como una extensión de la mente que habilita a alguien para entender las dinámicas complejas de un sistema.

2.1.3 Uso de la simulación

La simulación empezó a ser usada en aplicaciones comerciales en 1960. Los modelos iniciales fueron usualmente programados en *FORTRAN* y eran constituidos por miles de líneas de códigos. La construcción de modelos no solamente era una tarea ardua, también era necesario depurarlos extensivamente para que los modelos funcionaran correctamente. Los modelos frecuentemente tomaban un año o más para construir y depurar, desafortunadamente, no se obtenían resultados útiles hasta después de tomar una decisión y hacer un compromiso monetario. Largas simulaciones eran desarrolladas en modalidad de lotes por computadoras centrales donde el tiempo de CPU era muy valorado. Los largos desarrollos de ciclos prohibían modificaciones mayores una vez que el modelo era construido.

En las últimas dos décadas la simulación ha ganado popularidad como una herramienta de toma de decisiones en las industrias manufactureras y de servicios. Para algunas compañías, la simulación se ha vuelto una práctica estándar cuando alguna instalación nueva está siendo planeada o un cambio de proceso está siendo evaluado.

El aumento de la popularidad de la simulación por computadora puede ser atribuido a lo siguiente:

- Incremento del entendimiento y conocimiento de la tecnología de simulación.
- Incremento de la disponibilidad, capacidad y facilidad del uso de los programas de simulación.
- Incremento de la memoria de las computadoras y las velocidades de procesamiento, especialmente de las computadoras personales.
- Reducción de las partes y programas de computadoras.

La simulación ya no es considerada un método de “último recurso”, tampoco es una técnica reservada para expertos en simulación. La disponibilidad de programas de simulación fáciles de usar y la ubicuidad (omnipresencia) de potentes computadoras han hecho a la simulación no solamente más accesible, sino más atractiva para los planeadores y administradores quienes tratan de evitar cualquier tipo de solución que parezca muy complicada. Una herramienta no es muy útil si es más complicada de usar que el problema que se está buscando resolver.

El uso primario de la simulación sigue siendo en el área de manufactura. Los sistemas de manufactura, que incluyen almacenes y sistemas de distribución, tienden a tener relaciones

claramente definidas y procedimientos formalizados que son bien adaptados al modelado por simulación. Las tendencias recientes a estandarizar y sistematizar otros procesos de negocios como el procesamiento de órdenes, facturaciones, y servicio al cliente, han aumentado la aplicación de la simulación en estas áreas también. Se ha observado que el 80 por ciento de todos los procesos de negocios son repetitivos y se pueden beneficiar por las mismas técnicas de análisis usadas para mejorar los sistemas de manufactura (Harrington, 1991).

Aunque el uso primario de la simulación es en la toma de decisiones, no está por ningún modo limitada a las aplicaciones que requieran de alguna decisión. El uso de la simulación en el área de la comunicación y la visualización va en aumento. Los programas de simulación modernos incluyen animaciones visuales que estimulan el interés en el modelo y comunica efectivamente las dinámicas de sistemas complejos. Una propuesta para un diseño de sistema nuevo puede ser vendida más fácilmente si se muestra cómo es que operará.

En una escala menor, la simulación está siendo usada para proveer entrenamiento interactivo basado en computadora donde a los aprendices de administrador se les da la oportunidad de desarrollar habilidades de toma de decisiones interactuando con el modelo durante la simulación. El poder de la simulación para capturar las dinámicas de sistemas tanto visual como funcionalmente, abre grandes oportunidades para su uso en ambientes integrados.

Aplicaciones típicas de la simulación

1. Planeación de flujo de trabajo.
2. Planeación de capacidad.
3. Reducción de tiempo de ciclo.
4. Planeación de personal y de recursos.
5. Prioridades de trabajo.
6. Análisis de cuello de botella.
7. Reducción de costos.
8. Reducción de inventario.
9. Análisis de salida.
10. Mejoramiento de producción.
11. Análisis de distribución.
12. Balanceo de líneas.
13. Optimización del tamaño del lote.

14. Programación de la producción.
15. Programación de recursos.
16. Programación de mantenimiento.
17. Diseño de sistemas de control.

2.1.4 ¿Cuándo es apropiado simular?

No todos los problemas que *pueden* ser resueltos con la ayuda de la simulación *deben* de ser resueltos usando la simulación. Es importante seleccionar la herramienta adecuada para cada tarea. Para algunos problemas, la simulación puede ser demasiado —como matar a una mosca usando una escopeta—. Como guía general, la simulación es apropiada si se cumplen los siguientes criterios:

- Una decisión operacional (lógica o cuantitativa) está siendo tomada.
- El proceso que está siendo analizado está bien definido y es repetitivo.
- Las actividades y los eventos son interdependientes y variables.
- El impacto en los costos de la decisión es más grande que el costo de hacer la simulación.
- El costo de experimentar en el sistema real es más grande que el costo de la simulación.

Las decisiones deben de ser de naturaleza operacional. Quizá la limitación más significativa de la simulación es su restricción a las cuestiones operacionales asociadas con la planeación de sistemas en la cual se busca una solución lógica o cuantitativa. La simulación no es muy útil resolviendo problemas cualitativos como aquellos que involucran cuestiones técnicas o sociológicas.

Los procesos deben de ser bien definidos y repetitivos. Si el proceso que está siendo modelado no sigue una secuencia lógica y se rige por algunas reglas definidas, será difícil de modelar. Si los comportamientos al azar pueden ser descritos usando expresiones y distribuciones de probabilidad, pueden ser simulados. Si la situación que se está modelando nunca más volverá a suceder, se obtienen pocos beneficios al simularla.

Las actividades y los eventos deben de ser interdependientes y variables. Un sistema puede tener varias actividades, pero si nunca interfieren unas con otras, o son determinísticas (que no tiene variación), entonces el uso de la simulación es innecesario. El número de actividades no es lo que hace a un sistema difícil de analizar, es el número de las actividades interdependientes, aleatorias. La combinación de interdependencia y comportamiento al azar es lo que produce resultados impredecibles.

El impacto en los costos de la decisión debe ser más grande que el costo de hacer la simulación. Algunas veces el impacto de alguna decisión es tan insignificante que ni siquiera vale el esfuerzo y el tiempo de hacer una simulación.

El costo de experimentar en el sistema real debe de ser más grande que el costo de hacer la simulación. La regla del pulgar nos dice que si una cuestión puede ser respondida a través de experimentación directa, rápida, barata y con impactos mínimos a la operación actual, entonces no hay que usar simulación.

2.1.5 Requisitos para simular

Para hacer a la simulación más accesible, los productos han sido desarrollados de manera que puedan ser usados en un nivel básico sin necesidad de mucho entrenamiento. Aunque la simulación continúa volviéndose más fácil de utilizar, esto no libra a los usuarios de aprender ciertas habilidades para hacer uso inteligente de ella.

Los modeladores deben de ser cuidadosos de su propia falta de conocimiento cuando se encuentren manejando las cuestiones estadísticas asociadas a la simulación. La simulación aplica la regla 80-20, donde el 80 por ciento de los beneficios pueden ser obtenidos conociendo sólo el 20 por ciento de la ciencia implicada (sólo hay que estar seguros de que se conoce el 20 por ciento adecuado). Solamente hasta que se requiere de análisis más precisos es cuando se necesita entrenamiento estadístico adicional y conocimiento en análisis experimentales.

Para obtener los mayores beneficios de la simulación, es útil tener un cierto grado de conocimientos y habilidades en las siguientes áreas:

- Administración de proyectos.
- Comunicación.
- Ingeniería de sistemas.
- Análisis estadístico y diseño de experimentos.
- Principios y conceptos de modelado.
- Habilidades básicas en programación y uso de computadora.
- Entrenamiento en uno o más productos de simulación.
- Familiaridad con el sistema que está siendo investigado.

Se ha comprobado que algunas personas aprenden simulación más rápido que otras. Las personas que tienen buen pensamiento abstracto y que ponen más atención a los detalles, son las más adecuadas para simular.

2.1.6 Justificación económica de la simulación

El costo es siempre una cuestión importante en los negocios, y en la simulación no es la excepción. La simulación no debe de ser usada si los costos exceden los beneficios esperados. El uso de la simulación en proyectos individuales está estimado entre el 1 y el 3 por ciento del costo total del proyecto (Glennay y Mackulak, 1985). Respecto al tiempo involucrado al simular, buena parte del esfuerzo en construir el modelo está en llegar a una clara definición de la operación del sistema. Con las avanzadas herramientas de modelado disponibles hoy día, el desarrollo del modelo real y la puesta en práctica de la simulación toman solamente una pequeña fracción (frecuentemente menos del 5 por ciento) del tiempo de diseño del sistema.

Gracias a la simulación se obtienen ahorros identificando y eliminando problemas e ineficiencias que podrían haber pasado desapercibidas hasta la implementación del sistema.

Una dificultad que se presenta al desarrollar una justificación económica de la simulación es el hecho de que usualmente no se sabe cuánto se ahorrará de antemano.

Una forma de asegurar de antemano los beneficios económicos de la simulación es mostrar el riesgo de hacer malos diseños y decisiones operacionales. Sólo se necesita preguntar cuál es el costo potencial que producirá el tomar una mala decisión en la planeación de sistemas.

Los verdaderos ahorros de la simulación se obtienen al permitir a los diseñadores el cometer errores de diseño y trabajarlos en el modelo en lugar de hacerlo en el sistema real. El concepto de reducir los costos a través del trabajo sobre los problemas en la fase de diseño que después de que el sistema ha sido implementado está mejor ilustrado por *la regla de diez*. Este principio establece que el costo de corregir un problema se incrementa por diez en cada estación de diseño por las cuáles pasa sin ser detectado (ver figura 8).

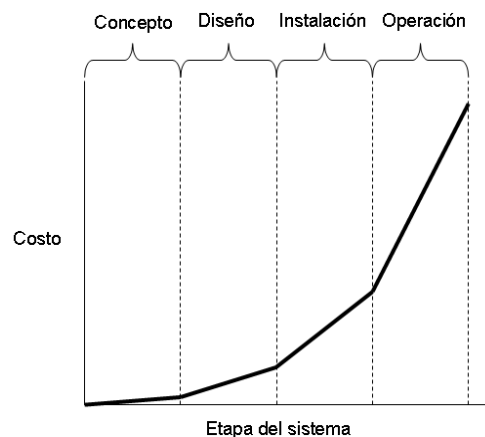


Figura 8. Costos de hacer cambios en las estaciones subsecuentes del desarrollo del sistema.

La simulación ayuda a evitar algunos de los costos asociados a las malas decisiones que se hacen más adelante. La figura 9 muestra cómo el costo acumulativo resultado del diseño de sistemas por simulación se puede comparar con el costo del diseño y operación de sistemas sin el uso de la simulación. Nótese como los costos a corto plazo son ligeramente altos debido a la

ardua labor y los costos de los programas de simulación de computadora. Los costos a largo plazo asociados con las inversiones de capital y la operación de sistemas son considerablemente menores debido a la eficiencia de la simulación.

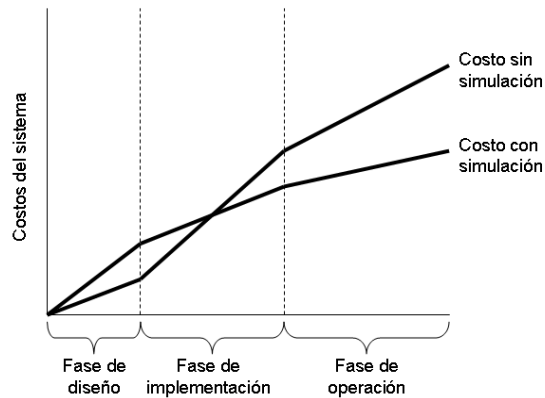


Figura 9. Comparación de los costos acumulativos del sistema con y sin simulación.

Incluso si no se obtienen grandes ahorros cada vez que se construye un modelo, la simulación al menos inspira confianza de que el diseño del sistema es capaz de cumplir los objetivos de desempeño requeridos y así minimizar el riesgo frecuentemente asociado con los inicios de proyectos.

2.2 Sistemas

2.2.1 Dinámica de sistemas

Introducción

El saber cómo simular no hace a alguien un buen diseñador de sistemas al igual que el saber utilizar sistemas CAD no hace a alguien un buen diseñador de productos. La simulación es una herramienta que es útil sólo si se entiende la naturaleza del problema a resolver.

Definición de sistema

Un sistema es definido como una colección de elementos que funcionan juntos para conseguir un objetivo deseado (Blanchard, 1991). Los puntos clave en esta definición son (1) un sistema consiste de múltiples elementos, (2) éstos elementos están interrelacionados y trabajan cooperativamente, y (3) un sistema busca alcanzar objetivos específicos. Algunos ejemplos de sistemas son los sistemas de tráfico, sistemas políticos, sistemas económicos, sistemas de manufactura y sistemas de servicio.

Los sistemas de manufactura pueden ser pequeños talleres y celdas de maquinado, o grandes instalaciones de producción y líneas de ensamblado. El almacenamiento y la distribución, así

como los sistemas de toda la cadena de abastecimiento se incluyen en los sistemas de manufactura. Los sistemas de servicio abarcan una gran variedad de sistemas incluyendo edificios para el cuidado de la salud, parques recreativos, sistemas de transporte público, restaurantes, bancos, y así sucesivamente.

Tanto los sistemas de servicio como los de manufactura pueden ser llamados *sistemas de procesamiento* porque procesan artículos a través de una serie de actividades. En un sistema de manufactura, la materia prima se transforma en productos terminados. En los sistemas de servicio, los clientes entran con algunas necesidades y se retiran como clientes atendidos.

Los sistemas de procesamiento son artificiales (hechos por el hombre), dinámicos (los elementos interactúan con el paso del tiempo), y usualmente estocásticos (muestran comportamiento al azar).

Elementos de los sistemas

Desde la perspectiva de simulación, se podría decir que un sistema consiste de entradas, actividades, recursos y controles (ver figura 10). Estos elementos definen el *quién, qué, dónde, cuándo* y *cómo* del proceso de entradas.

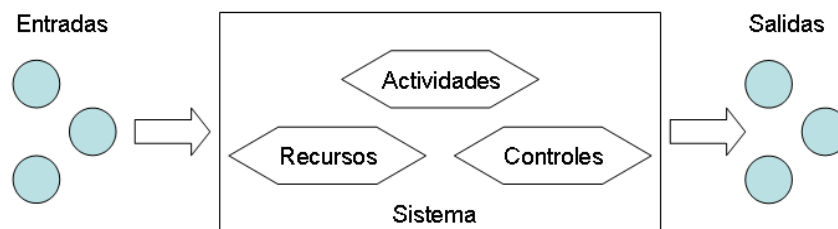


Figura 10. Elementos de un sistema.

Entradas

Las entradas son los artículos procesados a través del sistema, tales como productos, clientes y documentos. Las diferentes entradas pueden tener características únicas como el costo, la forma, la prioridad, la calidad, o la condición. Las entradas pueden ser subdivididas de acuerdo a lo siguiente:

- Humanas o animadas (clientes, pacientes, etcétera).
- Inanimadas (partes, documentos, recipientes, etcétera).
- Intangibles (llamadas, correos electrónicos, etcétera).

Para la mayoría de los sistemas de manufactura y de servicios, las entradas son artículos discretos. Este es el caso de la manufactura de partes discretas y también es el caso de casi todos los sistemas de servicio que procesan clientes, documentos y otros. En algunos sistemas

de producción llamados *sistemas continuos*, se procesan sustancias que no son discretas. Ejemplos de sistemas continuos son las refinerías de petróleo y las fábricas de papel.

Actividades

Las actividades son las tareas que se realizan en el sistema que están directa o indirectamente relacionadas en el proceso de las entradas. Ejemplos de actividades incluyen el servir a un cliente, reparar una pieza de equipo, etcétera. Las actividades usualmente consumen tiempo y requieren el uso de recursos.

Las actividades pueden ser clasificadas como:

- Procesado de entradas (inspección, tratamiento, fabricación, etcétera).
- Manejo de recursos y entradas (uso de montacargas, transportación por elevadores, etcétera).
- Ajustes de recursos, mantenimiento y reparaciones (configuración de máquinas, etcétera).

Recursos

Los recursos son los que hacen que las actividades sean realizadas. Ellos proporcionan las instalaciones de apoyo, equipo y personal para la realización de actividades. Los recursos facilitan el proceso de entradas, pero los recursos inadecuados pueden restringir el proceso. Los recursos tienen características tales como capacidad, velocidad, tiempo de ciclo y confiabilidad.

Al igual que las entradas, los recursos pueden ser clasificados como:

- Humanos o animados (operadores, doctores, personal de mantenimiento, etcétera).
- Inanimados (equipo, herramientas, espacio en piso, etcétera).
- Intangibles (información, poder eléctrico, etcétera).

Los recursos también pueden ser clasificados como dedicados o compartidos, permanentes o consumibles, y móviles o estacionarios.

Controles

Los controles dictan cómo, cuándo y dónde las actividades deben de ser llevadas a cabo. Los controles imponen orden en el sistema. En altos niveles, los controles consisten de programas, planes y políticas. En niveles bajos, los controles proporcionan la información y la lógica de decisión de cómo el sistema debe de operar.

Ejemplos de controles: Secuencias de ruta, planes de producción, programas de trabajo, priorización de tareas, *software* de control, hojas de instrucciones, etcétera.

Complejidad de sistemas

Los elementos de un sistema operan de manera que resultan interacciones complejas. La palabra *complejo* proviene del latín *complexus*, que significa entrelazado o conectado junto. Desafortunadamente, la intuición humana no es muy buena analizando y entendiendo sistemas complejos. Mientras el número de elementos en un sistema puede confundir a alguien (el número de entidades, actividades, recursos y controles pueden fácilmente exceder el número cien), las interacciones de estos elementos son lo que hacen a los sistemas muy complejos y difíciles de analizar. La complejidad de un sistema es primordialmente una función de los siguientes dos factores:

1. *Interdependencias* entre elementos de manera que cada elemento afecta a los otros.
2. *Variabilidad* en los comportamientos de los elementos que produce incertidumbre.

Estos dos factores caracterizan virtualmente todos los sistemas hechos por el hombre y hacen a los comportamientos de los sistemas difíciles de analizar y predecir.

Interdependencias

Las interdependencias causan que el comportamiento de un elemento afecte a los otros elementos del sistema. Por ejemplo, si una máquina se descompone, el personal de reparación se pone en acción mientras las operaciones se detienen por falta de partes. Otros lugares donde esta reacción en cadena o efecto dominó ocurre es en situaciones donde los recursos son compartidos entre dos o más actividades. Un doctor atendiendo a un paciente, puede no estar disponible para responder inmediatamente a las necesidades de otro paciente.

Es claro que la complejidad de un sistema tiene menos que ver con el número de elementos en el sistema que con el número de relaciones interdependientes. Incluso las relaciones interdependientes pueden variar en grado, causando más o menos impacto en el comportamiento de todo el sistema.

La idea central de un sistema es lograr una conjunción de todos los elementos que no podría ser lograda si éstos actuaran de forma aislada.

Finalmente, las interdependencias, aunque pueden ser minimizadas de alguna manera, son simplemente un factor de la vida y es mejor manejarlas coordinadamente.

Variabilidad

La variabilidad es una característica inherente en cualquier sistema que involucre a humanos y maquinaria e incrementa la complejidad. La incertidumbre en las entregas de los proveedores, las fallas aleatorias de los equipos, el ausentismo y las fluctuaciones en la demanda se combinan para causar estragos en las operaciones del sistema de planeación.

La tabla 1 muestra los tipos de variación aleatoria típicas en la mayoría de los sistemas de servicio y manufactura.

Tabla 1. Tipos de variación aleatoria típicas.

Tipo de variabilidad.	Ejemplos.
Tiempos de actividad.	Tiempos de operaciones, tiempos de reparaciones, tiempos de cambios, tiempos de movimientos.
Decisiones.	Aceptar o rechazar una parte, hacia dónde dirigir a un cliente, cuál es la siguiente tarea.
Cantidades.	Tamaños de lotes, cantidades que llegan, número de trabajadores ausentes.
Intervalos de evento.	Tiempo entre llegadas, tiempo entre fallas de equipo.
Atributos.	Preferencias del cliente, tamaño de la parte, niveles de habilidad.

La tendencia en la planeación de sistemas es ignorar la variabilidad y calcular la capacidad y desempeño del sistema basados en valores promedio. Algunos paquetes de programación comerciales como el MRP (*Material Requirements Planning*, “Planeación de los Requerimientos de Material”) trabajan de esa manera. El ignorar la variabilidad distorsiona a la realidad y conduce a predicciones de desempeño inadecuadas.

La variabilidad debe ser reducida e incluso eliminada cuando sea posible. La planeación de sistemas es mucho más fácil si no se tiene variabilidad. Donde es inevitable, de cualquier manera la simulación puede ayudar a predecir el impacto que tendrá en el desempeño del sistema. De esta manera, la simulación puede ayudar a identificar el grado de mejoramiento que puede ser realizado si la variabilidad es reducida o eliminada. Por ejemplo, la simulación puede decirnos cuánto se reduciría el tiempo de flujo y la variación del tiempo de flujo que puede ser lograda si la variación del tiempo de operación puede ser reducida, digamos, un 20 por ciento.

Métricos del desempeño del sistema

Los métricos son un medio usado para evaluar el desempeño de un sistema. En el nivel más alto de una organización o negocio, los métricos muestran el desempeño en términos de ganancias, ventas, costos relativos al presupuesto, devoluciones, etcétera.

Estos métricos son típicamente financieros y muestran el desempeño en los niveles más bajos.

Tales métricos están inherentemente rezagados, disfrazan el desempeño operacional de bajo nivel y son reportados periódicamente. Desde un punto de vista operacional, es más benéfico darle seguimiento a factores como el tiempo, calidad, cantidad, eficiencia y utilización. Estos métricos operacionales reflejan a la actividad inmediata y son directamente controlables. Los métricos operacionales clave que describen la efectividad y eficiencia de la manufactura y sistemas de servicio son: Tiempo de flujo, utilización, tiempo de valor agregado, tiempo de espera, tasa de flujo, inventario, rendimiento, sensibilidad del cliente y varianza.

1. *Tiempo de flujo.* Es el tiempo promedio que le toma a un artículo o a un cliente al ser procesado a través del sistema. También se conoce como tiempo de ciclo o tiempo de manufactura. Dado que más del 80% del tiempo de ciclo es realizado en estanterías o colas, la eliminación de los tiempos de los intermediarios tiende a reducir grandemente el tiempo de ciclo.
2. *Utilización.* Es el porcentaje de tiempo programado que el personal, equipo y otros recursos son productivos. Si un recurso no está siendo utilizado, puede ser porque está de ocioso, bloqueado o descompuesto. Para incrementar la utilización productiva, se puede incrementar la demanda del recurso o reducir la cantidad del recurso o capacidad.
3. *Tiempo de valor agregado.* Es la cantidad de tiempo que los materiales, clientes y otras cosas se tardan para agregar valor, donde el valor es definido como cualquier cosa que el cliente está dispuesto a pagar.
4. *Tiempo de espera.* Es la cantidad de tiempo que los materiales, clientes y otros esperan para ser procesados. El tiempo de espera es por mucho, el mayor componente del tiempo que no agrega valor. Puede ser disminuido reduciendo el número de artículos en el sistema.
5. *Tasa de flujo.* Es el número de artículos producidos o clientes atendidos por unidad de tiempo. Algunos sinónimos de la tasa de flujo son la tasa de producción y la tasa de procesamiento. La tasa de flujo puede ser incrementada con una mejor administración y utilización de los recursos, especialmente eliminando los “cuellos de botella”.
6. *Inventario o niveles de cola.* Es el número de artículos o clientes en almacén o áreas de espera. Es preferible mantener los niveles de cola a un mínimo. Las colas ocurren cuando los recursos se necesitan pero no están disponibles. Los inventarios pueden ser controlados ya sea balanceando el flujo de trabajo, o restringiendo la producción en las operaciones que no están en “cuello de botella”.
7. *Rendimiento.* Desde un punto de vista productivo, el porcentaje de productos completados en base a los requeridos.
8. *Sensibilidad del cliente.* Es la habilidad del sistema para entregar productos en buen tiempo para minimizar el tiempo de espera del cliente. En las operaciones de “Hechos Para Almacenarse” (*Make-To-Stock, MTS*, por sus siglas en inglés), la sensibilidad del cliente puede ser asegurada manteniendo adecuados niveles de inventario. En las operaciones de “Hechos a la Medida” (*Make-To-Order, MTO*, por sus siglas en inglés), la sensibilidad del cliente es mejorada bajando los niveles de inventario de manera que los tiempos de ciclo puedan ser reducidos.
9. *Varianza.* Es el grado de fluctuación que puede y frecuentemente ocurre en cualquiera de los métricos precedentes. La varianza acarrea incertidumbre, y por lo tanto, riesgo de no conseguir los objetivos del desempeño deseado. La varianza es reducida cuando se controlan los tiempos de actividades, mejorando la confiabilidad de los recursos y apégandose a los programas.

Estos métricos pueden ser dados por el sistema, o pueden ser modificados por el recurso individual, tipo de entidad o alguna otra característica. Relacionando estos métricos con otros factores, se pueden obtener métricos significativos que son útiles en el *Benchmarking* u otros análisis comparativos.

Variables del sistema

Diseñar un nuevo sistema o mejorar uno ya existente requiere más que simple identificación de los elementos y objetivos de desempeño del sistema. Requiere un entendimiento de cómo los elementos del sistema afectan unos a otros y a los objetivos de desempeño. Para comprender estas relaciones, hay que entender los tres tipos de variables del sistema:

1. Variables de decisión.
2. Variables de respuesta.
3. Variables de estado.

Variables de decisión.

Las variables de decisión (también llamadas “factores de entrada”) algunas veces son conocidas como las variables independientes en un experimento. El cambiar los valores de las variables independientes del sistema afecta al comportamiento del mismo. Las variables independientes pueden ser controlables o incontrolables, dependiendo de si el experimento es capaz de manipularlas. Las variables controlables son llamadas variables de decisión porque el tomador de decisiones (experimentador) controla el valor de las variables. Una variable incontrolable podría ser el tiempo de servicio de un cliente o la tasa de rechazos de una operación. Cuando se define al sistema, las variables controlables son la información acerca del sistema, tal información es más preceptiva que descriptiva.

Variables de respuesta.

Las variables de respuesta también son llamadas “desempeño” o “variables de salida” y miden el desempeño del sistema en respuesta a variables de decisión particulares. Una variable de respuesta puede ser el número de entidades procesadas en un período dado, la utilización promedio de un recurso, etcétera.

En un experimento, la variable de respuesta es la variable dependiente, la cual depende del valor particular de la variable independiente.

El objetivo de la planeación de sistemas es encontrar los valores correctos de las variables de decisión que den los valores de respuesta deseados.

Variables de estado.

Las variables de estado indican la situación actual del sistema en un punto del tiempo.

Ejemplos de variables de estado son las entidades actuales de un recurso particular que se encuentran esperando para ser procesadas. Las variables de respuesta son frecuentemente resúmenes de los cambios de las variables de estado a través del tiempo. Por ejemplo, los tiempos individuales que una máquina está ocupada pueden ser sumados en un período de tiempo particular y divididos por el tiempo total disponible, esa sería la utilización de la máquina en el período.

Las variables de estado son variables dependientes al igual que las variables de respuesta, de manera que dependen de lo que les suceda a las variables independientes.

Optimización del sistema

Encontrar el mejor marco para las variables de decisión que logre los mejores objetivos de desempeño es lo que se conoce como *optimización*. Específicamente, la optimización busca la mejor combinación de los valores de las variables de decisión que minimiza o maximiza la *función objetivo* tales como los costos o ganancias. Una función objetivo es simplemente una variable de respuesta del sistema. Los problemas de optimización frecuentemente incluyen restricciones, límites a los valores que las variables de decisión pueden tomar.

En un sistema de optimización, se debe tener cuidado en establecer las prioridades y estar seguros de que la función objetivo correcta está siendo tomada. Si, por ejemplo, el objetivo es minimizar los costos de producción o servicio, la solución obvia es mantener solamente una fuerza de trabajo suficiente para lograr los requerimientos de procesos. Desafortunadamente, en los sistemas de manufactura esto acarrea más trabajo en proceso y resulta en altos costos de inventario. En los sistemas de servicios las largas colas son un gran problema. Una buena estrategia es encontrar el balance entre el número de recursos y los tiempos de espera de manera que el costo total es minimizado.

Como se muestra en la figura 11, el número de recursos en el cuál la suma de los costos de los recursos y los costos de espera son mínimos, es el número óptimo de recursos que se deben de tener. También es el tiempo de espera óptimo aceptable.

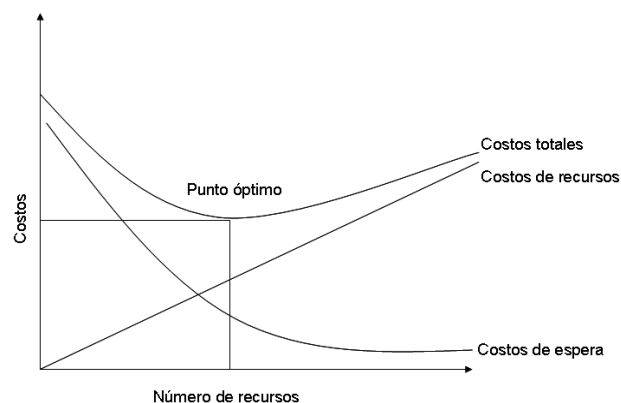


Figura 11. Curvas de costos que muestran el número óptimo de recursos.

El enfoque de sistemas

Debido a la departamentalización y especialización, las decisiones en el mundo real son frecuentemente tomadas sin considerar al desempeño total del sistema. Dado que cada persona está muy ocupada con su propia área de responsabilidad, casi nunca le pone atención a los grandes problemas. Un gerente de una gran empresa manufacturera descubrió que casi el 99 por ciento de las recomendaciones de mejora a los sistemas fallaron porque no vieron al sistema holísticamente. Después de un tiempo, el mismo gerente encontró que cerca del 80 por ciento de los cambios sugeridos no lograron una mejora, incluso algunos de ellos afectaron el desempeño de todo el sistema.

Optimizar algo localmente muchas veces implica hacer algo menos óptimo globalmente. En términos más simples: está bien actuar localmente mientras se piense globalmente.

Enfocar el diseño del sistema con los objetivos globales en mente y considerando cómo cada elemento se relaciona con los otros es conocido como “enfoque holístico para el diseño de sistemas”.

La ingeniería de sistemas es el proceso de identificar problemas u otras oportunidades para mejorar, desarrollar soluciones alternas, evaluar las soluciones, seleccionar e implementar las mejores soluciones (figura 12).

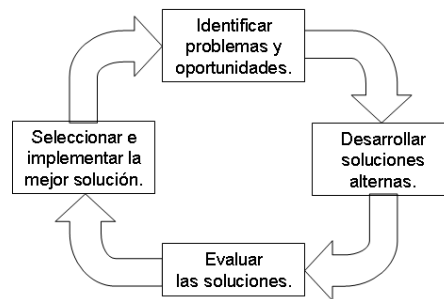


Figura 12. Diagrama de cuatro pasos para mejora en el enfoque de sistemas.

Identificar problemas y oportunidades

La importancia de identificar las áreas con los más grandes problemas y reconocer las oportunidades de mejora no debe ser exagerada. Los estándares de desempeño deben ser altos para poder ver las más grandes oportunidades de mejoramiento.

Desarrollar soluciones alternas

Usualmente todos nosotros desarrollamos una solución cuando entendemos el problema, identificamos las variables importantes y describimos las relaciones importantes. Esto ayuda a identificar áreas posibles de enfoque y puntos de aplicación de la solución.

Técnicas como el análisis de causa – efecto y los diagramas de Pareto son útiles aquí.

Una vez que el problema ha sido identificado, las soluciones alternas pueden ser exploradas.

Evaluar soluciones

Las soluciones alternas deben ser evaluadas basadas en su habilidad para lograr el criterio establecido para la evaluación. Estos criterios frecuentemente incluyen objetivos de desempeño, costo de implementación, impacto en la infraestructura socio-técnica y consistencia con las estrategias organizacionales.

Seleccionar e implementar la mejor solución

Frecuentemente la selección final de cuál solución implementar no se toma en base a análisis, sino en una decisión de administración. El trabajo del analista es presentar su evaluación de la forma más clara posible de manera que la decisión se pueda llevar a cabo.

2.2.2 Técnicas de análisis de sistemas

Mientras la simulación es quizá la más versátil y poderosa herramienta de análisis de sistemas, otras técnicas disponibles también pueden ser útiles en la planeación de sistemas.

Algunas herramientas de análisis de sistemas, además de la simulación, incluyen cálculos simples, hojas de cálculo, técnicas de investigación de operaciones (como la programación lineal y la teoría de colas) y herramientas especiales computarizadas para programación, planeación, y cosas así. Estas herramientas proveen soluciones aproximadas y rápidas, pero tienden a hacer suposiciones demasiado simples, realizan sólo cálculos estáticos y están limitadas a cierta clase de problemas. Además, estas herramientas no toman en cuenta la interdependencia y variabilidad de los sistemas complejos, por lo que no son tan exactos como la simulación al predecir el desempeño de estos sistemas (ver figura 13).

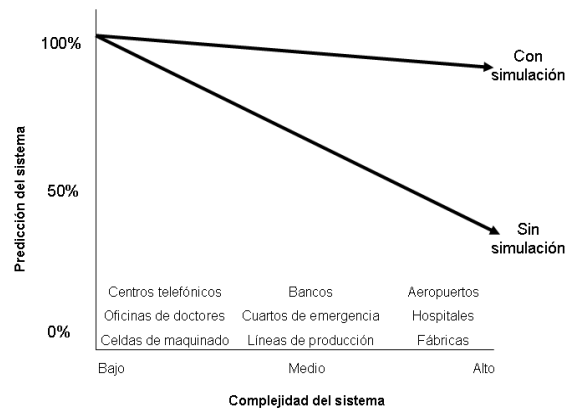


Figura 13. La simulación mejora la predicción del desempeño.

Cálculos a mano

Los cálculos hechos por papel y lápiz pueden ser muy útiles para entender los requerimientos básicos de un sistema. Algunas decisiones importantes han sido tomadas como resultado de bosquejos y cálculos sobre servilletas o atrás de envolturas.

El obvio problema con los cálculos hechos a mano es la inhabilidad para realizar cálculos de relaciones complejas.

Hojas de cálculo

Las hojas de cálculo son muy útiles cuando se tienen que tomar en cuenta cientos de valores. Manipular filas y columnas de números en una computadora es mucho más fácil que hacerlo en papel, incluso teniendo una magnífica calculadora.

El problema con las hojas de cálculo es la inhabilidad (o al menos, habilidad limitada) para incluir variabilidad en los tiempos de actividad, tasas de llegada, etcétera, y tomar en cuenta los efectos de las interdependencias.

Técnicas de investigación de operaciones

Las técnicas tradicionales de la investigación de operaciones utilizan modelos matemáticos para resolver problemas involucrando simples o moderadamente complejas relaciones. Estos modelos matemáticos incluyen modelos determinísticos y modelos probabilísticos como flujos en red y los árboles de decisión, respectivamente. Las técnicas de investigación de operaciones pueden dividirse en dos clases generales: preceptivas y descriptivas.

Técnicas preceptivas

Las técnicas preceptivas brindan una óptima solución a algún problema, tal como la cantidad óptima de recursos para minimizar los costos, o la mezcla óptima de productos que maximice las ganancias. Generalmente estas técnicas son aplicables cuando se busca conseguir una meta, tal como minimizar o maximizar alguna función objetivo (maximizar ganancias o minimizar costos).

Técnicas descriptivas

Las técnicas descriptivas tales como la teoría de colas son técnicas de análisis estático que proveen buenos estimados para problemas básicos como determinar el promedio esperado de entidades en una cola o los tiempos de espera promedio para las entidades en un sistema de colas.

La teoría de colas es de un interés particular desde una perspectiva de simulación porque considera las mismas características y asuntos del sistema que se utilizan en simulación. Un sistema de colas consiste de una o más colas y de uno o más servidores (ver figura 14).

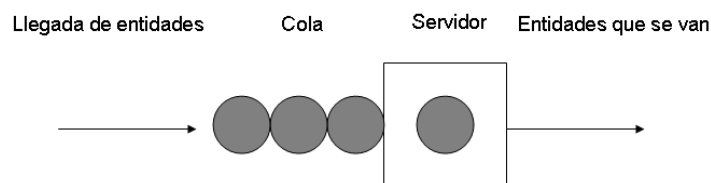


Figura 14. Configuración de un sistema de colas.

Las entidades, conocidas como *población* en la teoría de colas, entran al sistema y pueden ser atendidas inmediatamente si el servidor está disponible, o esperan en cola hasta que el servidor está disponible. Las entidades pueden ser atendidas usando una de las diferentes disciplinas de colas: primeras entradas, primeras salidas (*First-in, First-out, FIFO*, por sus siglas en inglés); últimas entradas, primeras salidas (*Last-in, First-out, LIFO*, por sus siglas en inglés); prioridad, etcétera. La capacidad del sistema o número de entidades que se permiten tener en cualquier tiempo, puede ser finita o, como sucede frecuentemente, infinita.

Kendall (1953) concibió un sistema simple para clasificar los sistemas de colas en la forma $A/B/s$, donde A es el tipo de distribución de llegada, B es el tipo de la distribución del tiempo de servicio y s es el número de servidores. Los tipos de distribución típicos para A y B son:

1. M para la distribución exponencial o Markoviana.
2. G para una distribución general.
3. D para un valor constante o determinístico.

Un sistema de colas $M/D/1$, por ejemplo, es un sistema en el cuál los tiempos entre llegadas están exponencialmente distribuidos, los tiempos de servicio son constantes y hay un solo servidor.

La tasa de llegada en un sistema de colas es usualmente representada por la letra griega lambda (λ) y la tasa de servicio por la letra griega mu (μ). El tiempo entre arribos promedio se vuelve $1/\lambda$ y el tiempo promedio de servicio $1/\mu$. El factor de intensidad del tráfico λ/μ es un parámetro usado en varias de las ecuaciones de colas y es representado por la letra griega rho (ρ).

Las medidas de desempeño comunes de interés en un sistema de colas están basadas en análisis de estados estables o valores esperados a largo plazo e incluyen:

1. L = número esperado de entidades en el sistema (número en cola y en servicio).
2. L_q = número esperado de entidades en la cola (longitud de cola).
3. W = tiempo esperado en el sistema (tiempo de flujo).
4. W_q = tiempo esperado en cola (tiempo de espera).
5. P_n = probabilidad de un número n exacto de clientes en el sistema ($n = 0, 1, \dots$).

El sistema $M/M/1$ con capacidad infinita y una disciplina de colas *FIFO* es quizá el problema de colas básico y nos muestra el procedimiento para analizar sistemas de colas y entender cómo el análisis es desarrollado. Las ecuaciones para calcular las medidas de desempeño comunes en un $M/M/1$ son:

$$L = \frac{\rho}{1 - \rho} = \frac{\lambda}{\mu - \lambda}$$

$$L_q = L - \rho = \frac{\rho^2}{\mu - \lambda}$$

$$W = \frac{1}{\mu - \lambda}$$

$$W_q = \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)}$$

$$P_n = (\rho)^n, n = 0, 1, \dots$$

Si el número esperado de entidades en el sistema o el tiempo de espera es conocido, lo demás puede ser calculado fácilmente usando la ley de Little (1961):

$$L = \lambda W$$

La ley de Little también puede ser aplicada en la longitud de cola y en el tiempo de espera:

$$L_q = \lambda W_q$$

Ejemplo de aplicación.

Suponga que los clientes llegan para utilizar un cajero automático con un tiempo entre llegadas de 3 minutos distribuido exponencialmente y se toman un promedio de 2.4 minutos exponencialmente distribuido en la máquina. ¿Cuál es el número esperado de clientes en el sistema y en la cola? ¿Cuál es el tiempo de espera de los clientes en el sistema y en la cola?

$$\lambda = 20 \text{ por hora}$$

$$\mu = 25 \text{ por hora}$$

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} = 0.8$$

Resolviendo para L :

$$\begin{aligned} L &= \frac{\lambda}{\mu - \lambda} \\ &= \frac{20}{25 - 20} \\ &= \frac{20}{5} = 4 \end{aligned}$$

Resolviendo para L_q :

$$\begin{aligned} &= \frac{0.8^2}{1 - 0.8} \\ &= \frac{0.64}{0.2} \\ &= 3.2 \end{aligned}$$

Resolviendo para W usando la fórmula de Little:

$$\begin{aligned}W &= \frac{L}{\lambda} \\ &= \frac{4}{20} \\ &= 0.20hrs \\ &= 12 \text{ minutos}\end{aligned}$$

Resolviendo para W_q usando la fórmula de Little:

$$\begin{aligned}W_q &= \frac{L_q}{\lambda} \\ &= \frac{3.2}{20} \\ &= 0.16hrs \\ &= 9.6 \text{ minutos}\end{aligned}$$

Las técnicas descriptivas de investigación de operaciones como la teoría de colas son útiles para la mayoría de los problemas básicos.

2.3 Bases de la simulación

La simulación es más significativa cuando se entiende lo que se está haciendo. Entendiendo cómo es que la simulación trabaja ayuda a saber si se aplica correctamente y el significado de las salidas.

2.3.1 Tipos de simulación

La forma de trabajar de la simulación depende del tipo de simulación usada. Hay varias formas de categorizar a la simulación. A continuación se muestran las categorías más comunes.

1. Estática o dinámica.
2. Estocástica o determinística.
3. Eventos discretos o continuos.

Simulación dinámica vs. simulación estática

La simulación estática es la que no se basa en el tiempo. Frecuentemente involucra trazos de muestras aleatorias para generar resultados estadísticos, es por eso que algunas veces se le conoce como simulación Montecarlo.

La simulación dinámica toma en cuenta los cambios de estado mientras ocurren en el tiempo. Un mecanismo de reloj se mueve hacia adelante en el tiempo y las variables de estado son actualizadas mientras el tiempo avanza. La simulación dinámica es buena para analizar sistemas de manufactura y de servicios porque operan con el paso del tiempo.

Simulación determinística vs. simulación estocástica

Las simulaciones donde una o más variables de entrada son aleatorias, son conocidas como simulaciones estocásticas o probabilísticas. Una simulación estocástica produce una salida que es aleatoria y por lo tanto da sólo un resultado de cómo el sistema se podría comportar.

Las simulaciones que no tienen componentes de entrada aleatorias son llamadas determinísticas. Los modelos de simulación determinísticos son construidos de la misma forma que los modelos estocásticos excepto que no tienen aleatoriedad. En una simulación determinística, todos los estados futuros son determinados una vez que los datos de entrada y el estado inicial han sido definidos.

Como se muestra en la figura 15, las simulaciones determinísticas tienen entradas constantes y producen salidas constantes. Las simulaciones estocásticas tienen entradas aleatorias y producen salidas aleatorias. Las entradas pueden incluir tiempos de actividad, intervalos de llegada y secuencias de ruta. Las salidas incluyen métricos como el tiempo de flujo promedio, tasa de flujo, y utilización de recursos. Las entradas y las salidas aleatorias de la figura 15 (b) son mostradas como distribuciones estadísticas.

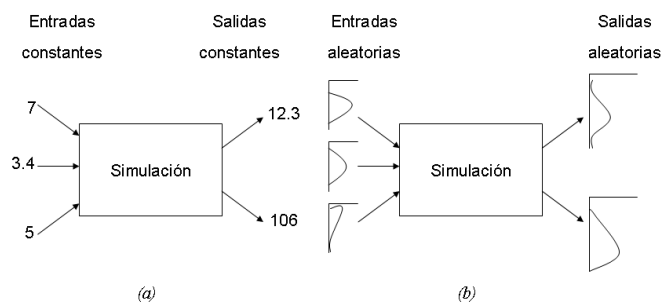


Figura 15. Ejemplos de una (a) simulación determinística y (b) simulación estocástica.

Comportamiento al azar

Los sistemas estocásticos frecuentemente tienen tiempos o valores cuantitativos que varían dentro de un rango dado y de acuerdo a la densidad especificada, como también están definidos por una distribución de probabilidad.

Las distribuciones de probabilidad son útiles para predecir el tiempo, distancia, cantidad, etcétera, cuando estos valores son variables aleatorias.

Las distribuciones de probabilidad de las cuáles obtenemos variables aleatorias pueden ser ya sea discretas (valores específicos) o continuas (probabilidad de un valor que está dentro de un rango dado). La figura 16 muestra ejemplos gráficos.

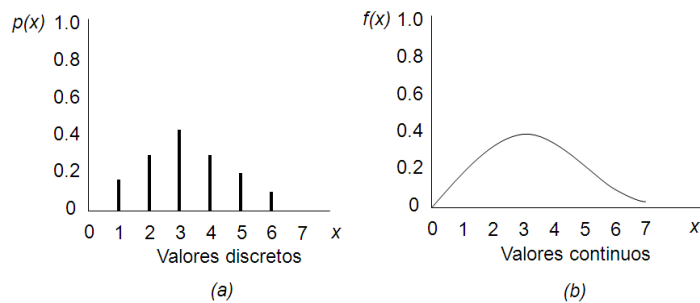


Figura 16. Ejemplos de distribución de probabilidad discreta y continua.

Una distribución discreta representa un número contable de valores posibles, tales como el número de artículos en un lote o individuos en un grupo de gente. Una distribución continua representa una continuidad de valores. Un ejemplo de distribución continua es una máquina con un tiempo de ciclo que está uniformemente distribuido entre 1.2 y 1.8 minutos. Dentro de este rango tenemos un número infinito de valores posibles.

2.4 Simulación de comportamiento aleatorio

Una de las más poderosas características de la simulación es la habilidad para imitar el comportamiento aleatorio o variación, característico de los sistemas estocásticos. El simular un comportamiento aleatorio requiere de un método capaz de generar números aleatorios y rutinas para la generación de variables aleatorias basadas en una distribución de probabilidad dada.

2.4.1 Generación de números aleatorios

El comportamiento aleatorio es imitado en la simulación usando un generador de números aleatorios. Lo que se utiliza para generar estos tipos de eventos es una cantidad de números que está uniformemente distribuida entre cero y uno $(0 \leq x \leq 1)$. El generador de números aleatorios es el responsable de producir esta cantidad de números independiente y uniformemente distribuidos.

Generadores lineales congruenciales

Hay algunos tipos de generadores de números aleatorios ya establecidos, y los investigadores están en la búsqueda activa de nuevos (L'Ecuyer, 1998). De cualquier manera, la mayoría de los programas de simulación está basada en generadores lineales congruenciales. Los generadores lineales congruenciales son eficientes porque producen de manera rápida una secuencia de números aleatorios sin necesidad de recursos computacionales.

En este tipo de generadores, los valores Z_1, Z_2, Z_3, \dots son definidos por la siguiente fórmula:

$$Z_i = (aZ_{i-1} + c) \bmod m$$

donde la constante a es el multiplicador, la constante c el incremento, y la constante m el módulo (Law y Kelton, 2000). El usuario debe proveer una semilla o valor inicial, denotado como Z_0 , para empezar a generar la secuencia de valores. Z_0, a, c y m son números no negativos. El valor de Z_i es obtenido dividiendo $(aZ_{i-1} + c)$ por m e igualando Z_i a la parte restante de la división, lo cuál es el resultado obtenido de la función mod. Por eso, los valores Z_i están en el intervalo $0 \leq Z_i \leq m-1$ y están distribuidos uniformemente. También se necesita la versión continua de la distribución uniforme cuyos valores tengan un mínimo de cero y máximo de 1, lo cual será denotado por U_i para $i = 1, 2, 3, \dots$. En otras palabras, el valor de U_i será calculado dividiendo Z_i por m .

A continuación, vamos a hacer una tabla de números aleatorios. Asignaremos los valores de $a = 21, c = 3$ y $m = 16$ para generar números aleatorios.

La tabla 2 contiene una secuencia de 20 números aleatorios generados de la siguiente fórmula:

$$Z_i = (21Z_{i-1} + 3) \bmod 16$$

Tabla 2. Ejemplo de un generador lineal congruencial $Z_i = (21Z_{i-1} + 3) \bmod 16$.

i	$21Z_{i-1} + 3$	Z_i	$U_i = Z_i/16$
0		13	
1	276	4	0.2500
2	87	7	0.4375
3	150	6	0.3750
4	129	1	0.0625
5	24	8	0.5000
6	171	11	0.6875
7	234	10	0.6250
8	213	5	0.3125
9	108	12	0.7500
10	255	15	0.9375
11	318	14	0.8750
12	297	9	0.5625
13	192	0	0.0000
14	3	3	0.1875
15	66	2	0.1250
16	45	13	0.8125
17	276	4	0.2500
18	87	7	0.4375
19	150	6	0.3750
20	129	1	0.0625

El valor de 13 fue arbitrariamente seleccionado entre 0 y $m - 1 = 16 - 1 = 15$.

Por lo tanto, 13 se tomó como la semilla ($Z_0 = 13$) para empezar a generar la secuencia en la tabla 2. El valor de Z_1 es obtenido como:

$$Z_1 = (Z_0 + c) \bmod m = (13 + 3) \bmod 16 = 16 \bmod 16 = 0$$

Nótese que 4 es el residuo de dividir 16 por 276. El valor de U_1 es obtenido por:

$$U_1 = Z_1 / 16 = 4 / 16 = 0.2500$$

El proceso continúa usando el valor de Z_1 para obtener Z_2 y luego U_2 .

La máxima longitud de ciclo que un generador lineal congruencial puede tener es m . Para determinar la longitud de ciclo máxima, los valores de a , c y m deben de ser seleccionados cuidadosamente.

Una manera de seleccionar los valores de a , c y m es siguiendo las siguientes reglas (Pritsker, 1995):

1. $m = 2^b$, donde b es determinada en base al número de bits por palabra que la computadora maneja. Algunas computadoras manejan 32 bits por segundo, lo que hace a 31 una buena elección para b .
2. Deben determinarse c y m tal que su factor común más grande sea 1.
3. $a = 1 + 4k$, donde k es una constante.

Siguiendo estas reglas, el generador lineal congruencial puede tener una longitud de ciclo de 2^{31} números aleatorios.

Hay dos tipos de generadores lineales congruenciales: el generador mixto y el generador multiplicativo. Los generadores mixtos son los que tienen un valor de $c > 0$. Los generadores multiplicativos son los que tienen un valor de $c = 0$.

Pruebas de generadores de números aleatorios

Si se va a utilizar un generador de números aleatorios al cuál se conoce poco, es conveniente verificar que los números generados satisfagan las siguientes propiedades: Independencia y distribución uniforme entre cero y uno.

Para verificar que el generador satisface estas propiedades, hay que obtener primero una secuencia de números aleatorios $U_1, U_2, U_3 \dots$ y someterlos a la apropiada prueba de hipótesis.

Las hipótesis para probar la propiedad de independencia de los valores son:

H_0 : Los valores de U_i obtenidos del generador son independientes.

H_1 : Los valores de U_i obtenidos del generador no son independientes.

Varios métodos estadísticos han sido desarrollados para probar estas hipótesis a un nivel de significancia de α . Uno de los métodos más utilizados es el de la prueba de corridas.

Las hipótesis para probar la uniformidad de los números son:

H_0 : Los valores de U_i son uniformes.

H_1 : Los valores de U_i no son uniformes.

Las pruebas de Smirnov-Kolmogorov y Ji-Cuadrada son quizá las más utilizadas para probar estas hipótesis.

2.4.2 Números aleatorios

Existen varias formas de generar números aleatorios para la distribución deseada, y la selección de un método particular depende de las características de la distribución. Estos métodos incluyen el método de la transformación inversa, el método de aceptación/rechazo, el método de la composición, el método del enrollamiento, y otros métodos que emplean propiedades especiales.

Distribuciones continuas

La aplicación del método de la transformación inversa para generar números aleatorios en distribuciones continuas es directa y eficiente para algunas distribuciones continuas. Para una función de densidad probabilística dada $f(x)$, encontrar la función de distribución acumulativa de X . Esto es,

$$F(x) = P(X \leq x)$$

Después, diremos que

$$U = F(x)$$

donde U es uniforme y se resuelve para x . Despejando x obtenemos

$$x = F^{-1}(U)$$

La ecuación $x = F^{-1}(U)$ transforma U en un valor para x que conforma a la distribución $f(x)$.

Como ejemplo, supongamos que necesitamos generar números de una distribución exponencial con media aritmética β . La función de densidad probabilística $f(x)$ y su correspondiente función de distribución acumulativa $F(x)$ son:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\beta} e^{-\frac{x}{\beta}} & \text{Para } x > 0 \\ 0 & \text{Donde sea.} \end{cases}$$

$$F(x) = \begin{cases} 1 - e^{-\frac{x}{\beta}} & \text{Para } x > 0 \\ 0 & \text{Donde sea.} \end{cases}$$

$U = F(x)$, y despejando x obtenemos:

$$U = 1 - e^{-\frac{x}{\beta}}$$

$$e^{-\frac{x}{\beta}} = 1 - U$$

$$\ln\left(e^{-\frac{x}{\beta}}\right) = \ln(1 - U)$$

$$\frac{-x}{\beta} = \ln(1 - U)$$

$$x = -\beta \ln(1 - U)$$

La variable aleatoria x de la anterior ecuación está distribuida exponencialmente con media aritmética β y la variable U es uniforme (0, 1).

Supongamos que tenemos tres observaciones de una distribución exponencial de variables aleatorias con $\beta = 2$ deseada. Los siguientes tres números generados son $U_1 = 0.27$, $U_2 = 0.89$ y $U_3 = 0.13$. Los tres números son convertidos en las variables x_1 , x_2 y x_3 de la distribución exponencial con $\beta = 2$ como se muestra:

$$x_1 = -2 \ln(1 - U_1) = -2 \ln(1 - 0.27) = 0.63$$

$$x_2 = -2 \ln(1 - U_2) = -2 \ln(1 - 0.89) = 4.41$$

$$x_3 = -2 \ln(1 - U_3) = -2 \ln(1 - 0.13) = 0.28$$

La figura 17 nos muestra una representación gráfica del método de transformación inversa del ejemplo.

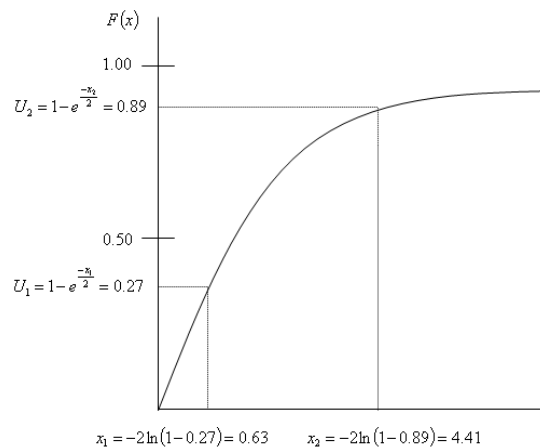


Figura 17. Método de la transformación inversa para variables continuas.

El primer paso es generar U , donde U es uniforme en el intervalo de 0 a 1. Después se localiza a U en el eje de las y y se traza una línea horizontal desde el punto hasta la función de la distribución acumulativa $\left[F(x) = 1 - e^{-x/2} \right]$. Desde este punto de intersección con $F(x)$, una línea vertical es trazada hasta el eje de las x para obtener el valor correspondiente de la variable. Este proceso es ilustrado en la figura cuando se generan variables x_1 y x_2 dados $U_1 = 0.27$ y $U_2 = 0.89$.

Distribuciones discretas

La aplicación del método de transformación inversa para generar números de distribuciones discretas es básicamente lo mismo que para distribuciones continuas. La diferencia radica en la forma de implementación. Por ejemplo, consideremos la siguiente función de masa probabilística:

$$P(X = x) = \begin{cases} 0.10 & \text{Para } x = 1 \\ 0.30 & \text{Para } x = 2 \\ 0.60 & \text{Para } x = 3 \end{cases}$$

La variable aleatoria x puede tener tres valores. La probabilidad de que x sea igual a 1 es 0.10, $P(X = 1) = 0.10$; $P(X = 2) = 0.30$; y $P(X = 3) = 0.60$. La función de distribución acumulativa $F(x)$ se muestra en la figura 18. La variable aleatoria x podría ser usada en simulación para representar el número de componentes defectuosos en un tablero de circuitos o el número de bebidas ordenadas en una cantina, por ejemplo.

Supongamos que se desea una observación de la distribución discreta arriba mencionada. El primer paso es generar U , donde U es uniforme en el intervalo de 0 a 1.

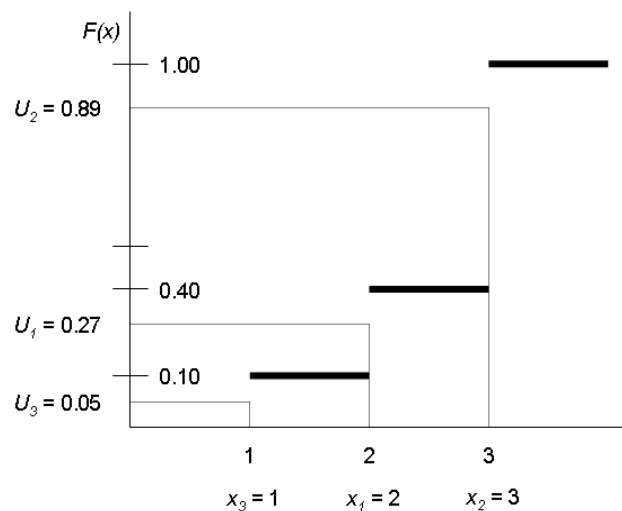


Figura 18. Método de la transformación inversa para variables discretas.

Usando la figura 18, el valor de la variable aleatoria es determinada localizando U en el eje de las y , luego se traza una línea horizontal desde ese punto hasta que se intersecta con la función acumulativa, y después se traza una línea vertical desde tal punto hacia el eje de las x para conocer el valor de la variable. Este proceso se ilustra en la figura para x_1 , x_2 y x_3 dadas $U_1 = 0.27$, $U_2 = 0.89$ y $U_3 = 0.05$. De igual manera, si $0 \leq U_i \leq 0.10$, entonces $x_i = 1$; si $0.10 \leq U_i \leq 0.40$, entonces $x_i = 2$; si $0.40 \leq U_i \leq 1.00$, entonces $x_i = 3$. Nótese que si se tuvieran que generar 100 variables usando el proceso mencionado, tendríamos un valor de 3 para ser iterado 60 veces, un valor de 2 para ser iterado 30 veces y un valor de 1 para ser iterado 10 veces.

2.5 Simulación de eventos discretos

2.5.1 Simulación de eventos continuos vs. discretos

Una simulación de eventos discretos es aquella donde los cambios de estado ocurren en puntos discretos a través del tiempo.

Los cambios de estado en un modelo ocurren como consecuencia de algunos eventos. El estado del modelo se convierte en el estado colectivo de todos los elementos del modelo en un punto en el tiempo.

Las variables de estado en una simulación de eventos discretos son conocidas como *variables de estado con cambio discreto*. La mayoría de los sistemas de manufactura y de servicios son modelados usando simulación de eventos discretos.

En la simulación continua, las variables de estado cambian continuamente con respecto al tiempo y por lo tanto son llamadas *variables de estado con cambio continuo*.

La figura 19 compara una variable con cambio continuo y una con cambio discreto a través del tiempo.

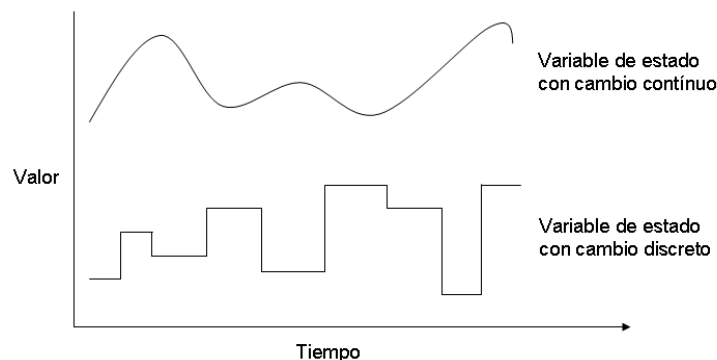


Figura 19. Comparación entre una variable de estado discreto y una con cambio continuo.

Podemos apreciar como la curva de estado con cambio continuo está suavizada, mientras la curva con cambio discreto está formada por muchas rectas.

2.5.2 Ecuaciones diferenciales

El cambio que ocurre en algunas variables de estado con cambio continuo es expresado en términos de la derivada de las variables de estado. Las ecuaciones que involucran derivadas de una variable de estado son conocidas como *ecuaciones diferenciales*. La variable de estado v , por ejemplo, puede cambiar como una función de v con respecto al tiempo t :

$$\frac{dv}{dt} = v^2 + t^2$$

Se necesita también otra ecuación para definir la condición inicial de v :

$$v(0) = k$$

Las técnicas de análisis numéricos tales como el de Runge-Kutta son usadas para integrar las ecuaciones diferenciales cuando se va incrementando el tiempo.

2.5.3 Ecuaciones de diferencia

Algunas veces una variable de estado con cambio continuo puede ser modelada usando una ecuación de diferencia. En tales casos, el tiempo es dividido en períodos de longitud t . Una expresión algebraica es usada para calcular el valor de la variable de estado al final del período $k + 1$ basada en el valor de la variable de estado al final del período k .

Por ejemplo, la siguiente ecuación de diferencia puede ser usada para expresar la razón de cambio en la variable de estado v como una función del actual valor de v , la tasa de cambio (r) y el período de tiempo (Δt):

$$v(k+1) = v(k) + r\Delta t$$

2.5.4 Simulación continua y discreta combinada

Algunos programas de computadora de simulación tienen características de eventos discretos y de eventos continuos. Esto quiere decir que pueden manejar tanto eventos discretos como continuos en el modelado, lo que resulta en simulación híbrida.

Cuatro interacciones básicas ocurren entre variables con cambio continuo y discreto:

1. El valor de una variable continua puede repentinamente incrementarse o disminuir como resultado de un evento discreto.
2. El inicio de un evento discreto puede ocurrir como resultado de alcanzar un valor de entrada en una variable continua.
3. La tasa de cambio de una variable continua puede ser alterada como resultado de un evento discreto.

- Una iniciación o interrupción de cambio en una variable continua puede ocurrir como resultado de un evento discreto.

2.5.5 Forma de trabajar de la simulación de eventos discretos

La mayoría de los programas de simulación presentan una visión de un mundo orientado a los procesos para definir los modelos. En la simulación de eventos discretos, los flujos de procesos son transformados en secuencia de eventos: primero ocurre el evento 1, luego ocurre el evento 2 y así sucesivamente. Los eventos en la simulación pueden ser de dos tipos: programados o condicionales, los cuáles crean los retrasos de actividades en la simulación para imitar el paso del tiempo.

Un *evento programado* es aquél cuyo tiempo de ocurrencia puede ser determinado de antemano y por lo tanto, programado por adelantado. Los eventos programados son insertados cronológicamente en un calendario de eventos para esperar el tiempo de su ocurrencia.

Los *eventos condicionales* son generados más por un conjunto de condiciones que por el paso del tiempo.

La figura 20 muestra la esencia de la simulación de eventos discretos.

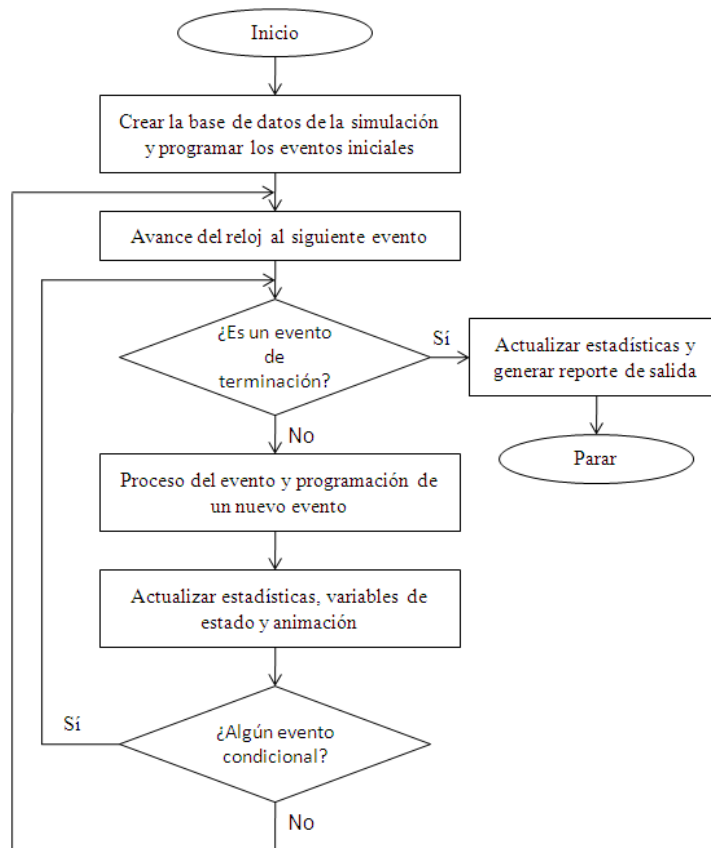


Figura 20. Diagrama lógico de cómo funciona la simulación de eventos discretos.

2.5.6 Ejemplo de una simulación manual de eventos discretos

Para ilustrar la forma en que la simulación de eventos discretos funciona, se presenta una simulación manual acerca de un cajero automático (*Automatic Telling Machine, ATM*, por sus siglas en inglés). Los clientes llegan a usar el ATM a un tiempo entre llegadas de 3 minutos exponencialmente distribuidos. Cuando los clientes llegan al sistema, se forman en una cola para esperar su turno. La cola tiene una capacidad de un número infinito de clientes.

El ATM tiene una capacidad de 1.

Los clientes se tardan un promedio de 2.4 minutos exponencialmente distribuidos en el ATM para completar sus transacciones, lo cual es llamado el *tiempo de servicio* del ATM. Asumiendo que la simulación inicia en un tiempo de cero, simular el sistema ATM durante sus primeros 22 minutos de operación, estimar el tiempo de espera de los clientes en la cola y el número de clientes en la cola.

Un diagrama de flujo de las entidades en el sistema ATM es lo que se muestra en la figura 21.

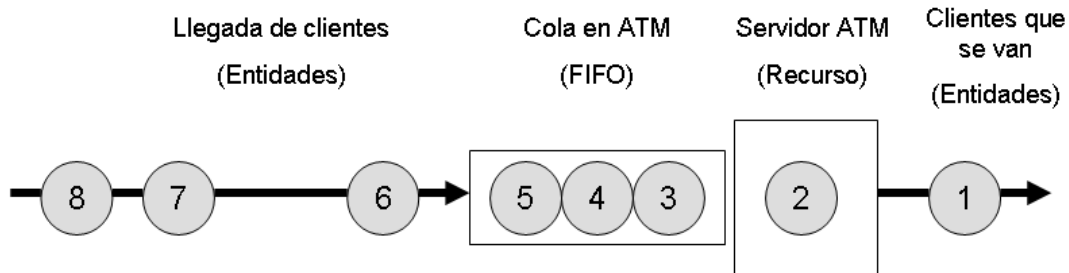


Figura 21. Flujo de las entidades en el ejemplo del sistema ATM.

Suposiciones del modelo de simulación

En cualquier simulación, tienen que hacerse ciertas suposiciones donde la información no es clara o está incompleta.

Las suposiciones que se deben de hacer para esta simulación son las siguientes:

1. No hay clientes en el sistema inicialmente, así que la cola está vacía y el ATM está ocioso.
2. El tiempo de traslado de la cola hacia el ATM es insignificante y por lo tanto, ignorado.
3. Los clientes son procesados en la cola de acuerdo al sistema *FIFO*.
4. El ATM nunca tiene fallas.

Preparando la simulación

Una simulación de eventos discretos no genera todos los eventos por adelantado. Para obtener valores de tiempo entre llegadas distribuidas exponencialmente, la simulación utiliza una función sólo cuando un nuevo cliente necesita ser programado para agregarse en la cola del ATM. De la misma manera, la simulación utiliza una función para obtener un tiempo de servicio distribuido exponencialmente en el ATM sólo después de que el cliente ha tenido acceso al ATM y el tiempo de partida del cliente futuro es necesitado. Un calendario de eventos es lo que coordina el proceso de llegada de los clientes y los eventos de partida de los mismos.

Reloj de simulación

Cuando la simulación pasa de un evento discreto al siguiente, el reloj de simulación es adelantado rápidamente de acuerdo al tiempo que el siguiente evento está programado. No hay razón para esperar el paso del tiempo entre eventos.

Atributos de las entidades

Para capturar algunos datos estadísticos acerca de las entidades que se están procesando en el sistema, la simulación de eventos discretos mantiene un arreglo de valores de los atributos de las entidades. Los atributos de las entidades son características que son mantenidas para tal entidad hasta que salga del sistema.

Variables de estado

Dos variables de estado con cambio discreto son necesarias para determinar cómo el estado del sistema cambia cuando los clientes llegan y se van del sistema ATM:

1. Número de entidades en cola en el paso i , NQ_i .
2. El estatus $_i$ del ATM para denotar si está ocupado u ocioso en el paso i .

Acumuladores estadísticos

El tiempo promedio que los clientes esperan en cola es un simple promedio. Computar esto requiere que se grabe cuántos clientes pasaron por la cola y la cantidad de tiempo que cada cliente estuvo en la cola. El número promedio de clientes en cola es un promedio medido en tiempo usualmente llamado *tiempo promedio* en simulación.

Lo que la simulación necesita para llevar la cuenta de cada tiempo de paso de simulación i es:

Tiempo promedio simple en cola.

- Registrar el número de clientes procesados en la cola, total procesados.
- Para un cliente procesado en la cola, registrar el tiempo que esperó en la cola.

Tiempo promedio de clientes en cola.

Para la duración del último paso, el cuál es $t_i - t_{i-1}$, y el número de clientes en cola durante el último paso, el cuál es NQ_{i-1} , registrar el producto de $t_i - t_{i-1}$ y NQ_{i-1}

Eventos

Hay dos tipos de eventos recurrentes que cambian el estado del sistema: eventos de llegada y eventos de partida. Un evento de llegada ocurre cuando un cliente llega a la cola. Un evento de partida ocurre cuando un cliente completa su transacción en el ATM.

Calendario de eventos

El calendario de eventos mantiene la lista de eventos activos en orden cronológico. La simulación avanza removiendo el primer evento listado en el calendario, sincronizando el reloj de simulación, t_i , de acuerdo al tiempo en el cuál el evento es programado para ocurrir, y procesando el evento.

Ejecutando la simulación

Para poner a trabajar la simulación manual, se requiere de una forma de generar variables aleatorias que estén distribuidas exponencialmente para tiempos entre llegadas y tiempos de servicio. En lugar de utilizar calculadoras para generar números aleatorios y transformarlos en variables aleatorias distribuidas exponencialmente, se pueden construir hojas de cálculo.

Cálculo de resultados

Cuando la simulación termina, las estadísticas que resumen el comportamiento del modelo son calculadas y mostradas en un reporte de salida. Algunas de las estadísticas reportadas consisten en valores promedio, valores máximos y valores mínimos.

Promedio simple

El promedio simple se calcula dividiendo la suma de todos los valores de las observaciones por el número de observaciones:

$$\text{Promedio simple} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

donde n es el número de observaciones y x_i es el valor de la i^{va} observación.

Tiempo promedio

El tiempo promedio reporta el valor promedio de una variable de respuesta medida por el tiempo de duración para cada valor observado de la variable:

$$\text{Tiempo promedio} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{T}$$

donde x_i es el valor de la i^{va} observación, T_i es el tiempo de duración de la i^{va} observación y T es la duración total sobre la cual son tomadas las observaciones.

Salidas

Hay que notar que las condiciones de inicio de la simulación pueden influenciar las estadísticas de salida. Dado que el sistema empezó vacío, las estadísticas del contenido de cola son menores de lo que ellas serían si se empezara la simulación con clientes en el sistema. Además, se obtienen diferentes resultados de acuerdo a los tiempos de simulación.

El modelador debe cuidadosamente analizar el significado de los resultados dados.

2.6 Programas comerciales de simulación

Mientras un modelo de simulación puede ser programado usando cualquier lenguaje de desarrollo tales como C++ o Java, la mayoría de los modelos son construidos usando programas de simulación comerciales como *ProModel*. Los programas de simulación comerciales consisten de varios módulos para proporcionar diferentes funciones durante el modelado de simulación.

Los módulos típicos son mostrados en la figura 22.

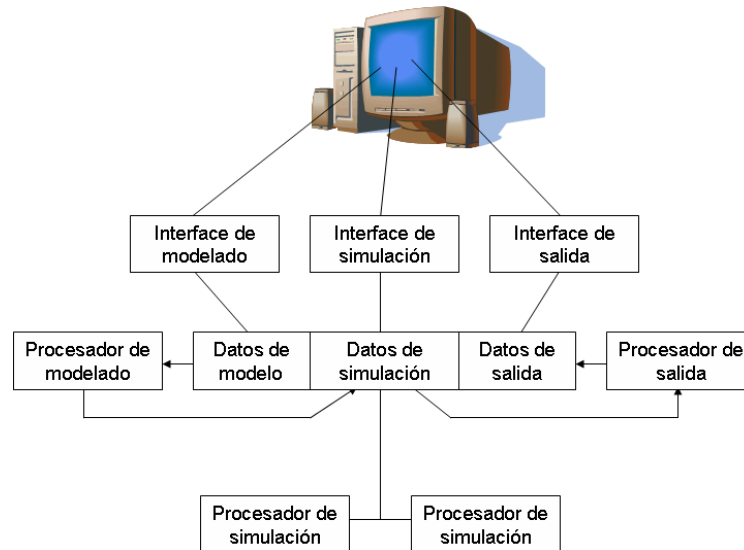


Figura 22. Componentes típicos de un programa de simulación.

Modelando el módulo de interfase

Un modelador define un modelo usando una entrada o modelando el módulo de interfase. Éste módulo proporciona herramientas gráficas, diálogos y otras capacidades para editar textos e información de modelos.

Procesador de modelo

Cuando se pone a trabajar un modelo completo, el procesador de modelo toma la base de datos del modelo y algunos otros archivos de información externos que son usados como datos de entrada y crean una base de datos de simulación.

Esto involucra traducciones de datos y posiblemente compilación de lenguaje.

Esta conversión de datos es realizada porque la base de datos del modelo y los archivos externos están generalmente en un formato que no puede ser usado eficientemente por el procesador de simulación.

Módulo de interfase de simulación

El módulo de interfase de simulación muestra la animación que ocurre durante el desarrollo de la simulación. También permite al usuario interactuar con la simulación para controlar la velocidad actual de la animación, lógica de depuración, variables de estado, reportes instantáneos solicitados, etcétera. Si se provee una capacidad interactiva visual, el usuario incluso puede hacer cambios dinámicamente para modelar variables con retroalimentación visual inmediata que provocan tales cambios.

Procesador de simulación

El procesador de simulación se encarga de los eventos simulados y actualiza las estadísticas y variables de estado. Un procesador de simulación típico consta de los siguientes componentes:

- *Variable de reloj.* Es una variable usada para darle seguimiento al tiempo transcurrido durante la simulación.
- *Calendario de eventos.* Es una lista de eventos programados ordenados cronológicamente de acuerdo al tiempo en el cual deben de ocurrir.
- *Administrador del despacho de eventos.* La lógica interna usada para actualizar el reloj y administrar la ejecución de eventos mientras ocurren.
- *Listas de espera.* Una o más listas contienen eventos esperando por un recurso u otra condición para ser satisfecha antes de continuar con el proceso.
- *Generador de números aleatorios.* Es un algoritmo para generar una o más cantidades de números entre 0 y 1.
- *Generadores de variables aleatorias.* Son rutinas para generar variables aleatorias en base a una distribución de probabilidad especificada.

Procesador de animación

El procesador de animación interactúa con la base de datos de la simulación para actualizar los datos gráficos que corresponden a los datos del estado cambiante. La animación es usualmente mostrada durante la simulación, aunque algunos productos la activan al final.

Se puede aprender mucho acerca del comportamiento de un modelo simplemente observando la animación (una imagen vale más que mil palabras, y una animación vale mil imágenes).

Para la mayoría de las simulaciones donde se requieren análisis estadísticos, la animación no sustituye el resumen que viene después de la simulación, el cuál proporciona una vista cuantitativa del desempeño del sistema completo.

Procesador de salida

El procesador de salida resume los datos estadísticos recolectados durante el desarrollo de la simulación y crea una base de datos de salida. Las estadísticas son reportadas en medidas de desempeño tales como:

- Utilización de recursos.
- Tamaños de colas.
- Tiempos de espera.
- Tasas de procesamiento.

Módulo de interfase de salida

El módulo de interfase de salida provee una interfase de usuario para mostrar los resultados de salida obtenidos de la simulación. Los resultados de salida pueden ser mostrados en forma de reportes o gráficas. La capacidad de análisis de datos de salida tales como los análisis de correlación y el cálculo de intervalos de confianza también son ofrecidos. Algunos productos de simulación incluso se enfocan a áreas de problemas potenciales tales como los cuellos de botella. [27]

2.6.1 Quest

Quest es un paquete de simulación tridimensional de eventos discretos que está diseñado para procesos de manufactura. Es utilizado como herramienta para asegurar la efectividad de los costos en el diseño del proceso, identificar y entender los problemas y en evaluar propuestas para cambios en los procesos.

Características:

- Permite al usuario seleccionar entre la construcción de modelos en 2D o 3D.
- Creación, modificación e importación de geometrías CAD.
- La interfase de usuario activa la construcción y corrida de los modelos.
- Permite elaborar modelos complejos sin la necesidad de programación.

- Como resumen, la interfase de usuario es usada para crear elementos del modelo, describir su comportamiento, correr la simulación, revisar resultados y realizar experimentos de simulación del tipo “que pasaría si...”
- Extensión de la capacidad vía VCE (*Virtual Collaborative Engineering*, por sus siglas en inglés), lo cual permite a los observadores, localizados en diferentes partes del mundo, observar e interactuar dentro de la simulación tridimensional, conectados mediante una línea telefónica.
- Amplio rango de resultados estadísticos, incluyendo tablas y gráficas.
- Captura automática de resultados para cada corrida de simulación, las cuales pueden ser escogidas y comparadas por el usuario.
- Control de todos los elementos por medio de SCL (*Simulation Control Language*, por sus siglas en inglés), el cual es un código para las reglas de comportamiento estándar.
- BCL (*Batch Control Language*, por sus siglas en inglés), el cual es usado para crear series de corridas con escenarios alternativos sin la intervención del usuario.
- Integración de los siguientes productos de simulación: IGRIP, UltraArc, Ultraspot, ERGO, VNC, UltraGrip, Envision, UltraPaint, y Assembly.
- Acceso e ingreso de información de hojas de cálculo.
- Resultados en formato AVI, JPEG, MPEG y TIFF.
- Integración de submodelos. [28]

En la figura 23 se muestra un ejemplo de modelo tridimensional elaborado en el *software* de simulación Quest.



Figura 23. Modelo tridimensional elaborado en el *software* Quest.

2.6.2 Arena

Arena es un *software* de simulación que se utiliza para proyectos de mediana a larga escala que incluyen cambios sensibles relacionados a la cadena de suministro, manufactura, procesos,

logística, distribución, almacenamiento y sistemas de servicio. Está construido sobre el lenguaje de simulación SIMAN. [29]

Características:

- Compatibilidad con procesadores de texto, hojas de cálculo y paquetes CAD.
- Interfase con aplicaciones externas tales como PLC's.
- Lógica y modelado básico.
- Simulación de procesos discretos, continuos y combinaciones de ambos.
- Gráficas y animaciones en dos y tres dimensiones.
- Reportes en forma de tablas y gráficas.
- Comparación de escenarios.
- Construcción visual de modelos (no se necesita programación).
- Jerarquía de modelado y sub modelado.
- Acceso mediante ADO/ODBC (Oracle, Access, Excel, SQL...).[30]

En la figura 24 se presenta un modelo de simulación elaborado en Arena.

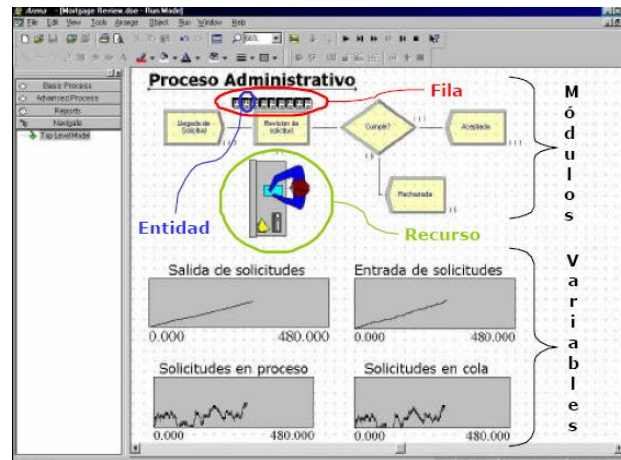


Figura 24. Modelo de simulación elaborado en el software Arena.

2.6.3 Witness

Witness es un *software* de simulación usado para corridas de producción en un tiempo arbitrario de tiempo. Permite la construcción de instalaciones para tener una visión de cómo las líneas de producción podrían operar en la realidad.

Características:

- Modelación de elementos continuos y discretos.
- Proporciona reportes en forma de tablas o gráficas (interfase con hojas de cálculo).
- Más de 500 íconos disponibles.
- Permite la reproducción de clips de audio y video.
- Contiene un módulo de optimización el cual prueba los distintos cambios del modelo e indica cuál es el mejor, basado en una función objetivo definida por el modelador.
- Permite la construcción de modelos tridimensionales a partir de modelos 2D.
- Posibilidad de adherir cámaras a objetos de manera que se puedan seguir a través del mundo de realidad virtual. [31]

En la figura 25 se muestra un ejemplo de modelo tridimensional elaborado en Witness.

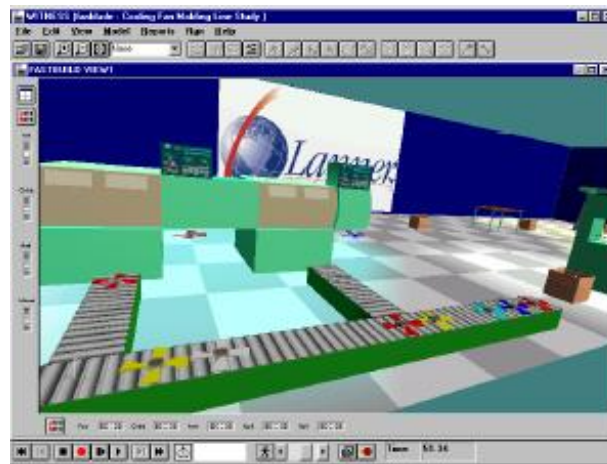


Figura 25. Modelo tridimensional elaborado en el *software* Witness.

2.6.4 DELMIA

DELMIA (*Digital Enterprise Lean Manufacturing Interactive Application*, por sus siglas en inglés) es la marca para soluciones digitales de simulación y manufactura elaborada por Dassault Systemes. [32]

DELMIA es la solución de procesos de ingeniería para fabricación y mantenimiento dentro de la oferta 3D PLM. A través de 3D PLM, se optimizan los procesos relacionados con ingeniería, fabricación, mantenimiento y apoyo dentro de entornos de trabajo interactivos. Compartiendo productos comunes, procesos y recursos de modelos (PPR), las empresas pueden obtener, compartir y reutilizar conocimientos durante el ciclo de vida del producto. La

arquitectura abierta de CAA V5 permite la extensión del programa en diferentes entornos de la empresa. [33]

Características:

- Permite modelar humanos para determinar el confort y el desempeño.
- Las soluciones DELMIA V5R8 integran todas las capacidades requeridas para la fabricación en los procesos de ingeniería.
- Las soluciones “end-to-end” DELMIA V5R8 mejoran y facilitan las interacciones entre todos los actores que participan en la ingeniería de productos, fabricación de ingeniería y planificación de la producción.
- Con la integración de PPR, la ingeniería interactiva se convierte en realidad.
- La integración a través de la planificación de procesos, simulación y programación “off-line” permite al diseño, la obtención y reutilización de procesos basados en metodologías avanzadas.
- Datos de proceso basados en vista tridimensional, datos de producto y simulaciones usando una interfase de usuario gráfica de “Touch screen” (Opcional).
- Consolida toda la información y datos de ingeniería en un visor 3D fácil de usar.
- Las instrucciones de trabajo se pueden visualizar utilizando el DPM para la simulación de ensambles.
- La información referenciada se puede ver a través de hipervínculos en exploradores estándar.
- Las simulaciones pueden ser integradas con herramientas como los sistemas MES.
- Gran variedad de actividades en el campo del maquinado.
- Magnífica herramienta para el ramo automotriz.
- Permite la creación y optimización de programas de inspección. Los usuarios definen los diseños y la información de las tolerancias.
- Permite a los usuarios determinar el tiempo requerido para realizar una secuencia de trabajo basándose en estándares de la compañía o métodos de medidas del tiempo.
- Posee un navegador que permite el acceso a todo el contenido de la planeación y relaciones lógicas almacenadas en el centro de manufactura.
- Provee un ambiente de apoyo en la comprensión de los procesos y la planeación de los recursos.

- Ofrece herramientas para desarrollar, crear e implementar recursos, rutinas y programaciones mecánicas que se integran con el proceso de planeación y las soluciones de detallado y validación.
- Programación de robots. [34]

En la figura 26 se muestra un ejemplo de modelo tridimensional elaborado en DELMIA.



Figura 26. Modelo tridimensional elaborado en el *software* DELMIA.

2.6.5 Plant Simulation

UGS tiene una extensa experiencia en el desarrollo de soluciones para procesos que transforman a las compañías manufactureras líderes a nivel mundial. En abril de 2005 UGS adquirió a Tecnomatix y le cambió el nombre a “Plant Simulation”.

Plant simulation permite el modelado y simulación de sistemas de producción y procesos para asegurar, desde antes del inicio de la producción, una operación eficiente.

Características:

- Interfases con herramientas de *software* tales como ODBC o SQL.
- Aspectos de la orientación a objetos en Plant simulation:
 - Rápido desarrollo y al mismo tiempo mejor calidad.
 - Largo ciclo de vida del producto.
 - Interfase con objetos.
- Elaboración de prototipos rápida.
- Nivel de jerarquía.

- Biblioteca extensa, incluyendo gráficas en tres dimensiones.
- Cambios durante la simulación.
- Permite las “copias de herencia”.
- Conceptos multilinguaje.
- Interfase vía Internet.
- Ejecución de archivos en formato AVI o MPEG.
- Permite imágenes externas como “animación de fondo”.
- Intercambio de información dinámico.
- Simulación de procesos continuos y discretos. [35]

En la figura 27 se muestra un modelo tridimensional elaborado en Plant Simulation.

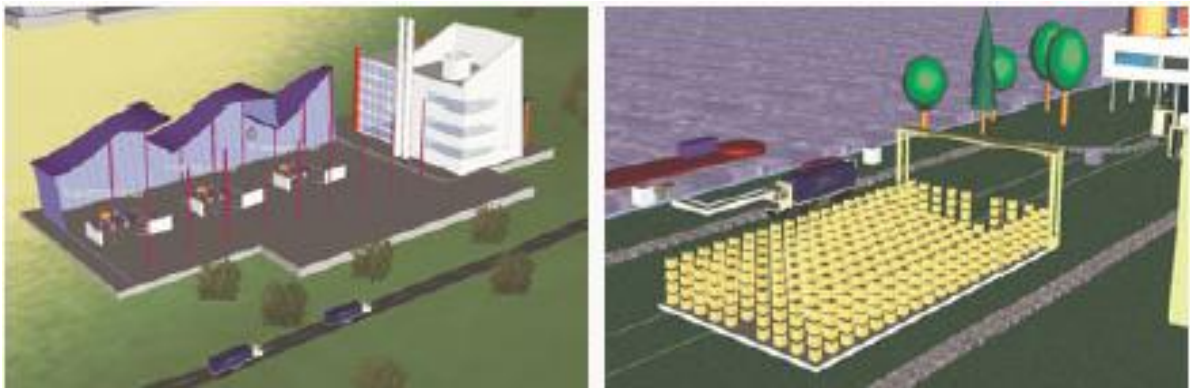


Figura 27. Modelo tridimensional elaborado en el *software* Plant Simulation.

2.6.6 ProModel

ProModel es un paquete de simulación comercial poderoso y fácil de usar que está diseñado para modelar efectivamente cualquier sistema de procesos de eventos discretos. Es un simulador con animación para computadoras personales. Permite simular cualquier tipo de sistemas de manufactura, logística, manejo de materiales, etcétera. Se pueden simular bandas de transporte, grúas viajeras, ensamble, corte, talleres, logística, y otros.

ProModel no requiere programación, aunque sí lo permite. Corre en equipos 486 en adelante y utiliza la plataforma Windows®. Tiene la combinación perfecta entre facilidad de uso y flexibilidad para aplicaciones complejas.

Se puede simular justo a tiempo, teoría de restricciones, sistemas de empujar, jalar, logística, etcétera. Prácticamente cualquier sistema puede ser simulado.

Una vez hecho el modelo, éste puede ser optimizado para encontrar los valores óptimos de los parámetros claves del modelo.

El módulo de optimización ayuda a encontrar rápidamente la solución óptima, en lugar de solamente hacer prueba y error. *ProModel* cuenta con 2 optimizadores disponibles y permite de esta manera explotar los modelos de forma rápida y confiable.

Beneficios clave:

- Único *software* de simulación con optimización plenamente integrada.
- Creación de modelos rápida, sencilla y flexible.
- Modelos optimizables.
- Elementos de Logística, Manejo de Materiales, y Operaciones incluidas. (Bandas de transporte, grúas viajeras, operadores).
- Entrenamiento en Español.
- Importación del *layout* de AutoCAD, y cualquier herramienta de CAD / CAE / Diseño, así como de fotografías digitales.
- Soporte Técnico 24 horas al día, 365 días del Año.
- Integración a *Excel*, *Lotus*, *Visual Basic* y herramientas de Microsoft.
- Genera en automático las gráficas en 3 dimensiones para visualización en el espacio tridimensional.

En la figura 28 se muestra un modelo tridimensional elaborado en *ProModel*.

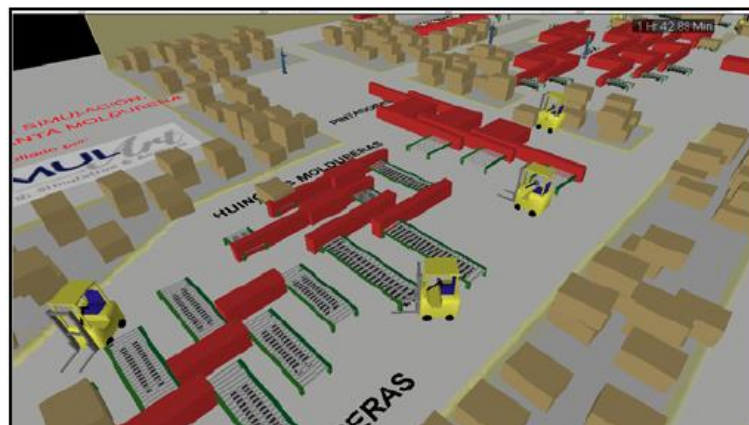


Figura 28. Modelo tridimensional elaborado en el *software* *ProModel*.

En la tabla 3 se muestra una comparación de los distintos *software* de simulación mencionados.

Tabla 3. Comparativo de distintos *software* de simulación.

	Q	A	W	D	PS	P
Modelación en tres dimensiones.	•	•	•	•	•	•
Biblioteca extensa.	•	•	•	•	•	
Importación de imágenes CAD.	•	•	•	•	•	•
Modificación de imágenes CAD.	•	•	•	•	•	
Complejidad de modelos sin necesidad de programación.	•	•	•	•	•	•
Interfase de usuario.	•	•	•	•	•	•
Interacción mediante Internet.	•	•	•	•	•	•
Resultados estadísticos en tablas y gráficas.	•	•	•	•	•	•
Control mediante SCL (Código para las reglas de comportamiento estándar).	•					
Batch Control Language (Creación de series de corridas con escenarios alternativos sin la intervención del usuario).	•	•			•	
Integración de otros <i>software</i> de simulación.	•		•	•	•	
Interfase con hojas de cálculo.	•	•	•	•	•	•
Resultados en video.	•		•		•	
Resultados en imágenes.	•	•	•	•	•	•
Tiempos de carga y descarga, set up, turnos, etcétera.	•	•	•	•	•	•
Integración de submodelos.	•	•	•	•	•	•
Modelación de procesos discretos.	•	•	•	•	•	•
Modelación de procesos continuos.		•	•		•	
Reproducción de clips de audio.	•	•	•	•	•	•

Q = Quest W = Witness PS = Plant Simulation

A = Arena D = DELMIA P = ProModel

2.7 Lenguajes de simulación y simuladores

Muchas propiedades en programación de modelos de simulación discreta han sido desarrolladas en lenguajes especiales orientados a simulación, dejando la ardua labor de programación en FORTRAN, C o PASCAL a lenguajes de simulación, los que incluyen facilidades de animación. Actualmente, existen cerca de 100 *software* de simulación.

2.7.1 Lenguajes vs. simuladores

Hay diferencias entre lenguajes de simulación y simuladores.

Los lenguajes de simulación son frecuentemente considerados de propósito más general y tienen menos construcciones predefinidas para el modelado de tipos específicos de sistemas.

Con el paso del tiempo, la distinción entre lenguajes de simulación y simuladores se ha tornado borrosa tal que las construcciones de modelado especializadas han sido agregadas a los lenguajes de simulación, haciéndolos más fácil de utilizar.

En lugar de poner los lenguajes y simuladores en lados extremos del mismo espectro donde la flexibilidad y facilidad de uso son mutuamente excluyentes, es más apropiado medir la flexibilidad y facilidad de uso para todos los programas de simulación a lo largo de dos ejes separados (figura 29).

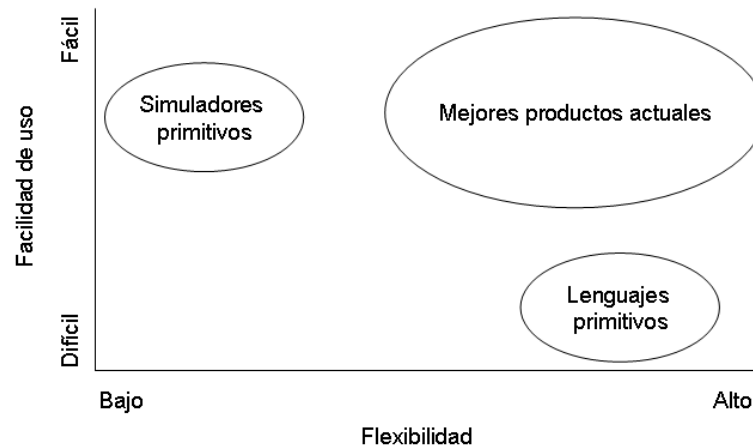


Figura 29. Nuevo paradigma acerca de la facilidad de uso y flexibilidad.

Lenguajes de simulación y lenguajes de propósitos generales

La importancia de escribir modelos de simulación en lenguajes de propósitos generales como FORTRAN radica en:

- Permite conocer los detalles íntimos de la simulación.
- Es imprescindible, cuando no se dispone de *software* de simulación.
- Algunos modelos en lenguajes de simulación permiten interfases con lenguajes generales, específicamente FORTRAN.

Por otra parte, los lenguajes de simulación ofrecen mayores ventajas, porque:

- Automáticamente proveen muchas de las facilidades necesarias en la simulación del modelo.
- Proveen un natural ambiente para modelamiento de la simulación.
- Son fáciles de usar.
- Proveen una gran interacción entre edición, depuración y ejecución. Alcanzando algunos de ellos implantación de la ingeniería de *software*.

2.8 Futuro de la simulación

Los productos de simulación han evolucionado para proveer más que simple capacidad de simulación a solas. Los productos de simulación modernos tienen arquitecturas abiertas para proporcionar capacidad de interfase con otras aplicaciones tales como programas CAD y herramientas de planeación empresarial.

La simulación es una tecnología que continuará evolucionando mientras la tecnología relacionada mejora y más tiempo es dedicado al desarrollo de los programas. Los productos de simulación que han sido enfocados en mercados verticales están en aumento. Esta tendencia está haciendo a la simulación más fácil de usar y orientada a más soluciones.

Quizá el cambio más dramático de la simulación será en el área de interoperabilidad de *software* e integración de tecnología. Históricamente, la simulación ha sido vista como un proyecto aislado basado en tecnología.

La intención de integrar a la simulación como un componente implantado en las aplicaciones de la empresa es parte de un largo desarrollo de componentes de *software* que pueden ser distribuidos por Internet. Este movimiento está siendo impulsado por tres tecnologías de información emergentes:

1. Tecnologías de programación orientada a objetos.
2. La Internet, la cual conecta a las comunidades de negocios e industrias.
3. Tecnologías de servicio en red tales como JZEE y Microsoft's.NET. Estas tecnologías prometen capacitar la ejecución de modelos distribuidos y paralelos, y proveer un mecanismo para mantener los modelos distribuidos. [27]

2.9 Estadística

Introducción

Las técnicas estadísticas se aplican en casi todos los aspectos de la vida: se diseñan encuestas con el fin de recoger las primeras cifras de las elecciones y pronosticar los resultados, se realizan entrevistas con consumidores para obtener más información acerca de los productos que prefieren, etcétera.

El *Webster's new collegiate dictionary* ("Nuevo Diccionario Colegiado Webster") define la estadística como "una rama de las matemáticas que tiene por objeto la recopilación, el análisis, la interpretación y la presentación de una gran cantidad de datos numéricos". Stuart y Ord (1991) señalan: "La estadística es la rama del método científico relacionada con la recopilación de los datos que se obtienen al contar o medir las propiedades de las poblaciones". Graybill y Boes (1974) definen a la estadística como "la tecnología del método científico" y añaden que la estadística se relaciona con: "1) el diseño de experimentos e investigaciones y 2) la inferencia estadística". Todos los autores dan a entender que la

estadística es una teoría que trabaja con información, cuyo objetivo consiste en hacer inferencias.

El conjunto total de datos recibe el nombre de *población* y el grupo de datos seleccionado el de *muestra*.

En general, el estudio de la estadística se relaciona con el diseño de experimentos o encuestas a partir de una muestra para obtener cierta información con un costo mínimo y darle a ésta un uso óptimo, y llegar a inferencias respecto a una población. El objetivo de la estadística consiste en hacer inferencias de una población con base en la información que contiene una muestra de ésta y proporcionar una medida de validez de la inferencia.

2.9.1 Descripción de un conjunto de mediciones: métodos gráficos

En sentido amplio, hacer una inferencia implica describir parcial o totalmente un fenómeno u objeto. Cuando disponemos de medidas descriptivas importantes y adecuadas, las dificultades son mínimas, no obstante, éste no siempre es el caso.

Una población individual (o cualquier conjunto de medidas) puede describirse mediante una *distribución de frecuencias relativas*, también llamada *histograma de frecuencias relativas* y su gráfica se construye subdividiendo el eje de medidas en intervalos de igual amplitud. Por ejemplo, para describir las diez medidas: 2.1, 2.4, 2.2, 2.3, 2.7, 2.5, 2.4, 2.6 y 2.9 podríamos dividir el eje de medición en intervalos de igual amplitud (digamos de 0.2 unidades) comenzando en 2.05. Las frecuencias relativas (la fracción del número total de observaciones) calculadas para cada intervalo aparecen en la figura 30, la cual proporciona una descripción gráfica clara del conjunto de diez medidas.

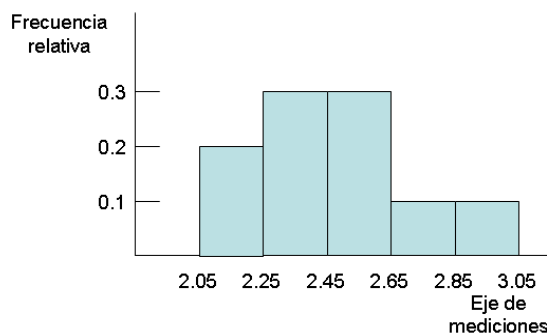


Figura 30. Histograma de frecuencias relativas.

Puede resultar útil adoptar ciertos criterios para elegir los intervalos, aún cuando estos criterios sean un tanto arbitrarios. *Los puntos de división del eje de mediciones deben elegirse de tal forma que las medidas no coincidan con un punto de división.* Lo anterior elimina posibles fuentes de error y la gráfica se traza con cierta facilidad. El segundo criterio se relaciona con la amplitud de los intervalos y, en consecuencia, con el mínimo número de intervalos necesarios para describir los datos.

Cuanto mayor sea la cantidad de datos, mayor será la cantidad de intervalos que pueden incluirse sin que los datos pierdan su representatividad. *Se sugiere cubrir la amplitud de variación de los datos de 5 a 20 intervalos y emplear el mayor número de intervalos para cantidades más grandes de datos.*

Hay quienes consideran que la descripción de los datos constituye un fin en sí mismo, a esto se debe que, a menudo, se utilicen los histogramas con este propósito. El área de un rectángulo sobre un intervalo dado es proporcional a la fracción del número total de mediciones que caen en dicho intervalo. Ampliemos esta idea un poco más. Si se toma una medición al azar del conjunto original de datos, la probabilidad de que ésta se localice en un intervalo determinado es proporcional al área del histograma correspondiente a este intervalo. Por ejemplo, en los datos utilizados para construir la figura 30, la probabilidad de que una medida elegida aleatoriamente caiga en el intervalo que va de 2.05 a 2.45 es de 0.5, puesto que la mitad de las medidas caen en el intervalo especificado. De la misma manera, el *área del histograma* ubicada sobre el intervalo que abarca de 2.05 a 2.45 es de 0.5. Es evidente que esta interpretación se aplica a la distribución de cualquier conjunto de mediciones –una población o una muestra–. Si la figura 31 representa la distribución de frecuencias de utilidades (en millones de dólares) para una población teórica, de las utilidades obtenidas por los contratos de acuerdo con determinados valores de las variables independientes (monto del contrato, grado de competencia, etcétera), la probabilidad de que el siguiente contrato (que tenga variables independientes con los mismos valores) arroje utilidades que caigan dentro del intervalo de 2.05 a 2.45 millones es proporcional al área sombreada bajo la curva de distribuciones.

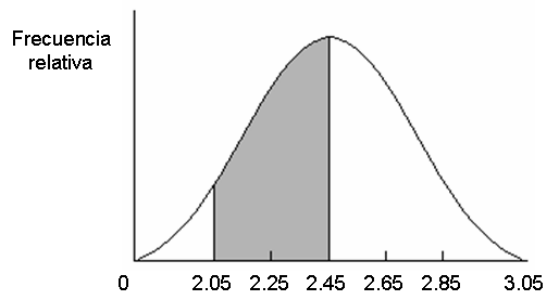


Figura 31. Distribución de frecuencias relativas.

2.9.2 Descripción de un conjunto de mediciones: métodos numéricos

Los histogramas de frecuencias relativas proporcionan información útil respecto del conjunto de mediciones, pero no son adecuados para hacer inferencias porque no están bien definidos. Para hacer inferencias de una población basadas en los datos de una muestra y medir la validez de éstas, necesitamos definir cantidades de manera rigurosa para analizar la información de la muestra. Mediante las matemáticas es posible obtener ciertas propiedades de esas cantidades muestrales y establecer condiciones probabilísticas en cuanto a la validez de las inferencias.

Las cantidades que se definirán a continuación son *medidas numéricas descriptivas* de un conjunto de datos. En otras palabras, son números que describen la distribución de frecuencias de cualquier conjunto de mediciones.

La medida de tendencia central que más se usa en estadística es la media aritmética.

La *media aritmética* de un conjunto de n mediciones y_1, y_2, \dots, y_n se determina mediante la ecuación:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

La media de población correspondiente se denota por medio de μ .

El símbolo \bar{y} se lee “y barra”, se refiere a una media muestral. Por lo general, no es posible medir el valor de la media de población, μ ; más bien, μ es una constante desconocida que podríamos calcular a partir de la información de la muestra.

La media de un conjunto de medidas sólo indica el centro de la distribución de los datos, no proporciona en sí misma una descripción adecuada de un conjunto de mediciones. Dos conjuntos de mediciones podrían tener distribuciones de frecuencias muy distintas, pero con la misma media, como se muestra en la figura 32. La diferencia entre las distribuciones I y II en la figura radica en la variabilidad o dispersión de las medidas a cada lado de la media. Para describir los datos de manera adecuada es preciso definir medidas de la variabilidad de datos.

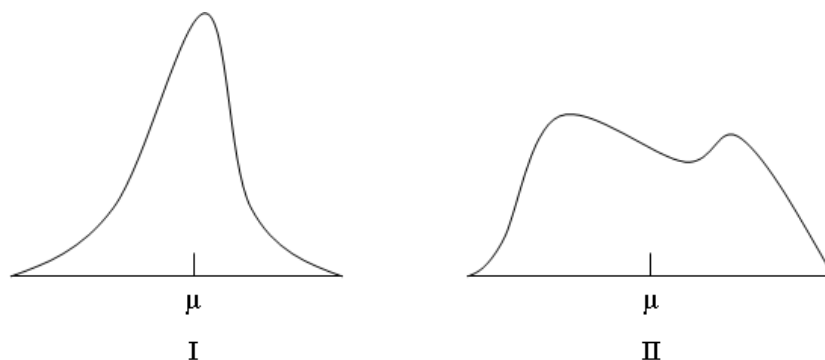


Figura 32. Distribución de frecuencias con la misma media, pero diferentes varianzas.

La medida de variabilidad más común empleada en estadística es la *varianza*, que constituye una función de las desviaciones (o distancias) de las mediciones muestrales de la media.

La *varianza* de una muestra de medidas y_1, y_2, \dots, y_n es la suma de los cuadrados de las desviaciones entre las medidas y su media, dividida entre $n - 1$. La varianza muestral se denota por:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

La varianza de población correspondiente se expresa mediante el símbolo σ^2 , pero es la desviación estándar la que proporciona información referente a la variación en un solo conjunto.

La *desviación estándar* de un conjunto de mediciones es la raíz cuadrada positiva de la varianza, es decir:

$$s = \sqrt{s^2}$$

La desviación estándar de población correspondiente se representa por $\sigma = \sqrt{\sigma^2}$

Aunque la desviación estándar se relaciona de manera estrecha con la varianza, se puede utilizar para dar una idea bastante exacta de la variación de los datos en un conjunto de mediciones.

Muchas distribuciones de datos en la vida real tienen la apariencia de una montaña. Esto significa que pueden aproximarse mediante una distribución conocida como curva normal.

Regla empírica

En una distribución de medidas aproximadamente normal (forma de campana) se deduce que el intervalo cuyos puntos extremos son:

$\mu \pm \sigma$ contiene alrededor de 68% de las mediciones;

$\mu \pm 2\sigma$ contiene alrededor de 95% de las mediciones;

$\mu \pm 3\sigma$ contiene casi todas las mediciones.

Una vez que se conoce la distribución de frecuencias de un conjunto de mediciones, se pueden establecer probabilidades respecto a las mediciones. Dichas probabilidades se asocian con las áreas de un histograma de frecuencias.

Por consiguiente, las probabilidades de la regla empírica constituyen áreas bajo la curva normal mostrada en la figura 33.

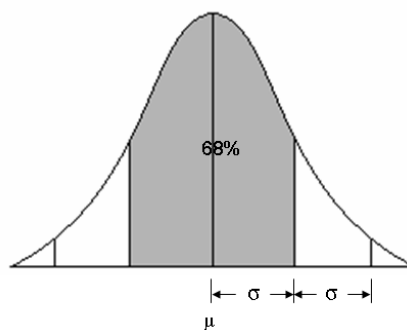


Figura 33. Curva normal.

La utilidad y valor de la regla empírica obedecen a la frecuencia con la que se presentan las distribuciones de datos aproximadamente normales en la naturaleza –sobre todo porque la regla empírica se aplica a distribuciones que no son exactamente normales, sino acampanadas–.

2.9.3 ¿Cómo se hacen las inferencias?

El mecanismo para efectuar inferencias puede ilustrarse en forma adecuada analizando nuestros propios procesos intuitivos para hacer inferencias.

Supongamos que dos candidatos se postulan para un cargo público en nuestra comunidad y que deseamos determinar si el candidato Pérez puede ganar. La población de interés está formada por el conjunto de respuestas de los electores que votarán el día de las elecciones y deseamos determinar si la fracción que favorece al candidato es mayor que 0.5.

Para simplificar, supongamos que todos los electores van a las urnas y que elegimos en forma aleatoria, de la lista, una muestra de 20 personas. Si los 20 electores apoyan a dicho candidato, ¿qué se concluye respecto a las posibilidades que tiene Pérez de ganar las elecciones?

No hay muchas dudas respecto a que la mayoría de las personas pensarían que Pérez ganará las elecciones.

Ganar implica obtener más de 50% de los votos. ¿Concluimos que Pérez ganaría porque creímos que la fracción que lo favorece en la muestra era igual a la fracción que lo favorecía en la población? Es posible que esto no sea cierto. Un sencillo experimento confirmará el hecho de que la fracción muestral que favorece a nuestro candidato no tiene que ser igual a la fracción de la población a favor de él. Si se lanza al aire una moneda perfecta, es evidente, desde un punto de vista intuitivo, que la verdadera proporción de ocasiones en que se obtendrán caras es 0.5. Ahora bien, si muestreamos los resultados que obtenemos al lanzar nuestra moneda 20 veces, la proporción de caras variará de una muestra a otra. Es decir, una vez podríamos observar 12 caras de un total de 20 lanzamientos, lo cual representa una proporción muestral de $12/20 = 0.6$; otra ocasión podríamos observar 8 caras de un total de 20 lanzamientos, lo cual representa una proporción muestral de $8/20 = 0.4$.

De hecho, la proporción de la muestra de caras podría ser de 0, 0.05, 0.10, ..., 1.0.

¿Concluiríamos que Pérez ganaría las elecciones porque sería imposible que 20, de los 20 electores de la muestra, lo apoyaran si, en realidad, menos de 50% del electorado pensaría votar por él? La respuesta a esta pregunta es categóricamente: no, pero nos da la clave para descubrir la lógica de la inferencia. No es *imposible* obtener 20 electores a favor de Pérez de una muestra de 20 (aún cuando menos de 50% del electorado esté a su favor), pero es *muy poco probable*. Por eso concluimos que ganaría.

El ejemplo anterior pone de manifiesto la función de la probabilidad para hacer inferencias. Los especialistas suponen que conocen la estructura del fenómeno en estudio, la población, y aplican la teoría de la probabilidad para hacer inferencias respecto de una muestra particular. Suponiendo que conocen la estructura de una población generada al azar sacando cinco cartas de una baraja convencional, utilizan la probabilidad para hacer inferencias de sacar tres ases y dos reyes. Los expertos aplican la probabilidad para hacer lo contrario –van de la muestra a la población–. Al observar una mano de cinco ases en una muestra, infieren de inmediato que la baraja (de la cual se obtiene la muestra) no es convencional sino que está “arreglada”. Lo fundamental en la inferencia es el problema de calcular la probabilidad de una muestra observada. La probabilidad es el mecanismo que permite hacer inferencias estadísticas. [37]

2.9.4 Muestreo

Concepto e importancia

Es la actividad por la cual se toman ciertas muestras de una población de elementos de los cuales se establecen ciertos criterios de decisión, el muestreo es importante porque a través de él se pueden hacer análisis de situaciones de una empresa o de algún campo de la sociedad.

Terminología básica para el muestreo.

Los términos usados frecuentemente en estadística inferencial son:

- Estadístico. Un estadístico es una medida usada para describir alguna característica de una muestra, tal como una media aritmética, una mediana o una desviación estándar de una muestra.
- Parámetro. Un parámetro es una medida usada para describir alguna característica de una población, tal como una media aritmética, una mediana o una desviación estándar de una población.

Cuando los dos nuevos términos de arriba son usados, por ejemplo, el proceso de estimación en estadística inferencial puede ser descrito como el proceso de estimar un parámetro a partir del estadístico correspondiente, tal como usar una media muestral (un estadístico para estimar la media de la población, o parámetro). [38]

Muestreo aleatorio simple

El muestreo sin reemplazamiento es conocido como *muestreo aleatorio simple*. Para ver por qué este método siempre es preferido al muestreo con reemplazamiento, supóngase que se tiene $N = 4$ unidades μ_1, μ_2, μ_3 y μ_4 en la población, y que las correspondientes medidas de las características son:

$$X_1^* = 5 \quad X_2^* = 3 \quad X_3^* = 1 \quad X_4^* = 2$$

Para los propósitos de esta discusión, los valores podrían ser el número de las personas que viven en cada una de cuatro unidades habitacionales que constituyen una población. Se realizará una comparación entre el muestreo aleatorio con y sin reemplazamiento para una muestra de tamaño $n = 2$. Primero se listan todas las posibles muestras no ordenadas de tamaño $n = 2$, de acuerdo a los valores que pueden tomar las variables (tabla 4):

Tabla 4. Posibles muestras no ordenadas de tamaño $n = 2$.

Con reemplazamiento				Sin reemplazamiento	
(5, 5)	(3, 3)	(1, 1)	(2, 2)	(3, 1)	(1, 2)
(5, 3)	(3, 1)	(1, 2)		(5, 1)	(3, 2)
(5, 1)	(3, 2)			(5, 2)	
(5, 2)					

Cualquier muestra que se pueda obtener en muestreo sin reemplazamiento también se puede obtener con reemplazamiento. Pero, los valores repetidos no se pueden obtener al realizar el muestreo sin reemplazamiento.

En un muestreo con reemplazamiento se tiende a recoger más información sobre la población de la que se puede obtener con muestreo sin reemplazamiento.

En base a la información, podríamos preguntarnos que tanto se acerca la media muestral de $\bar{X} = \frac{x_1 + x_2}{2}$, a la media poblacional $(5 + 3 + 1 + 2)/4 = 2.75$ en cada uno de los dos casos. Aunque en este ejemplo se conoce la media de la población, en aplicaciones reales no podría conocerse sin un censo completo.

Muestreo con reemplazamiento

Continuando con nuestro ejemplo, la muestra no ordenada (5, 3) consta de la unión de [5 primero, luego 3] y [3 primero, luego 5]. La probabilidad de cada uno de estos dos últimos eventos es 1/16 porque cada uno de los cuatro valores tiene igual probabilidad de aparecer en cada experimento. Por consiguiente, para esta muestra, $\bar{x} = (5 + 3)/2 = 4$ tiene una probabilidad asociada de 2/16. Procediendo de esta manera, se puede obtener la distribución completa de \bar{x} ; a partir de esta distribución, se calculan la esperanza y la varianza.

$$\text{Distribución de } \bar{X} = \frac{X_1 + X_2}{2}$$

Valor de \bar{x}	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	5
Probabilidad	1/16	2/16	3/16	2/16	3/16	2/16	2/16	1/16

$$E(\bar{X}) = 1\left(\frac{1}{16}\right) + 1.5\left(\frac{2}{16}\right) + \dots + 5\left(\frac{1}{16}\right) = 2.75$$

$$E(\bar{X}^2) = 1^2\left(\frac{1}{16}\right) + 1.5^2\left(\frac{2}{16}\right) + \dots + 5^2\left(\frac{1}{16}\right) = 8.656$$

$$\text{Var}(\bar{X}) = 8.656 - (2.75)^2 = 1.094$$

Muestreo sin reemplazamiento

Cada una de las seis muestras es igualmente probable al realizar el muestreo sin reemplazamiento.

$$\text{Distribución de } \bar{X} = \frac{X_1 + X_2}{2}$$

Valor de \bar{x}	1.5	2	2.5	3	3.5	4
Probabilidad	1/6	1/6	1/6	1/6	1/6	1/6

$$E(\bar{X}) = 1.5\left(\frac{1}{6}\right) + 2\left(\frac{1}{6}\right) + \dots + 4\left(\frac{1}{6}\right) = 2.75$$

$$E(\bar{X}^2) = 1.5^2\left(\frac{1}{6}\right) + 2^2\left(\frac{1}{6}\right) + \dots + 4^2\left(\frac{1}{6}\right) = 8.292$$

$$\text{Var}(\bar{X}) = 8.292 - (2.75)^2 = 0.729$$

Usando cualquiera de los dos métodos de muestreo, la media muestral \bar{X} presenta un valor esperado igual a la media poblacional. Sin embargo, la varianza de \bar{X} es más pequeña cuando se realiza el muestreo sin reemplazamiento, de manera que la distribución de \bar{X} se concentra más alrededor de la media.

Las cantidades básicas poblacionales son: la población, que consiste de N unidades donde la característica tiene un valor de x_1^* en la unidad u_1 , x_2^* en la unidad u_2, \dots, x_N^* en la unidad u_N ; y la media poblacional, que es el promedio de las características de todas las unidades:

$$\text{Media poblacional} = \mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^*$$

Cuando se define la varianza poblacional sobre una población finita, se usa el divisor N , y no $N - 1$, en analogía con la fórmula para varianza muestral. Estrictamente hablando, el término varianza poblacional debería reservarse para la expresión con el divisor de N .

$$\text{Varianza poblacional} = \sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i^* - \mu)^2$$

Uno de los propósitos del muestreo es tratar de obtener la media poblacional μ . Las inferencias acerca de la media poblacional están basadas en la media muestral \bar{X} , calculada a partir de las n unidades seleccionadas por el muestreo aleatorio simple. Por otra parte, la varianza poblacional desconocida puede estimarse usando la varianza muestral S^2 .

Muestra aleatoria simple: X_1, X_2, \dots, X_n .

$$\text{Media muestral} = \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

$$\text{Varianza muestral} = S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$$

Se afirma, sin probar, que $E(\bar{X}) = \mu$ (la media poblacional), por lo cual \bar{X} es un estimador insesgado de μ . También, $E(S^2) = \sigma^2$, de tal manera que la varianza muestral es un estimador insesgado de σ^2 . La varianza de \bar{X} viene dada por:

$$\text{Var}(\bar{X}) = \frac{\sigma^2}{n} \left(\frac{N-n}{N-1} \right) = \frac{\sigma^2}{n} \left(\frac{N-1-f}{N-1} \right) = \frac{\sigma^2}{n} (1-f), \quad f = \frac{n-1}{N-1}$$

donde $f = (n - 1)/(N - 1)$ es aproximadamente igual a la proporción de la población incluida en la muestra.

El tamaño finito de la población reduce la varianza de \bar{X} desde el valor para población infinita σ^2/n hasta $\sigma^2(1 - f)/n$. El factor $(1 - f)$ es llamado factor de corrección para población finita. Cuando la proporción de muestreo f es menor que 0.1 puede ser ignorado.

Propiedades de \bar{X} y S^2 con muestreo aleatorio simple

$$E(\bar{X}) = \mu$$

$$V(\bar{X}) = \frac{\sigma^2}{n} (1 - f)$$

$$\text{donde } f = \frac{n-1}{N-1}$$

$$E(S^2) = \sigma^2$$

$$\text{Desviación estándar estimada de } \bar{X} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \sqrt{(1 - f)}$$

Inferencias acerca de μ bajo muestreo aleatorio simple

Estimador puntual: \bar{X}

$$\text{Límite aproximado del error al 95\%: } \pm 2 \frac{S}{\sqrt{n}} \sqrt{1 - f}, \quad f = \frac{n-1}{N-1}$$

donde

$$\bar{X} = \frac{X_1 + \dots + X_n}{n}$$

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}$$

El límite de error $\pm 2S\sqrt{1 - f} / \sqrt{n}$ es aproximado, pero esta aproximación es bastante buena cuando tanto el tamaño de la muestra n como $N - n$ son muy grandes.

Bajo estas circunstancias, la distribución de \bar{X} es casi normal y $\bar{X} \pm 2S\sqrt{1 - f} / \sqrt{n}$ puede considerarse como un intervalo de confianza del 95% para μ .

Ejemplo 1.

Alguien que está interesado en determinar cómo gastan su tiempo los directores de escuelas primarias, realiza un muestreo aleatorio simple usando 12 escuelas de las 30 que hay en un distrito particular. A los 12 directores se les pregunta cuánto tiempo a la semana necesitan para manejar problemas de disciplina. De las respuestas se concluye que:

$$\bar{X} = 9.1 \text{ horas.}$$

$$S^2 = 22.3.$$

Obtener un límite aproximado del error al 95% para estimar μ , el número medio de horas semanales que dedican a solucionar problemas disciplinarios todos los directores del distrito.

Solución.

El estimativo es $\bar{x} = 9.1$, y el factor $f = (n - 1)/(N - 1) = 11/29 = 0.38$. El factor de f es demasiado grande para ser ignorado, y el límite aproximado del error es:

$$\pm 2 \frac{S}{\sqrt{n}} \sqrt{1-f} = \pm 2 \frac{\sqrt{22.3}}{12} \sqrt{0.62} = \pm 2.15$$

Ejemplo 2.

Se manifiesta el interés en conocer la cantidad de dinero que gastan los estudiantes cada mes en alojamiento. Una muestra aleatoria de 160 estudiantes de una universidad que tiene una población de 32400 da las siguientes estadísticas, en \$:

$$\bar{X} = \$105.30$$

$$S^2 = 453.6$$

Encontrar un intervalo de confianza aproximado del 95% para la cantidad media poblacional.

Solución.

El intervalo de confianza aproximado es:

$$\bar{X} \pm 2 \frac{S}{\sqrt{n}} \sqrt{1-f} = 105.3 \pm 2 \frac{\sqrt{453.6}}{\sqrt{160}} \sqrt{1 - \frac{159}{32399}} = (101.94, 108.66)$$

El factor de corrección finita puede ser ignorado porque es extremadamente pequeño.

Ignorando el factor de corrección finita, el intervalo de confianza será (101.93, 108.67), que es casi igual al que se calculó antes. [39]

2.9.5 Pruebas de hipótesis

A menudo uno de los objetivos de la estadística es el de hacer inferencias relacionadas con parámetros de población desconocidos con base en la información que contienen los datos de la muestra. Estas inferencias se interpretan de dos maneras: como estimaciones de los parámetros respectivos o como pruebas de hipótesis relacionadas con sus valores.

El procedimiento formal para realizar pruebas de hipótesis se asemeja en muchos aspectos al método científico. El científico observa la naturaleza, formula una teoría y la confronta con el experimento. De igual manera, el científico propone una hipótesis respecto a uno o más parámetros de población, en la cual afirma que los valores específicos son iguales. Enseguida toma una muestra de la población, la analiza y compara sus observaciones con la hipótesis; si ésta no concuerda con ellas, la rechaza, de lo contrario, concluye que la hipótesis es verdadera y que la muestra no revela si hay diferencia entre los valores reales y los hipotéticos de los parámetros poblacionales.

Las pruebas de hipótesis se aplican en todos los campos en los que la teoría se puede confrontar con la observación.

Elementos de una prueba estadística

Uno de los objetivos de una prueba estadística es el de probar una hipótesis relacionada con los valores de uno o más parámetros poblacionales. Por lo general, disponemos de una teoría – una *hipótesis de investigación*– respecto a los parámetros que queremos sustentar. La verificación de la hipótesis de investigación, también llamada *hipótesis alternativa*, se consigue demostrando (con los datos de la muestra como evidencia) que la hipótesis contraria de la hipótesis alternativa, llamada *hipótesis nula*, es falsa. Por lo tanto, una teoría se comprueba demostrando que no hay evidencia que sustente la teoría opuesta: en cierto sentido, se realiza una prueba por contradicción.

Cualquier prueba de hipótesis estadística funciona exactamente de la misma manera y está formada por los siguientes elementos esenciales:

1. Hipótesis nula, H_0 .
2. Hipótesis alternativa, H_1 .
3. Prueba estadística.
4. Región de rechazo.

Las partes esenciales de una prueba estadística son el estadístico de prueba y una región de rechazo asociada. El *estadístico de prueba* (como un estimador) es una función de las mediciones de la muestra que sirve de fundamento para la toma de decisiones estadísticas. La región de rechazo, que en adelante denotaremos como RR , especifica los valores del estadístico de prueba para los que la hipótesis nula se *rechaza* a favor de la hipótesis

alternativa. Si en una muestra el valor calculado del estadístico de prueba está en la región RR , rechazaremos la hipótesis nula H_0 y aceptaremos la hipótesis alternativa H_1 . Si el valor del estadístico de prueba no cae en la región de rechazo RR , aceptaremos H_0 .

Encontrar una buena región de rechazo para una prueba estadística constituye un problema interesante a resolver.

En cualquier región de rechazo fija se pueden cometer dos tipos de error al tomar una decisión. Se puede decidir a favor de H_1 cuando H_0 es verdadera (*error tipo I*) o se puede decidir a favor de H_0 cuando H_1 es verdadera (*error tipo II*).

- Se comete un error tipo I si se rechaza H_0 cuando H_0 es verdadero. La probabilidad de cometer un error tipo I se denota mediante α , la cual tiene un valor al que se denomina nivel de la prueba.
- Se comete un error tipo II si se acepta H_0 cuando H_1 es verdadera. La probabilidad de cometer un error tipo II se denota mediante β .

Ejemplo 3.

En una encuesta política de un candidato se tomó una muestra de $n = 15$ electores. Se quiere probar $H_0: p = 0.5$ frente a la hipótesis alternativa $H_1: p < 0.5$. El estadístico de la prueba es Y , lo cual representa al número de electores de la muestra que son partidarios del candidato.

Calcule α si establecemos $RR = \{y \leq 2\}$ como la región de rechazo.

Solución.

Por definición,

$$\begin{aligned} \alpha &= P(\text{error tipo I}) = P(\text{rechazo de } H_0 \text{ cuando } H_0 \text{ es verdadera}) \\ &= P(\text{valor estadístico de la prueba localizado en } RR \text{ cuando } H_0 \text{ es verdadera}) \\ &= P(Y \leq 2 \text{ cuando } p = 0.5) \end{aligned}$$

Si tomamos en cuenta que Y es una variable aleatoria binomial con $n = 15$ y $p = 0.5$, tenemos

$$\alpha = \sum_{y=0}^2 \binom{15}{y} (0.5)^y (0.5)^{15-y} = \binom{15}{0} (0.5)^{15} + \binom{15}{1} (0.5)^{15} + \binom{15}{2} (0.5)^{15}$$

Las tablas de probabilidades binomiales (disponibles en cualquier libro de estadística) permiten evitar este cálculo y encontrar $\alpha = 0.004$. Por consiguiente, si decidimos utilizar la región de rechazo $RR = \{y \leq 2\}$, asumimos un riesgo muy pequeño ($\alpha = 0.004$) de concluir que el candidato perderá las elecciones cuando en realidad, las ganará.

Pruebas comunes con muestras grandes

Supongamos que se quiere probar un conjunto de hipótesis relacionadas con un parámetro θ basado en una muestra aleatoria Y_1, Y_2, \dots, Y_n .

Si θ_0 es un valor específico de θ , podemos probar $H_0: \theta = \theta_0$ frente a $H_1: \theta > \theta_0$. En la gráfica de la figura 34 se muestran las distribuciones muestrales de $\hat{\theta}$ para diversos valores de θ .

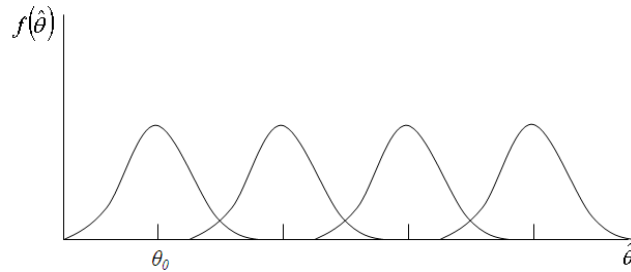


Figura 34. Distribuciones muestrales del estimador $\hat{\theta}$ para diversos valores de θ .

Si $\hat{\theta}$ está cerca de θ_0 , parece razonable aceptar H_0 . Sin embargo, si en realidad $\theta > \theta_0$, es más probable que $\hat{\theta}$ sea grande. En consecuencia, los valores grandes de $\hat{\theta}$ (valores convenientemente mayores que θ_0) favorecen el rechazo de $H_0: \theta = \theta_0$ y la aceptación de $H_1: \theta > \theta_0$. Es decir, las hipótesis nula y alternativa, el estadístico de la prueba y la región de rechazo son los siguientes:

1. $H_0: \theta = \theta_0$
2. $H_1: \theta > \theta_0$
3. Estadístico de la prueba: $\hat{\theta}$
4. Región de rechazo: $RR = \{\hat{\theta} > k\}$ para algún valor seleccionado de k .

El valor real de k en la región de rechazo RR se determina estableciendo la probabilidad α del error tipo I (nivel de la prueba) y eligiendo k de acuerdo con este valor (véase la figura 35). Si H_0 es verdadera, $\hat{\theta}$ tiene una distribución aproximadamente normal con media θ_0 y error estándar $\sigma_{\hat{\theta}}$.

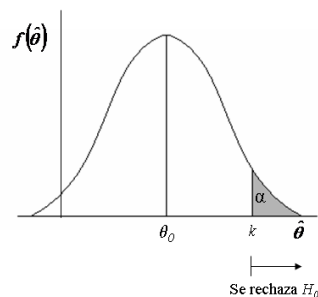


Figura 35. Región de rechazo para muestras grandes de $H_0: \theta = \theta_0$ frente a $H_1: \theta > \theta_0$

Por consiguiente, si queremos una prueba con nivel α ,

$$k = \theta_0 + z_\alpha \sigma_{\hat{\theta}}$$

es la elección adecuada del valor de k [si Z tiene una distribución normal estándar, entonces z_α es tal que $P(Z > z_\alpha) = \alpha$]. Como

$$RR = \left\{ \hat{\theta} : \hat{\theta} > \theta_0 + z_\alpha \sigma_{\hat{\theta}} \right\} \left\{ \hat{\theta} : \frac{\hat{\theta} - \theta_0}{\sigma_{\hat{\theta}}} > z_\alpha \right\}$$

si se utiliza $Z = \frac{\hat{\theta} - \theta_0}{\sigma_{\hat{\theta}}}$ como estadístico de la prueba, la región de rechazo también puede expresarse como $RR = \{z > z_\alpha\}$. Adviértase que Z mide el número de desviaciones estándar entre el estimador de θ y θ_0 , el valor de θ especificado en H_0 . Por lo tanto, una forma que equivale a la prueba de hipótesis con nivel α es la siguiente:

$$H_0: \theta = \theta_0$$

$$H_1: \theta > \theta_0$$

$$\text{Estadístico de la prueba: } Z = \frac{\hat{\theta} - \theta_0}{\sigma_{\hat{\theta}}}$$

Región de rechazo: $\{z > z_\alpha\}$

H_0 se rechaza si Z cae muy lejos de la cola superior de la distribución normal estándar. La hipótesis alternativa $H_1: \theta > \theta_0$ recibe el nombre de hipótesis alternativa de *cola superior*, y $RR = \{z > z_\alpha\}$ se denomina *región de rechazo de cola superior*. Obsérvese que la fórmula anterior para Z es sencillamente:

$$Z = \frac{\text{estimador del parámetro} - \text{valor del parámetro dado por } H_0}{\text{error estándar del estimador}}$$

Ejemplo 4.

El vicepresidente de ventas de una gran corporación afirma que los vendedores no consiguen más de 15 prospectos de clientes en promedio cada semana y le gustaría incrementar esa cifra. Para comprobar su afirmación se seleccionan $n = 36$ vendedores en forma aleatoria y se registra la cantidad de contactos que logran hacer en una semana elegida al azar. La media y la varianza de 36 mediciones fueron 17 y 9, respectivamente. ¿Contradice la evidencia lo que afirma el vicepresidente? Utilice una prueba con nivel $\alpha = 0.05$.

Solución.

La hipótesis de investigación que interesa demostrar es que las afirmaciones del vicepresidente son incorrectas. Este hecho se puede expresar formalmente de la siguiente manera $H_1: \mu > 15$, donde μ es el promedio de contactos que se hacen por semana. En consecuencia, nos interesa probar

$$H_0: \mu = 15 \text{ frente a } H_1: \mu > 15$$

Sabemos que si n es suficientemente grande, la media de la muestra \bar{Y} es un estimador puntual de μ que tiene una distribución que se aproxima a la normal con $\mu_{\bar{Y}} = \mu$ y $\sigma_{\bar{Y}} = \sigma/\sqrt{n}$. Por consiguiente, nuestro estadístico de la prueba es

$$Z = \frac{\bar{Y} - \mu_0}{\sigma_{\bar{Y}}} = \frac{\bar{Y} - \mu_0}{\sigma/\sqrt{n}}$$

La región de rechazo, con $\alpha = 0.05$, está representada por $\{z > z_{0.05} = 1.645\}$ (Este valor se puede obtener en una tabla de distribución normal). Se desconoce la varianza poblacional σ^2 , pero se puede estimar con mucha exactitud (ya que $n = 36$ es tan grande como se necesita) por medio de la varianza muestral $s^2 = 9$.

Por consiguiente, el valor observado del estadístico de la prueba es aproximadamente

$$Z = \frac{\bar{y} - \mu}{s/\sqrt{n}} = \frac{17 - 15}{3/\sqrt{36}} = 4$$

Como el valor observado de Z está en la región de rechazo (puesto que $z = 4$ es mayor que $z_{0.05} = 1.645$), rechazamos $H_0: \mu = 15$. Por lo tanto, en el nivel de significancia $\alpha = 0.05$, la evidencia es suficiente para concluir que la afirmación del vicepresidente es incorrecta y que el promedio de contactos de ventas por semana es mayor que 15.

Cálculo de las probabilidades del error tipo II

En algunas pruebas estadísticas puede ser difícil calcular β , pero se puede aplicar la prueba Z para ilustrar el cálculo de β . En la prueba de $H_0: \theta = \theta_0$ frente a $H_1: \theta > \theta_0$, podemos calcular las probabilidades de un error tipo II exclusivamente para valores específicos de θ en H_1 .

Supongamos que el experimentador tiene en mente una alternativa, por ejemplo, $\theta = \theta_1$ (donde $\theta_1 > \theta_0$). Como la región de rechazo es de la forma

$$RR = \{\hat{\theta} : \hat{\theta} > k\}$$

la probabilidad β de un error tipo II es

$$\beta = P(\hat{\theta} \text{ no está en } RR \text{ cuando } H_1 \text{ es verdadera})$$

$$\beta = P(\hat{\theta} \leq k \text{ cuando } \theta = \theta_1) = P\left[\frac{\hat{\theta} - \theta_1}{\sigma_{\hat{\theta}}} \leq \frac{k - \theta_1}{\sigma_{\hat{\theta}}}\right] \text{ cuando } \theta = \theta_1$$

Si θ_1 es el valor verdadero de θ , entonces $(\hat{\theta} - \theta_1)/\sigma_{\hat{\theta}}$ posee una distribución normal estándar aproximadamente. Por lo tanto, la probabilidad β se puede determinar (de manera aproximada) calculando el área correspondiente bajo la curva normal estándar.

En una muestra fija de tamaño n el valor de β depende de la distancia entre θ_1 y θ_0 . Si θ_1 está cerca de θ_0 , el verdadero valor de θ (θ_1 o θ_0) es difícil de localizar, y la probabilidad de aceptar H_0 cuando H_1 es verdadera tiende a ser alta. Si está θ_1 lejos de θ_0 , es hasta cierto punto fácil de detectar el verdadero valor, y β es considerablemente menor.

Ejemplo 5.

Supóngase que el vicepresidente del ejemplo 4 desea detectar una diferencia igual a uno en el número promedio de prospectos de ventas por semana. Es decir, probar $H_0: \mu = 15$ frente a $H_1: \mu = 16$. De acuerdo con los datos proporcionados por el ejemplo 4, calcule β para esta prueba.

Solución.

En el ejemplo 4 se tenían $n = 36$, $\bar{y} = 17$ y $s^2 = 9$. La región de rechazo para una prueba con nivel 0.05 estaba dada por

$$z = \frac{\bar{y} - \mu_0}{\sigma / \sqrt{n}} > 1.645$$

que equivale a

$$\bar{y} - \mu_0 > 1.645 \left(\frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right) \text{ o bien } \bar{y} > \mu_0 + 1.645 \left(\frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right)$$

Si se sustituye en $\mu_0 = 15$ y $n = 36$ y utilizamos s para aproximar σ , la región de rechazo es

$$\bar{y} > 15 + 1.645 \left(\frac{3}{\sqrt{36}} \right) \text{ o, de la misma manera, } \bar{y} > 15.8225$$

La figura 36 muestra esta región de rechazo. Así, por definición, $\beta = P(\bar{Y} \leq 15.8225 \text{ cuando } \mu = 16)$ es el área sombreada bajo la curva discontinua a la izquierda de $k = 15.8225$. Por consiguiente, si $\mu_1 = 16$,

$$\beta = P \left(\frac{\bar{Y} - \mu_1}{\sigma / \sqrt{n}} \leq \frac{15.8225 - 16}{3 / \sqrt{36}} \right) = P(Z \leq -0.36) = 0.3594$$

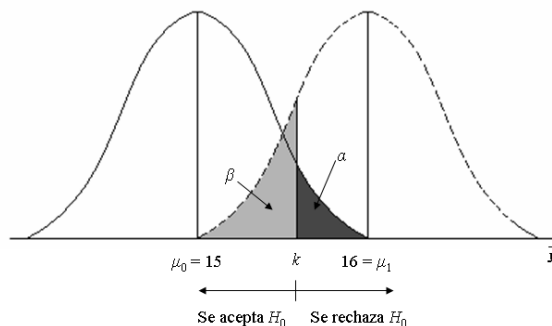


Figura 36. Región de rechazo para el ejemplo 5.

El valor más grande de β indica que las muestras de tamaño $n = 36$ no detectarían una diferencia de una unidad de la media hipotética. Se puede reducir el valor de β incrementando el tamaño de la muestra n .

Relaciones entre las pruebas de hipótesis e intervalos de confianza

Un intervalo de confianza bilateral de θ con coeficiente de confianza $1 - \alpha$ está representado por:

$$\hat{\theta} \pm z_{\alpha/2} \sigma_{\hat{\theta}}$$

En esta expresión, $\sigma_{\hat{\theta}}$ es la desviación estándar del estimador $\hat{\theta}$ y $z_{\alpha/2}$ es un número tomado de la tabla normal estándar tal que $P(Z > z_{\alpha/2}) = \alpha/2$. Si estuviéramos interesados en una prueba de nivel α de $H_0: \theta = \theta_0$ para muestras grandes frente a la hipótesis alternativa de dos colas $H_1: \theta \neq \theta_0$, los resultados de la sección anterior indican que utilizaríamos una prueba Z basada en el estadístico de la prueba

$$Z = \frac{\hat{\theta} - \theta_0}{\sigma_{\hat{\theta}}}$$

y rechazaríamos H_0 si el valor de Z cayera dentro de la región de rechazo $\{|z| > z_{\alpha/2}\}$. Ambos procedimientos utilizan el estimador $\hat{\theta}$, su error estándar $\sigma_{\hat{\theta}}$ y el valor tabular $z_{\alpha/2}$.

Analícemos con más detalle estos dos procedimientos.

El complemento de la región de rechazo asociada con cualquier prueba a veces recibe el nombre de *región de aceptación* de la prueba. En cualquiera de nuestras pruebas con nivel α de dos colas para muestras grandes, la región de aceptación es $\overline{RR} = \{-z_{\alpha/2} \leq z \leq z_{\alpha/2}\}$. Es decir, no rechazaremos $H_0: \theta = \theta_0$ a favor de la hipótesis alternativa de dos colas si

$$-z_{\alpha/2} \leq \frac{\hat{\theta} - \theta_0}{\sigma_{\hat{\theta}}} \leq z_{\alpha/2}$$

De nuevo, no rechazamos la hipótesis nula (se “acepta”) en el nivel α si

$$\hat{\theta} - z_{\alpha/2} \sigma_{\hat{\theta}} \leq \theta_0 \leq \hat{\theta} + z_{\alpha/2} \sigma_{\hat{\theta}}$$

Nótese que las cantidades en el extremo izquierdo y el extremo derecho de la serie de desigualdades anterior son los puntos extremos inferior y superior, respectivamente, de un intervalo de confianza bilateral de $100(1 - \alpha)\%$ para θ . Por consiguiente, existe una dualidad entre nuestros procedimientos en el caso de muestras grandes para construir un intervalo de

confianza bilateral de $100(1 - \alpha)\%$ y para formular una prueba de hipótesis de dos colas con nivel α . No rechazaremos $H_0: \theta = \theta_0$ a favor de $H_1: \theta \neq \theta_0$ si el valor θ_0 está en el intervalo de confianza de $100(1 - \alpha)\%$ para θ . Rechazaremos H_0 si θ_0 está fuera del intervalo. Asimismo, un intervalo de confianza bilateral de $100(1 - \alpha)\%$ se puede interpretar como el conjunto de valores de θ_0 para los cuales $H_0: \theta = \theta_0$ es “aceptable” en el nivel α . Nótese que *cualquier* valor en el intervalo de confianza constituye un valor aceptable del parámetro. No hay *un valor aceptable* para el parámetro, sino varios. Es por esto que, por lo general, no aceptamos la hipótesis nula de que θ tome un valor particular θ_0 , aún si el valor θ_0 está dentro del intervalo de confianza.

Niveles de significación alcanzados o valores p

Como ya se ha señalado, la probabilidad de un error tipo I, α , suele denominarse *nivel de significancia*, o nivel de la prueba. Estos términos se originaron de la siguiente manera: la probabilidad del valor observado del estadístico de la prueba, o algún valor que incluso contradiga más a la hipótesis nula, mide, de alguna forma, el peso de la evidencia a favor del rechazo de la hipótesis nula. Aunque se recomiendan valores pequeños para α , en el caso del análisis, el valor real de α se elige de forma arbitraria.

Un experimentador podría decidir realizar una prueba con $\alpha = 0.05$, mientras que otro podría preferir $\alpha = 0.01$. Así, es posible que dos personas analicen los mismos datos y lleguen a conclusiones opuestas: una podría concluir que la hipótesis nula debe rechazarse en el nivel de significancia $\alpha = 0.05$ y la otra que la hipótesis nula debe rechazarse con $\alpha = 0.01$.

Una vez elegido el estadístico de la prueba, muchas veces es posible determinar el valor de p , el nivel de significancia alcanzado en relación con una prueba. Esta cantidad constituye un estadístico que representa el valor mínimo de α para el que puede rechazarse la hipótesis nula.

Definición

Si W es el estadístico de una prueba, el valor p o nivel de significancia alcanzado, es el nivel mínimo de significancia α según el cual los datos observados indican que se debe rechazar la hipótesis nula.

Cuanto menor sea el valor de p , más convincente será la evidencia que favorece el rechazo de la hipótesis nula. El valor p es el valor mínimo de α para el cual se puede rechazar la hipótesis nula. Por consiguiente, si el valor que se busca de α es mayor que o igual al valor p , la hipótesis nula se rechaza para ese valor de α .

Ejemplo 6.

Recordando que en el ejemplo 3 se tomó una muestra de $n = 15$ electores. Si se quiere probar $H_0: p = 0.5$ frente a $H_1: p < 0.5$, utilizando $Y =$ número de electores que apoyan al candidato X , como estadístico para la prueba, ¿cuál es el valor de p si $Y = 3$? Interpretar el resultado.

Solución.

Anteriormente se destacaba que H_0 debe rechazarse para valores de Y . Por consiguiente, el valor p para esta prueba está representado por el valor $p = P\{Y \leq 3\}$, donde Y posee una distribución binomial con $n = 15$ y $p = 0.5$ (el área sombreada de la figura 37). El valor en tablas de p es igual a 0.018.

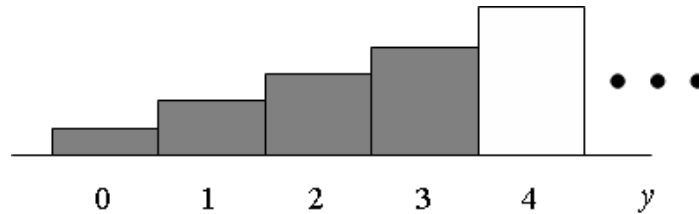


Figura 37. Valor p para el ejemplo 6.

Como el valor $p = 0.018$ representa el valor mínimo de α de acuerdo con el cual se rechaza la hipótesis nula, un experimentador que especifique cualquier valor de $\alpha \geq 0.018$ debe rechazar H_0 y concluir que el candidato X no cuenta con la mayoría de los votos. Sin embargo, si el experimentador elige un valor de α menor que 0.018, la hipótesis nula no podría rechazarse.

Este ejemplo muestra que la indicación de los valores de p es útil cuando el estadístico de la prueba adecuado posee una distribución *discreta*. En estos casos no siempre es posible determinar una región de rechazo con un valor α de cierta magnitud. Por ejemplo, en este caso no es posible determinar alguna región de rechazo de la forma $\{y \leq a\}$ en la que α sea igual a 0.05. De esta manera, es preferible indicar el valor p en lugar de limitarse a los valores de α que se puedan obtener con base en la distribución discreta del estadístico de la prueba.

Pruebas de hipótesis con muestras pequeñas para μ y $\mu_1 - \mu_2$

Para poder aplicar estos procedimientos, el tamaño de la muestra debe ser tan grande como para que $Z = \frac{\bar{Y} - \theta_0}{S/\sqrt{n}}$ adopte aproximadamente una distribución normal estándar.

Supongamos que Y_1, Y_2, \dots, Y_n denota una muestra aleatoria de tamaño n de una distribución normal con media desconocida μ y varianza desconocida σ^2 . Si \bar{Y} y S representan la media y la desviación estándar muestrales, respectivamente, y si $H_0: \mu = \mu_0$ es verdadera, entonces

$$T = \frac{\bar{Y} - \mu_0}{S/\sqrt{n}}$$

posee una distribución t con $n - 1$ grados de libertad.

La distribución t es simétrica y acampanada; la región de rechazo para una prueba de hipótesis con muestras pequeñas $H_0: \mu = \mu_0$ debe localizarse en las colas de la distribución t y deben determinarse exactamente de la misma forma que el estadístico Z para muestras grandes.

Por analogía con la prueba Z , la región de rechazo adecuada para la hipótesis alternativa de cola superior $H_1: \mu > \mu_0$ está representada por

$$RR = \{t > t_\alpha\}$$

donde t_α es tal que $P\{T > t_\alpha\} = \alpha$ para una distribución t con $n - 1$ grados de libertad.

A continuación se explica una de las pruebas para μ basadas en la distribución t , conocidas como pruebas t .

Prueba con muestras pequeñas para μ

Supuestos: Y_1, Y_2, \dots, Y_n constituye una muestra aleatoria de una distribución con $E(Y_i) = \mu$.

$$H_0: \mu = \mu_0$$

$$H_1: \begin{cases} \mu > \mu_0 & (\text{hipótesis alternativa de cola superior}) \\ \mu < \mu_0 & (\text{hipótesis alternativa de cola inferior}) \\ \mu \neq \mu_0 & (\text{hipótesis alternativa de dos colas}) \end{cases}$$

$$\text{Estadístico de la prueba: } T = \frac{\bar{Y} - \mu_0}{S / \sqrt{n}}$$

$$\text{Región de rechazo: } \begin{cases} t > t_\alpha & (RR \text{ de cola superior}) \\ t < -t_\alpha & (RR \text{ de cola inferior}) \\ |t| > t_{\alpha/2} & (RR \text{ de dos colas}) \end{cases}$$

(Consultar tabla de la distribución t para obtener los valores de t_α , con $v = n - 1$ g. l.).

Una segunda aplicación de la distribución t se relaciona con la construcción de una prueba para muestras pequeñas que compara las medias de dos poblaciones normales con las mismas varianzas. Suponga que se eligen muestras aleatorias independientes de dos poblaciones normales $Y_{11}, Y_{12}, \dots, Y_{1n_1}$ de la primera, y $Y_{21}, Y_{22}, \dots, Y_{2n_2}$, donde la media y la varianza de la i -ésima población son μ_i y σ^2 , para $i = 1, 2$. Además, suponga que \bar{Y}_i y S_i^2 , para $i = 1, 2$ son las medias y las varianzas muestrales correspondientes.

Cuando se satisfacen estas condiciones, si

$$S_p^2 = \frac{(n_1 - 1)\bar{S}_1^2 + (n_2 - 1)\bar{S}_2^2}{n_1 + n_2 - 2}$$

es un estimador ponderado para σ^2 , entonces

$$T = \frac{(\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}$$

tiene una distribución t de Student con $n_1 + n_2 - 2$ grados de libertad. Si queremos probar la hipótesis nula $H_0: \mu_1 - \mu_2 = D_0$ para cierto valor fijo D_0 , se deduce que, si H_0 es verdadera, entonces

$$T = \frac{\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2 - D_0}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}$$

tiene una distribución t de Student con $n_1 + n_2 - 2$ grados de libertad. Las pruebas de hipótesis $H_0: \mu_1 - \mu_2 = D_0$ frente a las hipótesis alternativas de cola superior, cola inferior y de dos colas se abordan de la misma manera que la prueba para muestras grandes, salvo que se aplica el estadístico t y las tablas de la distribución t para llegar a nuestras conclusiones. A continuación se resumen los procedimientos de prueba para muestras grandes en el caso de $\mu_1 - \mu_2$.

Pruebas con muestras pequeñas para comparar dos medias poblacionales

Supuestos: muestras independientes de distribuciones normales con $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$.

$H_0: \mu_1 - \mu_2 = D_0$.

$$H_1: \begin{cases} \mu_1 - \mu_2 > D_0 & (\text{hipótesis alternativa de cola superior}) \\ \mu_1 - \mu_2 < D_0 & (\text{hipótesis alternativa de cola inferior}) \\ \mu_1 - \mu_2 \neq D_0 & (\text{hipótesis alternativa de dos colas}) \end{cases}$$

$$\text{Estadístico de la prueba: } T = \frac{\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2 - D_0}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}, \text{ donde } S_p = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)\bar{S}_1^2 + (n_2 - 1)\bar{S}_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}$$

$$\text{Región de rechazo: } \begin{cases} t > t_\alpha & (RR \text{ de cola superior}). \\ t < -t_\alpha & (RR \text{ de cola inferior}). \\ |t| > t_{\alpha/2} & (RR \text{ de dos colas}). \end{cases}$$

Aquí, $P(T > t_\alpha) = \alpha$; y $v = n_1 + n_2 - 2$ grados de libertad.

Pruebas de hipótesis referentes a varianzas

Supongamos que se tiene una muestra aleatoria Y_1, Y_2, \dots, Y_n de una distribución normal con media μ y varianza σ^2 de valores desconocidos. En esta sección se analizará el problema de probar $H_0: \sigma^2 = \sigma_0^2$ para algún valor fijo σ_0^2 frente a diversas hipótesis alternativas. Si H_0 es verdadera y $\sigma^2 = \sigma_0^2$, entonces

$$X^2 = \frac{(n-1)\bar{S}^2}{\sigma_0^2}$$

tiene una distribución X^2 con $n - 1$ grados de libertad.

Si queremos probar $H_0: \sigma^2 = \sigma_0^2$ frente a $H_1: \sigma^2 > \sigma_0^2$, podemos utilizar $X^2 = (n - 1) S^2 / \sigma_0^2$ como estadístico de prueba, pero ¿Cómo se puede elegir la región de rechazo RR ?

Si H_1 es verdadera y el valor real de σ^2 es mayor que σ_0^2 , esperaríamos que S^2 (que constituye una estimación del valor verdadero de σ^2) sea mayor que σ_0^2 . Cuanto mayor sea S^2 respecto a σ_0^2 , más fuerte será la evidencia que apoye $H_1: \sigma^2 > \sigma_0^2$. Nótese que S^2 es grande respecto a σ_0^2 si y sólo si $X^2 = (n - 1) S^2 / \sigma_0^2$ es grande. Por consiguiente, vemos que una región de rechazo de la forma $RR = \{X^2 > k\}$ para alguna constante k es adecuada para probar $H_0: \sigma^2 = \sigma_0^2$ frente a $H_1: \sigma^2 > \sigma_0^2$. Si buscamos una prueba para la cual la probabilidad de cometer un error tipo I sea α , utilizamos la región de rechazo

$$RR = \{X^2 > X^2_\alpha\}$$

donde $P(X^2 > X^2_\alpha) = \alpha$. (Los valores de X^2_α se pueden encontrar en cualquier tabla de distribuciones X^2). En la figura 38 a) se muestra una ilustración de esta región de rechazo.

Si queremos probar $H_0: \sigma^2 = \sigma_0^2$ frente a $H_1: \sigma^2 < \sigma_0^2$ (hipótesis alternativa de cola inferior), un razonamiento análogo nos lleva a la región de rechazo localizada en la cola inferior de la distribución X^2 . Por otra parte, podemos probar $H_0: \sigma^2 = \sigma_0^2$ frente a $H_1: \sigma^2 \neq \sigma_0^2$ utilizando una región de rechazo de dos colas. En la figura 38 se muestran las gráficas de estas regiones de rechazo.

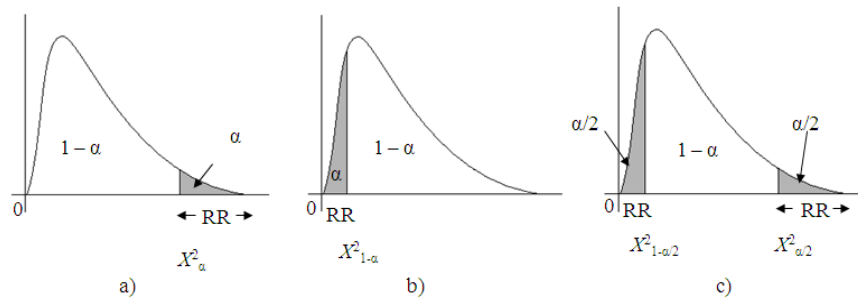


Figura 38. Regiones de rechazo RR .

Pruebas de hipótesis referentes a una varianza poblacional

Supuestos: Y_1, Y_2, \dots, Y_n constituye una muestra aleatoria de una distribución normal con

$$E(Y_i) = \mu \text{ y } V(Y_i) = \sigma^2$$

$$H_0: \sigma^2 = \sigma_0^2$$

$$H_1: \begin{cases} \sigma^2 > \sigma_0^2 & \text{(hipótesis alternativa de cola superior)} \\ \sigma^2 < \sigma_0^2 & \text{(hipótesis alternativa de cola inferior)} \\ \sigma^2 \neq \sigma_0^2 & \text{(hipótesis alternativa de dos colas)} \end{cases}$$

Estadístico de la prueba: $X^2 = \frac{(n-1)\tilde{S}^2}{\sigma_0^2}$

$$\text{Región de rechazo} \begin{cases} X^2 > X_\alpha^2 & (RR \text{ de cola superior}) \\ X^2 < X_{1-\alpha}^2 & (RR \text{ de cola inferior}) \\ X^2 > X_{\alpha/2}^2 \text{ o } X^2 < X_{1-\alpha/2}^2 & (RR \text{ de dos colas}) \end{cases}$$

Obsérvese que X_α^2 se elige de tal manera que, para $\nu = n - 1$ grados de libertad, $P(X^2 > X_\alpha^2) = \alpha$.

A veces queremos comparar las varianzas de dos distribuciones normales, particularmente mediante pruebas para determinar si son iguales.

Muchos problemas se presentan al comparar la precisión de dos instrumentos de medición, la variación de las características de calidad de un producto fabricado o la variación de los resultados de dos procedimientos de prueba. Por ejemplo, supongamos que $Y_{11}, Y_{12}, \dots, Y_{1n_1}$ y $Y_{21}, Y_{22}, \dots, Y_{2n_2}$ son muestras aleatorias independientes de distribuciones normales con medias desconocidas y en las que $V(Y_{1i}) = \sigma_1^2$ y $V(Y_{2i}) = \sigma_2^2$, donde se desconocen los valores de σ_1^2 y σ_2^2 . Supóngase que se quiere probar la hipótesis nula $H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ frente a la hipótesis alternativa $H_1: \sigma_1^2 > \sigma_2^2$.

Como las varianzas muestrales S_1^2 y S_2^2 estiman las varianzas poblacionales respectivas σ_1^2 y σ_2^2 , rechazaremos H_0 a favor de H_1 si S_1^2 es mayor que S_2^2 . Es decir, se utilizará una región de rechazo de la forma

$$RR = \left\{ \frac{S_1^2}{S_2^2} > k \right\}$$

donde k se elige de tal manera que la probabilidad de cometer un error tipo I sea α . El valor adecuado de k depende de la distribución de probabilidad del estadístico S_1^2/S_2^2 .

Nótese que $(n_1 - 1) S_1^2/\sigma_1^2$ y $(n_2 - 1) S_2^2/\sigma_2^2$ son variables aleatorias independientes ji-cuadrada. Entonces se infiere que

$$F = \frac{\frac{(n_1 - 1)\tilde{S}_1^2}{\sigma_1^2 (n_1 - 1)}}{\frac{(n_2 - 1)\tilde{S}_2^2}{\sigma_2^2 (n_2 - 1)}} = \frac{S_1^2 \sigma_2^2}{S_2^2 \sigma_1^2}$$

tiene una distribución F con $(n_1 - 1)$ grados de libertad en el numerador y $(n_2 - 1)$ grados de libertad en el denominador. Con base en la hipótesis nula en la que $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$, se infiere que $F = S_1^2/S_2^2$ y la región de rechazo RR dada antes es equivalente a $RR = \{F > k\} = \{F > F_\alpha\}$,

donde $k = F_\alpha$ es el valor de la distribución F con $v_1 = (n_1 - 1)$ y $v_2 = (n_2 - 1)$ tal que $P(F > F_\alpha) = \alpha$. Los valores de F_α se pueden conseguir en cualquier libro de estadística.

En la figura 39 se muestra esta región de rechazo.

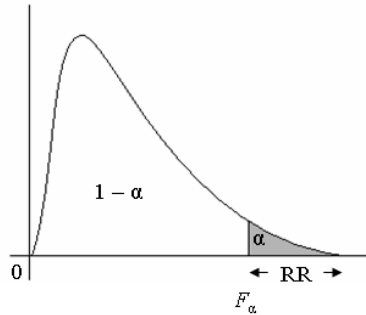


Figura 39. Región de rechazo RR para probar $H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ frente a $H_1: \sigma_1^2 > \sigma_2^2$.

Prueba de hipótesis $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$

Supuestos: muestras independientes de poblaciones normales.

$$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2.$$

$$H_1: \sigma_1^2 > \sigma_2^2.$$

Estadístico de la prueba:
$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2}$$

Región de rechazo: $F > F_\alpha$, donde F_α se elige de tal manera que $P(F > F_\alpha) = \alpha$ cuando F tiene $v_1 = n_1 - 1$ grados de libertad en el numerador y $v_2 = n_2 - 1$ grados de libertad en el denominador.

Si queremos probar $H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ frente a $H_1: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$ con la probabilidad α de cometer un error tipo I, podemos emplear $F = S_1^2 / S_2^2$ como estadístico de prueba y rechazar H_0 a favor de H_1 si el valor calculado de F se localiza en la cola superior o en la cola inferior de $\alpha/2$ de la distribución F . Los valores críticos de la cola superior se pueden determinar directamente a partir de la tabla de las distribuciones F ; ahora bien, ¿cómo determinamos los valores críticos de la cola inferior?

Nótese que $F = S_1^2 / S_2^2$ y $F^{-1} = S_2^2 / S_1^2$ tienen distribuciones F , pero los grados de libertad en el numerador y en el denominador están intercambiados. Sea F_b^a la representación de una variable aleatoria con una distribución F que tiene a y b grados de libertad en el numerador y en el denominador, respectivamente, y sea $F_{b,\alpha/2}^a$ tal que

$$P(F_b^a > F_{b,\alpha/2}^a) = \alpha/2$$

así,

$$P[(F_b^a)^{-1} < (F_{b,\alpha/2}^a)^{-1}] = \alpha/2$$

y, por consiguiente,

$$P[F_a^b < (F_{b,\alpha/2}^a)^{-1}] = \alpha/2$$

Es decir, el valor que limita un área de la cola inferior de $\alpha/2$ para una distribución F_a^b se puede determinar invirtiendo $F_{b,\alpha/2}^a$. Por lo tanto, si utilizamos $F = S_1^2 / S_2^2$ como estadístico de la prueba para probar $H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ frente a $H_1: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$, la región de rechazo adecuada es

$$RR: \{F > F_{n_2-1, \alpha/2}^{n_1-1} \text{ o bien, } F < \left(F_{n_1-1, \alpha/2}^{n_2-1} \right)^{-1}\}$$

Una prueba equivalente se obtiene de la siguiente manera:

Sean n_L y n_S los tamaños muestrales asociados con la varianza muestral más grande y más pequeña, respectivamente. Localice la varianza muestral más grande en el numerador y la varianza muestral más pequeña en el denominador del estadístico F y rechace $H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ a favor de $H_1: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$, si $F > F_{\alpha/2}$, donde $F_{\alpha/2}$ se determina para $v_1 = n_L - 1$ y $v_2 = n_S - 1$ grados de libertad en el numerador y el denominador, respectivamente.

2.9.6 Pruebas de bondad de ajuste

Las pruebas de bondad de ajuste son pruebas de hipótesis para verificar si los datos observados en una muestra aleatoria se ajustan con algún nivel de significancia a determinada distribución de probabilidad (uniforme, exponencial, normal, poisson u otra).

La hipótesis nula H_0 indica la distribución propuesta, mientras que la hipótesis alternativa H_1 , nos indica que la variable en estudio tiene una distribución que no se ajusta a la distribución propuesta.

$$H_0 : f(x) = f_0(x)$$

$$H_1 : f(x) \neq f_0(x)$$

Para realizar la prueba, primero se clasifican los datos observados en k clases o categorías.

Después de clasificar los datos, se contabiliza el número de observaciones en cada clase, para posteriormente comparar la frecuencia observada en cada clase con la frecuencia que se esperaría obtener en esa clase si la hipótesis nula fuera correcta.

k = número de clases, $k > 2$

O_i = frecuencia observada en la clase i

e_i = frecuencia esperada en la clase i , si H_0 es correcta

Las pruebas de bondad de ajuste comparan la frecuencia observada con la frecuencia esperada en cada clase.

$$e_i = np_i$$

donde

n = tamaño de la muestra

p_i = área bajo la curva $f_0(x)$ en el intervalo comprendido entre el límite inferior y el límite superior de la clase i .

En la figura 40 se muestra una representación gráfica del área bajo la curva mencionada.

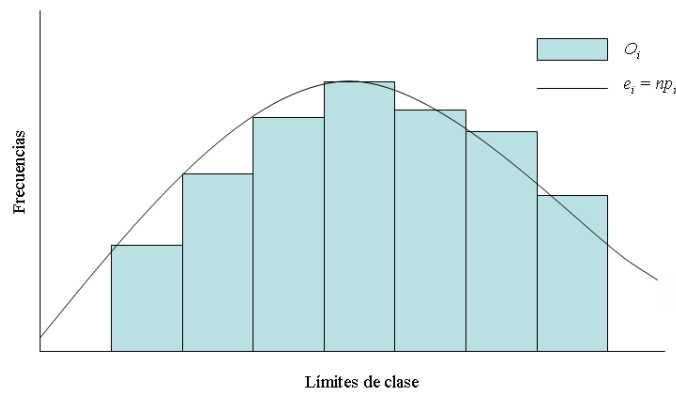


Figura 40. Representación gráfica de e_i y O_i .

Si $f_0(x)$ es continua, entonces:

$$p_i = \int_{\text{liminf } i}^{\text{limsup } i} f_0(x) dx$$

Prueba Ji-Cuadrada

La prueba Ji-Cuadrada, se basa en el estadístico de prueba

$$Y = \sum_{i=1}^k \frac{O_i - e_i}{e_i}$$

el cual tiene una distribución Ji-Cuadrada con $k - r - 1$ grados de libertad. Si las diferencias $O_i - e_i$ son pequeñas, el valor del estadístico es pequeño; por el contrario, si esas diferencias son grandes, el valor del estadístico es grande.

Por lo tanto, la región de rechazo de la hipótesis nula se ubica en la cola superior de la distribución Ji-Cuadrada al nivel de significancia α .

$$RR = \mathcal{X} > X_{\alpha, k-r-1}^2$$

donde

RR = región de rechazo

k = número de clases

r = número de parámetros estimados en $f_0(x)$ para encontrar e_i .

Recomendaciones para hacer la prueba Ji-Cuadrada

- La muestra deberá ser moderadamente grande, pues si la muestra es muy pequeña, no se podrá formar un número suficiente de clases y si la muestra es muy grande, la prueba conducirá al rechazo casi con seguridad. Se sugiere que n sea aproximadamente igual a cinco veces el número de clases (mínimo cinco y máximo diez clases).
- Hacer que toda frecuencia observada o esperada no sea menor que cinco, esto puede lograrse combinando clases vecinas, pero para cada par de clases que se combinan, el número de grados de libertad debe reducirse en uno.
- Si $f_0(x)$ es continua:
 - Para la primera clase, calcular p_1 considerando el intervalo desde $-\infty$ hasta el límite superior de la clase.
 - Para la última clase, calcular p_k considerando el intervalo desde el límite inferior de la clase hasta $+\infty$. [40]

Ejemplo 7.

Un científico de la computación ha desarrollado un algoritmo para generar números enteros pseudo aleatorios sobre el intervalo 0 a 9. El científico codifica el algoritmo y genera 1000 dígitos pseudo aleatorios. La tabla 5 contiene los datos como frecuencias observadas.

Tabla 5. Números generados por un algoritmo.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Total
Frecuencia observada, O_i	94	93	112	101	104	95	100	99	108	94	1000
Frecuencia esperada, e_i	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	1000

¿Existe evidencia de que el generador de números aleatorios funciona de manera correcta? Utilice $\alpha = 0.05$.

Solución.

Si el generador está trabajando correctamente, entonces los valores 0 - 9 deben tener una distribución discreta uniforme, esto es, los enteros deben presentarse exactamente 100 veces.

Por lo tanto, las frecuencias esperadas son $e_i = 100$, para $i = 0, 1, \dots, 9$. Puesto que estas frecuencias esperadas pueden obtenerse sin estimar ningún parámetro a partir de los datos muestrales, el estadístico Ji-Cuadrada de bondad de ajuste tendrá $k - r - 1 = 10 - 1 = 9$ g. l.

Ahora se aplica un procedimiento de ocho pasos de la prueba de hipótesis para resolver este problema.

1. La variable de interés es la forma de la distribución de los enteros pseudo aleatorios sobre el intervalo 0 a 9.
2. H_0 : La forma de la distribución es la distribución uniforme discreta.
3. H_1 : La forma de la distribución no es la distribución uniforme discreta.
4. $\alpha = 0.05$.

5. El estadístico de prueba es
$$X_0^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - e_i)^2}{e_i}$$

6. Rechazar H_0 si $X_0^2 > X_{0.05,9}^2 = 16.92$

7. Cálculos:

$$\begin{aligned} X_0^2 &= \sum_{i=1}^{10} \frac{(O_i - e_i)^2}{e_i} \\ &= \frac{(4-100)^2}{100} + \frac{(3-100)^2}{100} + \dots + \frac{(4-100)^2}{100} \\ &= 3.72 \end{aligned}$$

8. Conclusiones: Puesto que $X_0^2 = 3.72 < X_{0.05,9}^2 = 16.92$, no es posible rechazar la hipótesis de que los datos provienen de una distribución uniforme discreta. Por consiguiente, parece ser que el generador de números aleatorios trabaja de manera satisfactoria.

Prueba de Smirnov – Kolmogorov (S – K)

En esta prueba también se está interesado en el grado de concordancia entre la distribución de frecuencia muestral y la distribución de frecuencia teórica, bajo la hipótesis nula de que la distribución de la muestra es $f_0(x, \theta)$ e interesa probar que no existe diferencia significativa. La prueba trabaja con la función de distribución (frecuencia acumulativa).

Sea $F_0(x)$ la función de distribución teórica para la variable aleatoria X , y representa la probabilidad de que la variable aleatoria X tome un valor menor o igual a x . Es decir:

$$F_0(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f_0(x, \theta) dx$$

Sea $S_n(x)$ la función de distribución empírica, calculada con base en los valores observados de la muestra. $S_n(x)$ representa la proporción de valores observados que son menores o iguales a x , y está definida como:

$$S_n(x) = P(X \leq x / \text{dados los resultados muestrales}) = m/n.$$

donde m es el número de valores observados que son menores o iguales a x .

En la prueba S – K se está interesado en la mayor desviación entre la función de distribución teórica y la empírica, es decir, entre $F_0(x)$ y $S_n(x)$, para todo el rango de valores de x . Bajo la hipótesis nula se espera que estas desviaciones sean pequeñas y estén dentro de los límites de errores aleatorios. Por lo tanto, en la prueba S – K se calcula la mayor desviación existente entre $F_0(x)$ y $S_n(x)$, denotada por $D_{\max}(x)$ y está dada por:

$$D_{\max}(x) = \text{Max} |F_x \text{ } \ominus \text{ } S_n \text{ } \ominus \text{ } |$$

La distribución de $D_{\max}(x)$ es conocida y depende del número de observaciones n . Se acepta la hipótesis nula de que no existe diferencia significativa entre las distribuciones teóricas y empíricas si el valor de $D_{\max}(x)$ es menor o igual que el valor crítico $D_{\max p}(\alpha, n)$ (La tabla 6 muestra los valores críticos).

Tabla 6. Valores críticos para la prueba de Smirnov – Kolmogorov.

Prueba de Smirnov-Kolmogorov. Valores críticos $D_{\max p}(\alpha, n)$					
Tamaño de la muestra	Nivel de significancia α				
	.20	.15	0.10	0.05	0.01
1	.900	.925	.950	.875	.995
2	.684	.726	.776	.842	.929
3	.565	.597	.642	.708	.828
4	.494	.525	.564	.624	.733
5	.446	.474	.510	.565	.669
6	.410	.436	.470	.521	.618
7	.381	.405	.438	.486	.577
8	.358	.381	.411	.457	.543
9	.339	.360	.388	.432	.514
10	.322	.342	.368	.410	.490
11	.307	.326	.352	.391	.468
12	.295	.313	.338	.375	.450
13	.284	.302	.325	.361	.433
14	.274	.292	.314	.349	.418
15	.266	.283	.304	.338	.404
16	.258	.274	.295	.328	.392
17	.250	.266	.286	.318	.381
18	.244	.259	.278	.309	.371
19	.237	.252	.272	.301	.363
20	.231	.246	.264	.294	.356
25	.210	.220	.240	.270	.320
30	.190	.200	.220	.240	.290
35	.18	.190	.201	.230	.270
≥ 35	$1.07/\sqrt{N}$	$1.14/\sqrt{N}$	$1.22/\sqrt{N}$	$1.36/\sqrt{N}$	$1.63/\sqrt{N}$

El procedimiento general para valores agrupados en intervalos de clase es el siguiente:

1. Especificar la distribución nula de $f_0(x)$, y estimar sus parámetros si es necesario.
2. Organizar la muestra en una distribución de frecuencia, en intervalos de clase.
3. Con base en la distribución observada de frecuencia, se calcula la distribución acumulativa de $S_n(X_i) = m_i/n$, siendo X_i el límite superior del intervalo de clase, y m_i el número de valores de la muestra menores o iguales que X_i . $S_n(X_i)$ corresponde simplemente a la frecuencia relativa acumulada hasta el intervalo i .
4. Se calcula la función de distribución teórica $F_0(X_i)$.
5. Para cada intervalo de clase se calcula la diferencia entre $F_0(X_i)$ y $S_n(X_i)$, y se busca la máxima $D_{\max} = \text{Max} |F_x(X_i) - S_n(X_i)| = 1, 2, \dots, k$.
6. Se busca en la tabla de la prueba S – K el valor crítico $D_{\max}(\alpha, n)$ con el nivel de significancia α . Si el valor observado $D_{\max}(x)$ es menor o igual que el valor crítico, entonces se acepta la hipótesis nula de que no existen diferencias significativas entre la distribución teórica y la distribución dada por los resultados muestrales, es decir, que los valores generados siguen la distribución que se había propuesto.

Cuando la muestra y/o los valores no se van a organizar en intervalos de clase, el procedimiento es similar, sólo que el paso 2 se cambia por “ordenar los valores de la muestra en forma ascendente, de menor a mayor”, y en los pasos 3 y 4 se calculan las funciones de distribución teórica y empírica para cada valor de la muestra.

A continuación se presenta un ejemplo de aplicación de la prueba S – K.

Ejemplo 8.

En la tabla 7 se presentan los cálculos para realizar la prueba S – K en una muestra de 100 números aleatorios obtenidos mediante un generador congruencial multiplicativo con $a = 899$, $C = 0$ y $M = 32768$.

Tabla 7. Valores agrupados para ejercicio de prueba S – K.

Valores agrupados.										
Intervalo de clase	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Límite inf. X_{i-1}	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
Límite sup. X_i	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
O_i	14	15	9	8	4	11	10	10	7	12
$\sum O_i$	14	29	38	46	50	61	71	81	88	100
$S_n(X_i)$	0.14	0.29	0.38	0.46	0.50	0.61	0.71	0.81	0.88	1.00
$F_x(X_i)$	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00
$ F_x(X_i) - S_n(X_i) $	0.04	0.09	0.08	0.06	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.00

La diferencia máxima observada es $D_{\max}(x) = 0.09$ y el valor crítico para un nivel de significancia del 1% es de $1.63/\sqrt{100} = 0.163$ (consultar tabla 6). Como $D_{\max}(x) < D(0.01, 100)$ no podemos rechazar la hipótesis nula y debemos concluir que la muestra tomada del generador de números aleatorios proviene de una distribución uniforme (0, 1).

Propiedades de la prueba de Smirnov – Kolmogorov

La prueba de Smirnov – Kolmogorov (S – K) puede aplicarse para tamaños de muestra pequeños, lo que no sucede con la Ji-Cuadrada.

La prueba S – K es más poderosa que la Ji-Cuadrada, es decir, cuando se rechaza la hipótesis nula, se tiene una mayor confiabilidad en dicho resultado.

La prueba S – K debe usarse cuando la variable de análisis es continua. Sin embargo, si la prueba se usa cuando la distribución de la población no es continua, el error que ocurre en la probabilidad resultante está en la dirección segura. Esto quiere decir que cuando se rechaza la hipótesis nula, se tiene verdadera confianza en la decisión. [41]

2.10 Ingeniería industrial

2.10.1 Importancia de la productividad

Ciertos cambios continuos que ocurren en el entorno industrial y de negocios deben estudiarse desde el punto de vista económico y práctico. La única posibilidad para que una empresa o negocio crezca y aumente su rentabilidad es aumentar la productividad.

Las técnicas fundamentales que dan como resultado incrementos en la productividad son: métodos, estándares de estudio de tiempos (también conocidos como medición del trabajo) y diseño del trabajo. Todos los aspectos del negocio o la industria constituyen áreas fértiles para la aplicación de métodos, estándares y diseño del trabajo.

Hoy, la mayor parte de los negocios e industrias estadounidenses se ha visto en la necesidad de reestructurar y disminuir el tamaño de sus empresas para operar con mayor efectividad en un mundo cada vez más competitivo. Con mayor intensidad que nunca, estudian la reducción de costos y el mejoramiento de la calidad mediante una mayor productividad.

La sección de producción de una industria puede llamarse su *corazón*; si la actividad de esta sección se interrumpe, toda la industria deja de ser productiva. El departamento de producción incluye actividades de ingeniería de métodos, estándares de estudio de tiempos y diseño del trabajo. [42]

2.10.2 Balanceo de líneas de ensamble

El concepto de ensamble del producto

Una definición de “ensamble” dada por el diccionario, aplicable al área de manufactura, es la siguiente: armar o unir las partes de _____. Aunque la mayoría de las empresas venden productos que consisten en ensambles de varias partes, la persona típica piensa normalmente en la función de ensamble industrial en términos de productos que contienen muchas partes.

Si el ensamble se lleva a cabo progresivamente mediante el trabajo manual, la distribución uniforme de los elementos a lo largo de las estaciones de ensamble es muy importante. El balanceo del ensamble, llamado con más frecuencia “balanceo de la línea de ensamble”, es una función importante de planeación del subensamble, la micro producción, que facilita el flujo uniforme de los ensambles a lo largo de un sistema progresivo.

Perspectiva histórica del ensamble progresivo

Probablemente los dos acontecimientos más importantes que condujeron al ensamble progresivo, son el concepto de partes intercambiables y el concepto de división del trabajo. Éste último lleva al primero varios siglos de ventaja; pero los dos combinados hacen posible el diseño de estaciones de ensamble a lo largo de un transportador en movimiento y en éstas los operadores realizan tareas específicas.

El problema de diseño para encontrar formas de igualar los tiempos de trabajo en todas las estaciones se denomina problema de balanceo de línea. [43]

Deben existir ciertas condiciones para que la producción en línea sea práctica:

1. Cantidad. El volumen o cantidad de producción debe ser suficiente para cubrir el costo de la preparación de la línea. Esto depende del ritmo de producción y de la duración que tendrá la tarea.
2. Equilibrio. Los tiempos necesarios para cada operación en línea deben ser aproximadamente iguales.
3. Continuidad. Deben tomarse precauciones para asegurar un aprovisionamiento continuo del material, piezas, subensambles, etcétera, y la prevención de fallas de equipo.

Los casos típicos de balanceo de línea de producción son:

1. Conocidos los tiempos de las operaciones, determinar el número de operarios necesarios para cada operación.
2. Conocido el tiempo de ciclo, minimizar el número de estaciones de trabajo.
3. Conocido el número de estaciones de trabajo, asignar elementos de trabajo a la misma.

2.10.3 Línea de fabricación y línea de ensamble

Una versión de una distribución orientada al producto es una línea de fabricación; otra es una línea de ensamble. La *línea de fabricación* construye componentes, tales como llantas para automóvil o partes metálicas para un refrigerador, en una serie de máquinas. Una *línea de ensamble* junta las partes fabricadas en una serie de estaciones de trabajo.

Ambas pertenecen a los procesos repetitivos y en ambos casos la línea debe de ser balanceada. Es decir, el trabajo llevado a cabo en una máquina debe balancear el trabajo realizado en la siguiente máquina en la línea de fabricación, de la misma manera en que se debe balancear la actividad realizada por un empleado en una estación de trabajo, dentro de una línea de ensamble.

Las líneas de fabricación tienden a estar acompañadas por la máquina, y requieren cambios mecánicos y de ingeniería para facilitar el balanceo. Por otro lado, las líneas de ensamble tienden a ser acompañadas por tareas de trabajo asignadas a individuos o a estaciones de trabajo. Las líneas de ensamble, por lo tanto, pueden ser balanceadas moviendo las tareas de un individuo a otro. De esta manera, la cantidad de tiempo requerido por cada individuo o estación se iguala.

El problema central en la planeación de la distribución orientada al producto es balancear la salida de cada estación de trabajo en la línea de producción, de tal forma que sea casi igual, mientras se obtiene la cantidad de salida deseada. La meta de la administración es crear un flujo continuo suave sobre la línea de ensamble, con un mínimo de tiempo ocioso en cada estación de trabajo de la persona. Una línea de ensamble bien balanceada tiene la ventaja de la gran utilización del personal, y de la instalación y equidad entre las cargas de trabajo de los empleados. Algunos contratos de sindicatos incluyen un requerimiento, las cargas de trabajo serán casi iguales entre aquellos en la misma línea de ensamble. [44]

2.11 Ingeniería de métodos

La ingeniería de métodos incluye diseñar, crear y seleccionar los mejores métodos, procesos, herramientas, equipo y habilidades de manufactura para fabricar un producto basado en los diseños desarrollados en la sección de ingeniería de producción. Una vez establecido el método completo, la responsabilidad de determinar el tiempo estándar requerido para fabricar un producto recae en la ingeniería industrial.

Los términos *análisis de operaciones, diseño y simplificación del trabajo e ingeniería de métodos y reingeniería corporativa*, con frecuencia se usan como sinónimos. En muchos casos, se refieren a una técnica para aumentar la producción por unidad de tiempo o disminuir el costo por unidad de producción –en otras palabras, *mejoramiento de la productividad*–. Sin embargo, la ingeniería de métodos implica el análisis en dos momentos diferentes de la historia del producto. Primero, es responsable de diseñar y desarrollar los diversos centros de trabajo en donde se fabricará el producto. Segundo, esa ingeniería debe estudiar de manera

continúa los centros de trabajo para encontrar una mejor manera de fabricar el producto y aumentar su calidad.

La ingeniería de métodos incluye el uso de la capacidad tecnológica. Debido a la ingeniería de métodos, las mejoras en la productividad no tienen límite. La diferencia en la productividad con la innovación tecnológica puede tener tal magnitud que los países desarrollados siempre podrán mantener su competitividad respecto a los países en desarrollo con salarios más bajos. Por lo tanto, la investigación y desarrollo (I&D) es esencial para la ingeniería de métodos.

Los ingenieros de métodos usan un procedimiento sistemático para desarrollar un centro de trabajo, fabricar un producto o proporcionar un servicio. Este procedimiento se describe a continuación. Observe que los pasos 6 y 7 no son parte del estudio de métodos, pero son necesarios en un centro de trabajo que se encuentra en operación.

1. *Seleccionar el proyecto.* Por lo común, los proyectos seleccionados representan ya sea nuevos productos o productos existentes con altos costos de manufactura y pocas ganancias. También los productos que experimentan problemas para mantener su calidad y que tienen problemas de competitividad son proyectos lógicos.
2. *Obtener y presentar los datos.* Reunir todos los hechos importantes relacionados con el producto o servicio. Éstos incluyen dibujos y especificaciones, requerimientos de cantidad, de entrega, y proyecciones de la vida prevista del producto o servicio. Una vez obtenida toda la información importante, se registra en forma ordenada para su estudio y análisis. En este punto, es muy útil el desarrollo de diagramas de proceso.
3. *Analizar los datos.* Se usan los enfoques básicos del análisis de operaciones para decidir qué alternativa dará como resultado el mejor producto o servicio. Estos enfoques básicos incluyen propósito de la operación, diseño de la parte, tolerancias y especificaciones, materiales, proceso de manufactura, preparación y herramientas, condiciones de trabajo, manejo de materiales, distribución de planta y principios de economía de movimiento.
4. *Desarrollar el método ideal.* Se selecciona el mejor procedimiento para cada operación, inspección o transporte tomando en cuenta las restricciones asociadas con cada alternativa, incluso las implicaciones de productividad, ergonomía y seguridad e higiene.
5. *Presentar y establecer el método.* Debe explicarse con detalle el propósito del método a los responsables de su operación y mantenimiento. Se consideran todos los detalles del centro de trabajo para asegurar que el método propuesto proporcione los resultados previstos.
6. *Desarrollar un análisis del trabajo.* Se realiza un análisis del método establecido para asegurar que los operarios se seleccionaron bien, se capacitaron y se les remunera como corresponde.
7. *Establecer tiempos estándar.* Se establece un estándar justo para el método implantado.

8. *Dar seguimiento al método.* De manera periódica, se audita el método instalado para determinar si la productividad y la calidad previstas son las obtenidas, si la proyección de los costos fue correcta y si pueden hacerse nuevas mejoras.

En resumen, la ingeniería de métodos es un escrutinio minucioso y sistemático de todas las operaciones directas e indirectas para encontrar mejoras que faciliten la realización del trabajo y permitan que se haga en menos tiempo, con menor inversión por unidad. En otras palabras, el objetivo real de la ingeniería de métodos es mejorar las utilidades. [42]

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS EXPERIMENTAL

3.1 Introducción

En el método experimental se parte de hipótesis –generadas por los conocimientos y reflexiones del investigador– y posteriormente se observa y/o se recogen datos, con los que se validan o refutan dichas hipótesis. En cualquier caso, la investigación no es un proceso lineal, sino en paralelo e interactivo: un vaivén constante entre bibliografía, reflexión, observación, debate, (re)formulación de hipótesis, etc.

Las hipótesis que se formulen deben someterse a una comprobación empírica, con el fin de demostrar o refutar su validez. Una hipótesis contiene en sí misma una respuesta provisional a una pregunta de investigación. Cuando se afirma que una hipótesis ha sido confirmada mediante uno o varios experimentos, pruebas acústicas, auditivas, etcétera y que, por consiguiente, aquella pasa a ser un hecho verdadero, se sobreentiende que no se ha alcanzado la verdad absoluta y definitiva en la materia en cuestión, sino, simplemente, la realidad a la que el estado de desarrollo científico del momento permite acceder, realidad que, los avances tecnológicos y científicos en general permiten ir superando día a día. En suma, la verdad de las hipótesis confirmadas es provisional.

El método experimental no se limita a comprender los fenómenos, sino que va un paso más allá, a explicarlos (Martínez Celdrán, 1991). ¿Y explicarlos para qué? Sencillamente, para que alguien más los comprenda, un segundo paso. Tal y como comenta Johns-Lewis (1986), "una descripción sin explicación constituye una versión empobrecida de la ciencia". [45]

Las etapas de que consta el método experimental, *grosso modo*, son las siguientes (Llisterri, 1991):

1. Presentación, introducción, marco teórico.
2. Formulación de hipótesis.
3. Objetivos del experimento.
4. Diseño del experimento.
5. Recolección de datos.
6. Análisis estadístico.
7. Interpretación de los resultados.
8. Conclusiones, resumen.
9. Discusión, propuestas en esa línea de investigación.

La realización de prácticas de laboratorio de ingeniería de métodos, tiene la finalidad de exponer a los estudiantes a situaciones reales del ambiente laboral para elaborar distintos diagramas. De esta manera los estudiantes aprenderán a identificar las áreas de oportunidad donde se pueden aplicar mejoras.

3.2 Metodología

A continuación se presentará a grandes rasgos la metodología seguida en la elaboración del laboratorio virtual de ingeniería de métodos.

1. Estado del arte

Se hizo una recopilación de información acerca de la evolución de los laboratorios virtuales. Esto se incluye en el capítulo 1 del presente trabajo de tesis, y abarca desde los inicios de la realidad virtual hasta los laboratorios virtuales actuales.

2. Marco teórico.

Se recopiló información referente a todas las herramientas teóricas, bases, normas, principios, etcétera, utilizadas en el desarrollo de la tesis. Esto se incluye en el capítulo 2 del presente trabajo de tesis.

Básicamente el capítulo 2 se refiere a la simulación, la cual involucra mucha estadística. También se hace referencia a la ingeniería industrial y a la ingeniería de métodos.

3. Aplicación del QFD

La elaboración de un producto nuevo de calidad, implica determinar todos aquellos requerimientos que satisfagan las necesidades y deseos del cliente. Un laboratorio virtual de ingeniería de métodos es algo novedoso, y no existe algún producto comercial así. Por lo tanto, fue necesario realizar una investigación para obtener todas las características necesarias.

La aplicación del QFD se incluye en el capítulo 3 del presente trabajo de tesis.

4. Programación de las prácticas

Una vez que se obtuvieron todos los requerimientos necesarios de cada práctica, el siguiente paso fue la programación en el *software* utilizado, que en este caso es *ProModel*.

Las prácticas virtuales contienen todos los elementos obtenidos de la aplicación del QFD (no se incluyeron aquellos que no se podían simular).

5. Aplicación de las prácticas virtuales

Un grupo piloto de ingeniería de métodos utilizó las prácticas virtuales para comprobar que efectivamente funcionan. Estas prácticas no se utilizaron al 100% porque el profesor aún no estaba capacitado en el manejo del laboratorio virtual.

6. Comparación de los resultados del laboratorio virtual con la realidad

Todos los tiempos presentados en las prácticas virtuales se compararon con la realidad. Para esto se utilizaron gráficas de control y se tomaron en cuenta los tiempos reales y los reportes de las prácticas de ingeniería de métodos del semestre 2010-1.

3.3 Aplicación del QFD

Introducción al QFD

La satisfacción de las expectativas del cliente requiere que éstas sean conocidas y tratadas de manera adecuada. El despliegue de funciones de calidad se utiliza para definir, en términos operacionales, la “voz del cliente” (no puede olvidarse que el consumidor tiene necesidades y expectativas que, con frecuencia, difieren de las del fabricante, por lo que se debe aprender lo suficiente de tales necesidades y expectativas para identificar los objetivos racionales en los procesos y reconocer el costo que ocasionan algunas desviaciones). [46]

Al momento de elaborar algún producto (sobre todo, innovador), es necesario asegurar que cumpla con los objetivos para los que fue diseñado. Un laboratorio virtual debe ofrecer todos (o casi todos) los resultados que se obtienen en la realidad.

El hacer algo en la vida real, trae como consecuencias una infinidad de resultados; el *software* de simulación *ProModel* ofrece una gran variedad de opciones y resultados. Ciertamente las prácticas de laboratorio de ingeniería de métodos ya están predefinidas, pero ello no significa que no sea necesario el ofrecer tal o cual característica extra que nos pueda proporcionar *ProModel*.

Debido a lo anterior fue necesaria la aplicación del QFD en el presente proyecto de tesis, ya que tal sistema de calidad aborda todos los aspectos necesarios para elaborar un buen producto. De no aplicarse el QFD, se estaría trabajando en algo que no tuviera límites (o unos límites muy amplios), además de no cumplir al 100% con las expectativas del cliente.

Un sistema de despliegue de funciones de calidad de gran alcance debe reflejar consideraciones de tecnología, fiabilidad y costes.

3.3.1 El gráfico de calidad

El gráfico de despliegue de la calidad demandada

La información obtenida de los consumidores respecto a las calidades que desean en un producto debe analizarse sistemáticamente para que sea útil en el desarrollo de dicho producto. La tabla 8 muestra un modo de convertir información en bruto a información que pueda utilizarse en un gráfico de calidad.

Tabla 8. Conversión de expresiones del cliente en datos reformulados.

Expresiones de los clientes.	Datos reformulados.	Medios y observaciones.
Desea más de dos botones de mando.	Maniobra fácil. Poder manejar cosas difíciles.	Incrementar número de botones de mando.
Necesita un control neutral en el transmisor.	El movimiento es estable. Poder hacer maniobras complicadas.	Añadir un control neutral al transmisor.

Todo lo que el usuario comente, debe clasificarse como se muestra en la figura 41, usando el procedimiento descrito en “Cómo construir un gráfico de despliegue de la calidad demandada”.

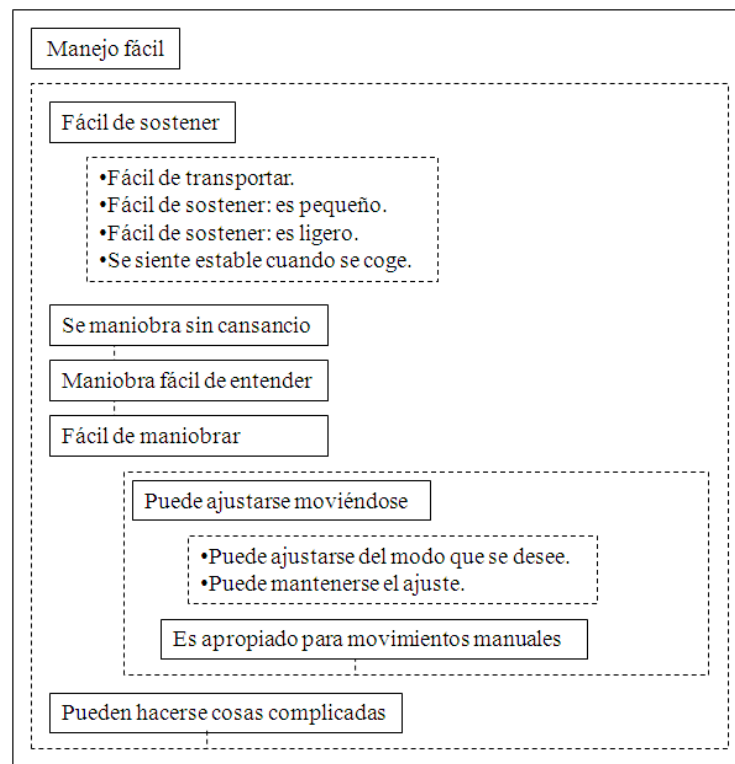


Figura 41. Método KJ para agrupar la información expresada en palabras.

Finalmente, se puede hacer un gráfico de despliegue de funciones de calidad demandadas ordenando los elementos de primero, segundo, y tercer nivel como se muestra en la parte izquierda de la figura 42.

Elementos demandados (nivel 3)	Elementos de calidad
Fácil de transportar. ----->	Peso, dimensiones, forma, portabilidad.
Suficientemente pequeño para moverlo fácilmente. ----->	Dimensiones, forma, portabilidad.
Suficientemente ligero para moverlo fácilmente. ----->	Peso, forma, portabilidad.
Se siente estable cuando se sostiene. ----->	Peso, centro de gravedad, ángulo de inclinación.
Estable cuando se coloca. ----->	Forma, centro de gravedad, estabilidad.
Incluso los principiantes pueden operar fácilmente.	Localización de botones, sensibilidad al tacto.
Puede operarse fácilmente, incluso aunque es pequeño.	Peso, forma, esfuerzo necesario para mover taco, sensibilidad al tacto del taco, localización de botones.

Figura 42. Extracción de elementos de calidad.

Cómo construir un gráfico de despliegue de la calidad demandada

1. Convertir las declaraciones del consumidor (las propias palabras del consumidor) en “datos con expresión clarificada” utilizando expresiones simples limitadas a un solo significado. (Como en la tabla 8)
2. Agrupar los datos clarificados y asignarles un titular que describa más ampliamente dichos datos. Escribir esto en una tarjeta.
3. Usar los titulares descriptivos como detalles aproximativos de tercer nivel. Agruparlos en categorías similares asignando titulares descriptivos en los niveles segundo y primero, como se hace en el método KJ.
4. Clarificar cuales son los detalles de primer nivel de la calidad demandada. Afinar, si es necesario, añadiendo elementos a los detalles de los niveles segundo y tercero.
5. Asignar números de clasificación y organizar todo en un gráfico de despliegue de la calidad demandada.

3.3.2 El gráfico de despliegue de elementos de calidad

Cómo construir un gráfico de despliegue de elementos de calidad

1. Extraer y listar los elementos de calidad de cada calidad demandada.
2. Escribir cada calidad en una tarjeta.
3. Utilizando éstos como detalles aproximados de tercer nivel, agruparlos en categorías similares. Utilizar un método como el KJ para agruparlos en niveles segundo y primero y asignar titulares descriptivos.
4. Re arreglar desde el primer nivel de detalles a los niveles segundo y tercero, añadiendo elementos si es necesario.
5. Asignar números de clasificación y organizarlos en un gráfico.
6. Emplear la fila inferior (tercer nivel de detalle) como características de calidad. Asegurarse de que son características de calidad mensurables.

Los elementos de calidad son elementos del diseño que pueden medirse cuando evaluamos la calidad. Las características de diseño son aspectos individuales mensurables de los elementos de calidad.

Cuando los elementos de calidad tienen múltiples características de calidad, se utiliza un gráfico de despliegue de características de calidad para ilustrar estas relaciones. Por ejemplo, en el QFD aplicado a servicios, una “sonrisa” será un elemento de calidad, no una característica de calidad mensurable.

Gráfico de calidad completo

La figura 43 muestra como un gráfico de calidad (también llamado “casa de la calidad”) puede hacerse combinando un gráfico de despliegue de calidad demandada y un gráfico de despliegue de elementos de calidad para conformar una matriz utilizando los siguientes pasos:

1. Construir un gráfico de despliegue de calidad demandada.
2. Construir un gráfico de despliegue de características de calidad.
3. Combinar los dos anteriores en una matriz (gráfico bi-dimensional).
4. Marcar la relación entre elementos con símbolos.

Gráfico de despliegue de elementos de calidad			1 ^{er} nivel						
			2 ^o nivel						
Gráfico de despliegue de calidad demandada			3 ^{er} nivel						
			Valores rasca de características						
1 ^{er} nivel	2 ^o nivel	3 ^{er} nivel	Maniobrabilidad			Función eléctrica			
			Portabilidad (6)			Características TRS (7)			
			Medición	Forma	Peso	Características IS			
			Consumo eléctrico	Características temperatura eléctrica	Rango de voltaje operación	Frecuencia			
1 fácil de maniobrar	11 fácil de sostener (1)	111 fácil de transportar	⊙	⊙	⊙				
		112 fácil de sostener porque es pequeño	○	○					
		113 fácil de sostener porque es ligero	⊙	⊙	⊙				
		114 estable cuando se sostiene	⊙	⊙	⊙				
		115 estable cuando se coloca	○	○	○				
	12 maniobra sin cansancio (2)	121 tiene un peso apropiado							
		122 tiene un tamaño apropiado							
	13 maniobra fácil de entender (3)	131 uso fácil de entender						○	
		132 fácil de maniobrar incluso principiantes						○	
	14 maniobra fácil (4)	141 fácil de maniobrar incluso si es pequeño		○	○	○			
		142 indicador fácil de leer.						○	

Figura 43. Gráfico de calidad.

Los símbolos ⊙ , ○ o Δ se emplean para indicar la fuerza de la relación (el grado de correlación) entre calidades demandadas y elementos de calidad, de acuerdo a lo siguiente:

- ⊙ Correlación fuerte.
- Correlación media.
- Δ Alguna correlación.

El término “gráfico de calidad”, introducido por Koichi Nishimura, ha sido definido como un gráfico que ilustra la relación entre calidad verdadera o actual (tal como la demanda el consumidor) sistematizada de acuerdo con sus funciones, y las características de calidad como características imagen.

La calidad de diseño es el proceso entero de convertir la calidad demandada por el consumidor en características imagen, por medio del razonamiento, la translación, y la transferencia. Por tanto, el gráfico de calidad es el gráfico básico para la calidad de diseño.

El gráfico de calidad es un mecanismo gráfico que nos permite:

1. Analizar sistemáticamente las estructuras de las calidades últimas o verdaderas demandadas por los consumidores según sus propias palabras.
2. Indicar las relaciones entre las calidades demandadas y ciertas características de calidad.
3. Convertir las demandas del consumidor en características imagen o características trasladadas.
4. Desarrollar una calidad de diseño.

3.3.3 Bosquejo del despliegue de funciones de calidad

Desarrollo del plan de calidad y la calidad de diseño

1. Investigar las demandas de calidad latentes y expresas de los consumidores en el mercado. Entonces, decidir qué clase de “cosas” hacer.
2. Estudiar otras características importantes del mercado y preparar un gráfico de despliegue de funciones de calidad que refleje tales demandas y características.
3. Realizar un análisis de los productos en competencia, a lo que se denominará “análisis competitivo”. Desarrollar un plan de calidad y determinar las características que venden. La figura 44 puede utilizarse como guía.

Planificación de calidad.					
Grado de importancia.	Comparación de la compañía con otros.	Calidad de planificación.	% de mejora.	Puntos para venta.	Peso de calidad demandada.

Figura 44. Planificación de calidad.

4. Determinar el grado de importancia de cada calidad demandada.
5. Hacer una lista de los elementos de calidad y preparar un gráfico de despliegue de elementos de calidad.
6. Preparar un gráfico de calidad combinando el gráfico de despliegue de calidad demandada y el gráfico de despliegue de elementos de calidad.
7. Realizar un análisis de productos competidores para ver lo que hacen otras compañías en relación a cada uno de estos elementos de calidad (véase figura 45).

Diseño de calidad.	Comparación de la compañía con otros.
	Control de calidad.
	Peso de características de calidad.

Figura 45. Diseño de calidad.

8. Analizar las quejas del cliente.
9. Determinar los elementos de calidad más importantes indicados por las quejas y demandas de calidad de los consumidores.
10. Determinar la calidad de diseño específica mediante el estudio de las características de calidad y convertirlas en elementos de calidad.
11. Determinar el método de aseguramiento de la calidad y los métodos de test.

Diseño detallado y preproducción (despliegue de subsistemas)

1. Convertir la calidad del producto final en características de calidad para los componentes mediante el despliegue, primero de un gráfico de despliegue de la unidad y después de un gráfico de despliegue de componentes, que incluye el gráfico de despliegue de la unidad.
2. Clarificar las funciones de componentes y unidad, las características de calidad de los componentes, y los estándares. Si hay productos ya existentes, debe también incluirse información de capacidad del proceso. Si está disponible un índice de capacidad del proceso, registrar el número; si no es así, indicar el nivel con A, B, C, etcétera.
3. Identificar los elementos del aseguramiento de la calidad, las características de función F, y las características de seguridad S de cada unidad y sus componentes. Una característica funcional es una característica que debe producirse dentro de tolerancias de diseño especificadas para que opere el producto. Las características de seguridad son aquellas que con el tiempo pueden dañarse, y cuyas tolerancias deben cumplirse.

Identificar e indicar los elementos F y S en los planos ayuda a comunicar la intención de un diseño a la gente de fabricación. Esta es la clave para asegurar la calidad.

4. Seleccionar los elementos a inspeccionar para las unidades y sus componentes.

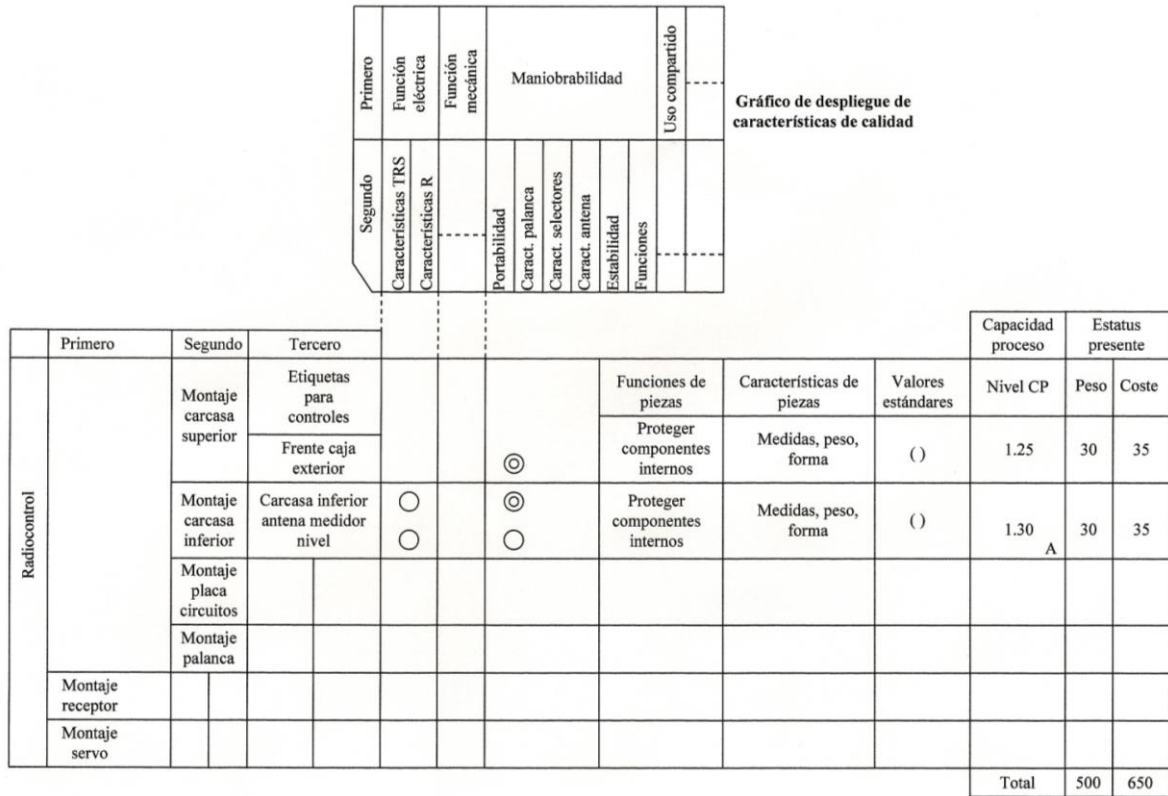


Figura 46. Despliegue de subsistema.

En la figura 46 se puede ver un ejemplo de cómo convertir la calidad del producto final en características de calidad para los componentes (Paso número 1 del despliegue de subsistemas).

Despliegue del proceso

1. Investigar y, si es necesario, desarrollar las técnicas de proceso que sean necesarias para maximizar la capacidad del proceso. Verificar mediante pruebas cualesquier técnica nueva o modificada.
2. Determinar los métodos óptimos de proceso. Para esto, calcular el factor de coste de la precisión en cada proceso, dibujar una curva de costes-precisión y así, determinar qué método de proceso puede obtener la precisión requerida con el mínimo coste.
3. Evaluar los resultados de todos los pasos previos, así como los resultados de un prototipo, para estimar los pros y los contras de empezar la producción.

4. Establecer los estándares de calidad de componentes, los estándares de inspección, y los estándares de compras. Decidir entre fabricar internamente cada componente o utilizar una fuente externa, y establecer estándares apropiados.
5. Preparar un gráfico de planificación del proceso para emplearlo en el despliegue de instalaciones. Cuando se determinen las instalaciones y condiciones de proceso necesarias, identificar los puntos de chequeo QA (aseguramiento de la calidad) para cada máquina construyendo una matriz bi-dimensional que ordene las características de calidad del producto final contra las características y condiciones de la instalación.
6. Hacer un gráfico de planificación QC del proceso para las piezas. Hacer gráficos de planificación QC de procesos por separado para cada una de las unidades principales y sus componentes principales. La figura 47 muestra un gráfico de planificación para la caja superior de un sistema de radio control. Las calidades como la configuración, dimensiones y durabilidad de los productos de procesos internos se denominan elementos de control o puntos de control. Los elementos de control se denominan elementos de chequeo o verificación. Esto es, los puntos de control que son parte de las características de calidad (resultados) se trasladan a puntos de chequeo (causas) para el proceso.

N°.	proceso	Condiciones de proceso		Características de piezas						elementos de control proceso	
		equipo	condiciones	Dimensiones	Forma	Peso	Durabilidad				
1	secado	tolva									temperatura interior de tolva
2	conformado	máquina de moldeo por inyección		⊙	⊙	⊙					presión y tiempo de inyección primaria. presión y tiempo de inyección secundaria. tiempo, carga inicial. tiempo de enfriado. presión, inyección. velocidad de inyección. presión trasera. ⊙ temperatura de inyección.

Figura 47. Gráfico de planificación de proceso QC (carcasa superior).

7. Hacer un gráfico QC de proceso que especifique quien medirá los elementos de control e inspección, cuándo se hará, y quién tomará acción en caso de problemas.
8. Hacer un gráfico de QC de proceso para el ensamble final. Empleando los procedimientos mencionados anteriormente, establecer un sistema de control para los elementos de control en el proceso de ensamble.
9. Redactar los estándares de operaciones. Los elementos de control de los puntos de chequeo deben incluirse sin fallo.

10. Proceder con el despliegue respecto a los subcontratistas y suministradores. Hacer que éstos remitan gráficos QC de proceso con las características de calidad de cada pieza.
11. Realizar un análisis pro-activo de todos los factores. Deben desplegarse desde el punto inicial, esto es, de acuerdo con el enfoque de diseño. Analizar los datos obtenidos en este proceso, en la producción de ensayo, preproducción, y retroalimentar cualquier información referente a problemas tan rápidamente como sea posible.
12. Comunicar los resultados de estos análisis hasta los departamentos relacionados con las fases iniciales para su uso durante los cambios de modelo o desarrollo de nuevos productos.

3.3.4 Elección del tamaño apropiado de la muestra

Una cuestión que por lo general surge cuando se diseña un estudio estadístico es: “¿Cuántos artículos debería haber en la muestra?” Si una muestra es demasiado grande, se desperdicia dinero recolectando datos. Igualmente, si es demasiado pequeña, las conclusiones resultantes serán inciertas.

El tamaño de la muestra depende de tres factores:

1. El nivel de confianza que se desea.
2. El margen de error que puede tolerar el investigador.
3. La variabilidad en la población que se estudia.

Los niveles de confianza que se seleccionan con mayor frecuencia son 95 y 99 por ciento. Un nivel de confianza de 95 por ciento corresponde a un valor z de ± 1.96 y uno de 99 por ciento corresponde a un valor z de ± 2.58 . Mientras más alto sea el nivel de confianza, mayor será el tamaño de la muestra.

El error máximo permisible, que se designa como E , es la cantidad que se suma o resta de la media de la muestra, para determinar los puntos extremos del intervalo de confianza; es la cantidad de error que el investigador desea tolerar. También es la mitad de la amplitud del intervalo de confianza correspondiente.

Para una población finita en la que el número total de objetos es N y el tamaño de la muestra n , se hace el siguiente ajuste a los errores estándar de las medias de la muestra y la proporción:

Error estándar de las medias de la muestra, utilizando un factor de corrección $S_x = \frac{s}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{N-n}{N-1}}$

Error estándar de las proporciones de la muestra, utilizando un factor de corrección $\sigma_p = \sqrt{\frac{P(1-P)}{n}} \sqrt{\frac{N-n}{N-1}}$

Si se dispone de una estimación de P , de un estudio piloto o cualquier otra fuente, puede usarse. De lo contrario, se utiliza 0.50 porque el término $P(1 - P)$ nunca puede ser mayor que cuando $P = 0.50$.

Por ejemplo, si $P = 0.30$, entonces $P(1 - P) = 0.30(1 - 0.30) = 0.21$, pero cuando $P = 0.50$, $P(1 - P) = 0.50(1 - 0.50) = 0.25$. [47]

La interacción entre el error de muestreo, el nivel de confianza, la desviación y el tamaño de la muestra se muestra gracias a la siguiente fórmula:

$$E = z \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Para determinar el tamaño de la muestra de nuestro estudio, se desarrolló la ecuación anterior de la siguiente manera:

$$E = z \frac{s}{\sqrt{n}}$$

pero

$$\frac{s}{\sqrt{n}} = \sigma_x$$

entonces

$$E = z\sigma_x$$

despejando σ_x obtenemos:

$$\frac{E}{z} = \sigma_x$$

después:

$$\left(\frac{E}{z}\right) = \sqrt{\frac{P(1-P)}{n}} \sqrt{\frac{N-n}{N-1}}$$

$$\left(\frac{E}{z}\right)^2 = \frac{P(1-P)}{n} \left(\frac{N-n}{N-1}\right)$$

$$\left(\frac{E}{z}\right)^2 \frac{N-1}{P(1-P)} = \frac{N-n}{n}$$

$$\left(\frac{E}{z}\right)^2 \frac{N-1}{P(1-P)} = \frac{N}{n} - 1$$

$$\left(\frac{E}{z}\right)^2 \frac{N-1}{P(1-P)} + 1 = \frac{N}{n}$$

Finalmente:

$$n = \frac{N}{\left(\frac{E}{z}\right)^2 \frac{N-1}{P(1-P)} + 1}$$

Pre-resultados y pre-desarrollo

En los laboratorios de ingeniería de métodos se realizan nueve tipos de prácticas: Tres de ellas no pueden simularse ya que no representan procesos de fabricación discreta. El resto de las prácticas sí pueden simularse en *ProModel*.

Las prácticas del laboratorio virtual no contemplarán ciertos puntos de las prácticas reales, como por ejemplo, la práctica “Análisis de operaciones” consta de ocho enfoques, de los cuales solamente tres se pueden integrar a la práctica virtual, estos son: finalidad de la operación, procesos de manufactura y distribución de equipo.

Antes de la aplicación del QFD se aplicaron encuestas a alumnos de ingeniería industrial y entrevistas a profesores que imparten (o han impartido) la materia de ingeniería de métodos. De esta manera se obtuvieron las demandas del cliente.

Elección del tamaño de la muestra

En este proyecto se seleccionó un error del 10% con un nivel de confianza del 95%, y se realizaron el número de encuestas que nos arrojó la siguiente fórmula:

$$n = \frac{N}{\left(\frac{E}{z}\right)^2 \frac{N-1}{P(1-P)} + 1}$$

El número de alumnos de ingeniería industrial (semestre 2009-1) es de 361, por lo tanto:

$$n = \frac{361}{\left(\frac{0.1}{1.96}\right)^2 \frac{361-1}{0.5(1-0.5)} + 1}$$
$$n = 76.02$$
$$n \approx 76$$

Recopilación de las demandas del cliente

Se diseñó un cuestionario-encuesta (Anexo 1) el cuál se aplicó a un total de 76 estudiantes. Esta encuesta se realizó tanto a estudiantes que ya habían cursado la materia de ingeniería de métodos, como a aquellos que aún no la habían cursado.

Gráfico de despliegue de la calidad demandada

Las encuestas aplicadas arrojaron las demandas mostradas en la tabla 9. En ella podemos observar (ordenadas de mayor a menor) todas las frecuencias de solicitud de las demandas para cada práctica de laboratorio.

Tabla 9. Resultados de la encuesta.

Práctica	Frecuencia de solicitud
1. Análisis para el ensamble de un producto.	68
2. Estudio de tiempos.	53
3. Diagrama de operaciones de proceso.	49
4. Diagrama hombre – máquina.	45
5. Análisis de operaciones.	45
6. Biblioteca.	7
Características deseadas.	
1. Que sean lo más apegadas a la realidad posible.	71
2. Que el laboratorio virtual sea fácil de utilizar.	65
3. Que contenga fotos de construcciones reales y no dibujos.	64
4. Poder mover los elementos con exactitud métrica.	60
5. Que contenga procesos de empresas reales.	60
6. Que cada año se actualice con más procesos de empresas reales.	54
7. Poder realizar las prácticas por Internet.	50
8. Que el laboratorio virtual tenga un instructivo.	49
9. Que las prácticas sean fáciles de realizar.	49
10. Que las prácticas sean en tercera dimensión.	49
11. Que el laboratorio virtual tenga sonidos reales.	35
12. Que el laboratorio virtual tenga niveles de usuarios.	30
13. Que el laboratorio virtual dé recomendaciones y/o advertencias.	27
14. Que el laboratorio virtual tenga fotos de personas.	20
15. Que la animación sólo se vea por un corto tiempo.	15

Además, las entrevistas con profesores de ingeniería de métodos arrojaron las características mostradas en la tabla 10 (nótese que son solamente 5 prácticas, ya que una de ellas cada profesor la realiza de una forma diferente).

Tabla 10. Características obtenidas de las entrevistas con profesores.

	Operaciones de proceso.	Identificación de materiales.	Tiempos de las operaciones.	Distancias.	Rutas de recorrido.	Tiempos de operadores y máquinas.	Tiempos de ocio.	Tiempos de retrasos inevitables.	Movimientos del operador.	Finalidad de la operación.	Diseño de la pieza.	Tolerancias y especificaciones.	Procesos de manufactura.	Preparación y herramientas.	Manejo de materiales.	Distribución de planta.
Práctica 1.	✘	✘	✘													
Práctica 2.	✘	✘	✘	✘												
Práctica 3.			✘	✘	✘											
Práctica 4.						✘	✘	✘								
Práctica 5.			✘						✘							
Práctica final.										✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘

En base a la información recabada de las encuestas y las entrevistas, se construyó la tabla 11, donde se muestra la conversión de las expresiones del cliente.

Tabla 11. Conversión de las expresiones del cliente.

Expresiones de los clientes.	Datos reformulados.	Medios y observaciones.
Realizar las prácticas por Internet.	Accesibilidad. Actualización. Interés por el aprendizaje.	Permitir acceso por Internet.
Que las prácticas sean lo más apegadas a la realidad	Aproximación a la realidad. Datos aproximados a la realidad.	Ambiente cercano a la realidad.
Que el laboratorio virtual contenga fotos de personas en lugar de simples dibujos.	Sensación de realidad. Interés por la animación.	Incluir fotos de personas.
Que el laboratorio virtual contenga fotos de construcciones reales y no dibujos.	Sensación de realidad. Interés visual.	Incluir fotos de construcciones.
Que el laboratorio virtual contenga sonidos reales.	Sensación de realidad. Interés auditivo. Interacción de los elementos.	Incluir sonidos.
Que las prácticas sean fáciles de realizar.	Simplicidad en el manejo.	Hacer el manejo fácil.
Que el laboratorio virtual tenga un instructivo.	Uso. Limitaciones. Información general.	Incluir un instructivo.
Que las prácticas sean presentadas en tercera dimensión.	Sensación de realidad. Visión panorámica.	Presentación visual en tercera dimensión.
Que el laboratorio virtual tenga niveles de usuario.	Uso. Habilidades del usuario.	Incluir un menú para diferentes capacidades de los usuarios.
Que los elementos del laboratorio virtual se puedan mover con exactitud métrica.	Movimiento de los elementos. Modificaciones. Diversidad de resultados.	Permitir el movimiento de elementos.
Que sólo se vea la animación por un corto tiempo, ya que se torna aburrido.	Rapidez de resultados.	Opciones de animación.
Que el laboratorio virtual contenga procesos de empresas.	Sensación de realidad. Apego al campo de aprendizaje. Complejidad de procesos. Actualización. Interés.	Incluir procesos de empresas.
Que el laboratorio virtual se actualice cada año con más procesos de empresas.	Actualización. Variación de procesos.	Actualizar la disponibilidad de los procesos.

Tabla 11 (continuación).

Expresiones de los clientes.	Datos reformulados.	Medios y observaciones.
Que el laboratorio virtual proponga recomendaciones y/o advertencias al usuario.	Inteligencia artificial. Ayuda. Puntos de vista.	Utilizar la inteligencia artificial para dar recomendaciones y/o advertencias.
Que el laboratorio virtual se centre más en los alumnos.	Proporcionar lo que los alumnos necesitan.	Desarrollar los conocimientos que necesitan los alumnos.

Construcción del gráfico de despliegue de la calidad demandada

Una vez que se obtuvieron los elementos demandados por el cliente, el siguiente paso fue “crear otro nivel de características”, esto es, juntar todos los elementos que tengan algo en común, y establecer una palabra que los englobe.

De toda la información obtenida, se seleccionaron aquellas palabras que definieran concreta y sencillamente los elementos de calidad requeridos; con esto se establecieron los elementos de primer nivel.

A continuación se muestran los elementos de calidad de segundo y primer nivel:

Elementos de primer nivel.

Elementos de segundo nivel.

Alto nivel de realidad virtual.

{
Imágenes.
Sonidos.
Vistas.
Tiempo.

Uso.

{
Manejo fácil.
Menú de niveles.
Mover elementos.
Opciones de animación.
Otros.

Ambiente laboral.

{
Procesos de empresas reales.
Desarrollar los conocimientos que los alumnos necesitan.

Construcción del gráfico de despliegue de elementos de calidad

En base a los elementos demandados, se pudieron establecer los elementos de calidad. En la tabla 12 se muestran estos elementos que juntos forman parte de la “casa de la calidad”.

Tabla 12. Relación entre los elementos demandados y los elementos de calidad.

Elementos demandados (nivel 2)	Elementos de calidad
Imágenes.	Personas, Construcciones.
Sonidos.	Personas, Maquinaria, Otros.
Vistas.	2D, 3D.
Tiempo.	Mostrar.
Manejo fácil.	Simplicidad de los elementos, Instructivo fácil de entender.
Menú de niveles.	Principiante, Intermedio, Avanzado.
Mover elementos.	Personas, Maquinaria, Estaciones de trabajo, Otros.
Opciones de animación.	Rápida, lenta.
Otros.	Acceso por Internet, Utilizar inteligencia artificial, Actualizar los procesos.
Procesos de empresas reales.	Manufactura, Servicios.
Desarrollar los conocimientos que los alumnos necesitan.	Mostrar las operaciones del proceso, materiales utilizados, tiempos de las operaciones, tiempo de ciclo, distancias, rutas de los recorridos, tiempos de ocio de trabajadores y maquinaria, tiempos de retrasos inevitables, dimensiones de los productos elaborados, costos de los materiales, automatización de los procesos, tiempos de mantenimiento, espacios libres en las plantas y permitir la eliminación, combinación o simplificación de operaciones

Cuantificación de la información

Las encuestas aplicadas a los consumidores permiten realizar análisis cualitativos y cuantitativos. Los análisis cuantitativos se realizan por medio de los diagramas L y la matriz L, dos tipos de diagramas indispensables para llevar a cabo este tipo de análisis. En el presente proyecto de tesis no se aplicaron herramientas de análisis cualitativos porque las prácticas reales ya tienen una definición y esa es la línea que se sigue con el laboratorio virtual.

El diagrama de matriz-L determina los distintos niveles de importancia de cada una de las demandas de los consumidores, según la frecuencia con que cada demanda es mencionada. Este valor o nivel de importancia debe establecerse del 1 al 5, siendo 5 el de mayor importancia.

Una vez que se obtuvieron las demandas de los clientes, se procedió a hacer otra encuesta para determinar el nivel de importancia de cada una.

Pareciera que el realizar otra encuesta después de haber realizado una, es una pérdida de tiempo (pudiéndose realizar las dos al mismo tiempo). La realidad es que después de obtener la primera información, se tiene que analizar y determinar cuáles son factibles, así podrán desecharse todas aquellas demandas que no sean posible de incluir. Además, algunas encuestas incluyen preguntas abiertas donde el encuestado puede escribir lo que quiera, lo cual aumenta la cantidad de información.

En la tabla 13 se muestran los datos del diagrama de matriz-L relativos a la importancia de las demandas del cliente.

Tabla 13. Diagrama de matriz-L.

Voz del cliente	⊙	●	△	◇	▽	Total
Imágenes	70	3	3			4.86
Sonidos	12	19	34	11		3.27
Vistas	30	21	19	6		3.97
Tiempo	19	19	30	8		3.7
Manejo fácil	42	18	14	2		4.3
Menú de niveles	30	21	14	10	1	3.89
Mover elementos	11	31	18	15	1	3.46
Opciones de animación	4	39	28	5		3.54
Otros	28	34	3	3	8	3.9
Procesos de empresas reales	43	23	9	1		4.4
Desarrollo de los conocimientos	31	15	15	7	8	3.68

SIMBOLOGÍA
⊙ Requerido fuertemente
● Requerido regularmente
△ Recomendado
◇ Indiferente
▽ No requerido

En la tabla 14 se muestra la matriz de la evaluación competitiva entre los laboratorios de ingeniería de métodos de la UABC, el laboratorio de ingeniería de métodos del ITM y el laboratorio virtual que estaba en proceso de desarrollo.

Tabla 14. Diagrama de matriz con las evaluaciones competitivas de tres laboratorios.

Voz del cliente	Puntuación por laboratorio		
	UABC	ITM	Laboratorio virtual*
Imágenes	5	5	4
Sonidos	5	5	0
Vistas	5	5	3
Tiempo	5	5	5
Manejo fácil	5	5	4
Menú de niveles	5	5	2
Mover elementos	5	5	2
Opciones de animación	5	5	5
Otros	5	5	3
Procesos de empresas reales	3.5	3.8	4
Desarrollo de conocimientos	3.8	4.9	4

* La evaluación del laboratorio virtual no se realizó mediante encuestas (aún no estaba construido). Las calificaciones mostradas fueron en base a juicio del programador del laboratorio virtual.

Establecimiento de los valores meta

El establecimiento de los valores meta se hizo mediante una combinación entre las posibilidades de los procesos y los intereses del consumidor o mercado. Las metas fijadas deben alcanzar o al menos disminuir la variabilidad entre lo que el cliente quiere y lo que se producirá. El valor meta se estableció a partir de los resultados de la evaluación competitiva.

La tabla 15 muestra los valores meta del laboratorio virtual.

Tabla 15. Valores meta del laboratorio virtual.

Voz del cliente	Valor meta
Imágenes	4
Sonidos	0
Vistas	3
Tiempo	5
Manejo fácil	4
Menú de niveles	2
Mover elementos	2
Opciones de animación	5
Otros	3
Procesos de empresas reales	4.9
Desarrollo de conocimientos	4.9

Establecimiento de puntos de venta

El punto de venta muestra, vía un símbolo determinado, que la demanda analizada es precisamente un atributo por el que se vende el producto o servicio, esto es, algo que afecta en mayor medida al consumidor cuando elige un producto o servicio determinado.

Los puntos de venta determinados para el laboratorio virtual son: Tiempo, Procesos de empresas reales y Desarrollo de los conocimientos de los alumnos. Esto se integrará al gráfico de calidad.

Establecimiento del *ratio* de mejoramiento

El *ratio* de mejoramiento señala el índice que permite al equipo QFD conocer el grado necesario de mejoramiento que se necesita alcanzar para llegar a la meta propuesta en poco tiempo. Éste se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Ratio de mejoramiento} = \frac{\text{Meta}}{\text{Evaluación competitiva}}$$

De acuerdo con la experiencia de investigaciones realizadas en grandes compañías, es recomendable que el ratio de mejoramiento esté en el intervalo [1-1.5], entendiéndose que cuando el valor es 1, la meta es igual al valor obtenido en la evaluación competitiva. Si el

valor de la meta es 1, según Quesada (1997), deben continuarse los trabajos en las demandas, pero la distribución de recursos en otras áreas, donde aún existe amplio espacio de mejoramiento, es imprescindible. En caso de que el valor meta sea mayor a 1.5, es necesario establecer una nueva meta a corto plazo. Si el valor del ratio de mejoramiento llega a exceder el valor tope (1.5), significa que la meta establecida es superior al valor actual, por lo que no es recomendable considerarla como una meta a corto plazo.

En la tabla 16 se muestra el ratio de mejoramiento para cada una de las demandas del laboratorio virtual de ingeniería de métodos.

Tabla 16. Ratio de mejoramiento de las demandas del consumidor.

Voz del cliente	Ratio de mejoramiento
Imágenes	4/4 = 1
Sonidos	0/0 = 0
Vistas	3/3 = 1
Tiempo	5/5 = 1
Manejo fácil	4/4 = 1
Menú de niveles	2/2 = 1
Mover elementos	2/2 = 1
Opciones de animación	5/5 = 1
Otros	3/3 = 1
Procesos de empresas reales	4.9/4 = 1.22
Desarrollo de conocimientos	4.9/4 = 1.22

Establecimiento del peso de la fila

La determinación del peso de la fila permite reforzar las decisiones tomadas luego de examinar toda la matriz y luego de haber llegado a varias conclusiones. No deben considerarse los valores calculados en el peso de la fila como base para asignar prioridades en las demandas, pues se incurriría en un error, porque este valor sólo es un soporte para la decisión que ha sido tomada al considerar otros factores. La fórmula para calcular el peso de la fila es:

$$\text{Peso de la fila} = \text{Nivel de importancia} \times \text{Ratio de mejoramiento} \times \text{Punto de venta}$$

donde punto de venta = 1.2

Los valores del peso de la fila para nuestro gráfico de calidad se muestran en la tabla 17.

Tabla 17. Peso de la fila del gráfico de calidad.

Voz del cliente	Peso de la fila
Imágenes	(4.86)(1) = 4.86
Sonidos	(3.27)(0) = 0
Vistas	(3.97)(1) = 3.97
Tiempo	(3.7)(1)(1.2) = 4.44
Manejo fácil	(4.3)(1) = 4.3
Menú de niveles	(3.89)(1) = 3.89

Tabla 17 (continuación).

Voz del cliente	Peso de la fila
Mover elementos	$(3.46)(1) = 3.46$
Opciones de animación	$(3.54)(1) = 3.54$
Otros	$(3.9)(1) = 3.9$
Procesos de empresas reales	$(4.4)(1.22)(1.2) = 6.44$
Desarrollo de conocimientos	$(3.68)(1.22)(1.2) = 5.38$

Delimitación del tipo de acción que realizará la empresa para cada demanda que debe mejorarse

Es importante anotar que las filas que no realizan ninguna acción indican que esa demanda cumple con las expectativas de los clientes y, por ende, debe de continuar su mejoramiento, aunque dando prioridad a los productos o servicios que no satisfacen totalmente a los clientes. Para definir el tipo de acción a seguir, deben considerarse los niveles de importancia de las demandas, las quejas de los clientes y la evaluación competitiva obtenida con anterioridad.

En la mayoría de las demandas del cliente, el laboratorio virtual no es competencia para los laboratorios físicos, de ahí que los esfuerzos para siquiera igualar las características de los laboratorios físicos sean en vano. Sin embargo, sí se pueden mejorar muchas de las características del laboratorio virtual de manera que sean más competitivas. Específicamente, hay que buscar nuevas ideas para mejorar las vistas, el manejo fácil, el menú de niveles, los procesos de empresas reales, el desarrollo de los conocimientos de los alumnos y otros.

Establecimiento de relaciones entre las demandas del consumidor

Hay que establecer las correlaciones a fin de observar las dependencias que hay entre las demandas del consumidor: ellas ayudarán a que los requerimientos técnicos sean corregidos. Este procedimiento ya se incluyó en nuestra aplicación del QFD, y está representado por los símbolos ubicados en el techo horizontal del costado izquierdo de la “casa de la calidad”.

Establecimiento de la dirección de mejoramiento de cada requerimiento técnico

La dirección de mejoramiento es la forma en que deben enfocarse las mejoras. Por ejemplo, si es necesario trabajar en la capacitación del personal, el mejoramiento reflejará el grado de aumento en la capacitación (flecha hacia arriba). Por el contrario, para beneficiar a los clientes debe trabajarse en la disminución del tiempo de servicio (flecha hacia abajo). Sin embargo, existen algunos requerimientos que deben llegar a una meta previamente establecida y mantenerse en ella, este tipo de requerimientos se identifica con el símbolo de un círculo. Aquellos que tengan un símbolo de flecha combinado con un círculo, deben lograr una meta y, en caso de tener que realizar alguna variación, ésta será en el sentido que la flecha indique. Varios de estos símbolos se presentan en nuestro gráfico de calidad (“casa de la calidad”).

Establecimiento de correlación entre los requerimientos técnicos

La correlación de los requerimientos técnicos puede ser fuerte positiva, positiva débil, fuerte negativa o negativa débil. Podrá ocurrir, por ejemplo, que en una correlación se obtuvieran relaciones negativas; de ser así ello indicaría que si se trabajara en un requerimiento podría afectarse en forma negativa a otro.

La correlación entre los requerimientos técnicos se muestra en el “techo” del gráfico de calidad.

Establecimiento del peso de la columna

La determinación del peso de la columna es un paso similar a la determinación del peso de la fila; no obstante, el peso de la columna permite reforzar decisiones tomadas con antelación sobre las prioridades asignadas a los diferentes requerimientos. Sin embargo, como se mencionó en el caso del peso de la fila, éstos no son los únicos que determinan las decisiones. Para calcular el peso de la columna debe utilizarse la siguiente fórmula:

$$\text{Peso de la columna} = \left(\sum_{i=1}^n \text{nivel de importancia} \times \text{peso de la relación} \right) / 10$$

donde

n = número de requerimientos del consumidor.

peso de la relación = si la relación entre el requerimiento técnico y la demanda del consumidor es fuerte, se representará con el valor 9; si es moderada tendrá valor 3 y si es débil su valor será 1.

En la tabla 18 se muestran los distintos pesos de las columnas en nuestro gráfico de calidad.

Tabla 18. Peso de las columnas del gráfico de calidad.

Columna	Peso	Columna	Peso
Estaciones de trabajo	20.42	Retrasos inevitables	10.6
Maquinaria	18.9	Acceso por Internet	3.88
Manufactura	13	Inteligencia artificial	7.73
Operaciones del proceso	23	Actualización de los procesos	6.82
Mantenimiento	11.4	2D	12.6
Materiales	15.95	3D	15.2
Espacios libres	15.95	Sin animación	1.43
Automatización	16.34	Rápido	4.29
Simplificación de operaciones	15.3	Lento	4.29
Principiante	11.04	Personas	6.09
Intermedio	8.46	Construcciones	8.73
Avanzado	7.59	Instructivo	4.13
Dimensiones del producto	8.73	Ocio	10.6

Tabla 18 (continuación).

Columna	Peso	Columna	Peso
Distancias	18.75	Servicios	11.64
Costos	7.27		
Rutas de los recorridos	17.77		

Requerimientos finales

A continuación se muestran los requerimientos fundamentales del laboratorio virtual, determinados con la aplicación del QFD:

1. Estaciones de trabajo

Las estaciones de trabajo son los lugares donde se realizan las acciones para lograr el producto. Siete de las once demandas de los clientes se ven afectadas por las estaciones de trabajo. Tres de estas son puntos de venta. El peso de la columna de las estaciones de trabajo es grande. Desgraciadamente, tiene una relación negativa con la opción de “sin animación”, por lo que si logramos algo, estaríamos afectando negativamente al otro requerimiento técnico. Por otro lado, tiene correlación con muchos de los otros requerimientos técnicos.

Dos de las demandas del cliente que tienen relación con las estaciones de trabajo presentan un ratio de mejoramiento grande, por lo que se tienen que enfocar los esfuerzos en mejorar tales aspectos.

El cliente siempre quiere lo mejor, y la mejor forma de mostrar las estaciones de trabajo es representarlas lo más apegadas a la realidad posible (animación, imágenes, movimientos, etcétera). Desafortunadamente *ProModel* tiene sus limitantes, de manera que si se incluyera todo lo que el cliente quiere (visualmente), afectaría en los resultados de salida. Las estaciones de trabajo (en el laboratorio virtual) se representan por mesas.

2. Operaciones del proceso

Las operaciones del proceso son las acciones que se realizan en la transformación del producto. En la materia de ingeniería de métodos lo que mayormente se aprende es la construcción de distintas gráficas, es por eso que en nuestro estudio este requerimiento técnico obtuvo el mayor peso de columna. De las siete relaciones entre las demandas del cliente y el requerimiento técnico, seis son relaciones fuertes, la otra es una relación moderada; además, el elemento demandado de mayor importancia para el cliente tiene una relación fuerte con este requerimiento técnico.

Por otro lado, este requerimiento técnico es el que más correlaciones negativas tiene (3 en total), estos requerimientos son: sin animación, animación rápida y personas. Afortunadamente se cuenta con la opción para determinar la velocidad de animación; el problema es que el cliente quiere que se vea claramente cómo es que las personas (o máquinas) realizan las operaciones. El laboratorio virtual presenta las operaciones del proceso en forma de textos e imágenes.

3. Rutas de los recorridos

El cliente desea ver cómo es que se trasladan los elementos del laboratorio virtual. Este requerimiento tiene un buen peso de columna (18) y al igual que los anteriores requerimientos técnicos, tiene una relación con las 3 filas de mayor peso. En *ProModel* el establecer rutas presenta algunos problemas con los resultados de salida, por lo que se tuvo un especial cuidado al momento de mostrar las animaciones de traslado.

4. Vista en tercera dimensión

El cliente quiere ver las prácticas de laboratorio en tres dimensiones. El peso de la columna de este requerimiento no es muy alto (15), sin embargo, tal dato no es definitivo para determinar la importancia del requerimiento técnico. Tenemos una relación con sólo dos de los tres puntos de venta, pero una relación fuerte con las tres filas de mayor peso.

La licencia de *ProModel* en la UABC no dispone del módulo para hacer figuras tridimensionales, por lo que no se pueden modificar las perspectivas de los modelos.

No se incluye la opción tridimensional en el laboratorio virtual, sin embargo, las imágenes son importadas de AutoCAD, de manera que no se verá todo “plano”.

Finalmente, de las once demandas de los clientes, se tienen seis donde se pueden buscar ideas para mejorar. Tales demandas son:

1. Vistas.
2. Manejo fácil.
3. Menú de niveles.
4. Otros.
5. Procesos de empresas reales.
6. Desarrollo de los conocimientos de los alumnos.

En cuatro de las demandas anteriores el laboratorio virtual está en un nivel muy bajo, pero con el paso del tiempo se buscarán opciones de mejora.

La figura 48 muestra el gráfico de calidad (“casa de la calidad”) que se construyó incluyendo toda la información recopilada con la aplicación del QFD.

3.3.5 Características requeridas de cada práctica

La tabla 19 muestra las características óptimas que deben tener cada una de las prácticas.

Tabla 19. Características óptimas de cada práctica.

Nombre de la práctica.	Características óptimas.
Prácticas 1 y 2.	Mostrar operaciones de proceso.
	Mostrar materiales utilizados.
	Mostrar los tiempos de las operaciones.
	Mostrar componentes de los ensambles y sub ensambles.
	Mostrar el tiempo de ciclo.
Prácticas 3 y 4.	Mostrar operaciones de proceso.
	Mostrar materiales utilizados.
	Mostrar los tiempos de las operaciones.
	Mostrar componentes de los ensambles y sub ensambles.
	Mostrar el tiempo de ciclo.
	Mostrar distancias.
Práctica 5.	Mostrar tiempos.
	Mostrar distancias.
	Mostrar distintas rutas.
Prácticas 6 y 7.	Mostrar tiempos.
	Mostrar movimientos.
	Mostrar materiales.
Práctica 8.	Mostrar tiempos.
	Mostrar maquinaria.
	Mostrar operaciones del proceso.
	Mostrar materiales.
Práctica 9.	Mostrar tiempos.
	Mostrar maquinaria
	Mostrar operaciones del proceso.
	Mostrar materiales.

3.4 Simulación de las prácticas del laboratorio virtual

3.4.1 Formulación del problema del estudio de simulación

Cada estudio debe empezar con un enunciado claro de los objetivos y asuntos específicos que serán tratados. Los diseños de los sistemas alternativos que serán estudiados deben ser delineados (si es posible), y se deben de establecer los criterios para evaluar la eficacia de estas alternativas.

Establecer objetivos del estudio

Elaborar un laboratorio virtual que simule las prácticas de laboratorio de ingeniería de métodos.

Cada una de las prácticas virtuales se enfoca en uno de los siguientes temas de la materia de ingeniería de métodos:

1. Diagrama de operaciones de proceso.
2. Diagrama de flujo de proceso.
3. Diagrama de recorrido.
4. Diagrama bimanual.
5. Diagrama hombre-máquina.
6. Análisis de operaciones.

Delinear las posibles alternativas de solución

Lo que se realizó en la presente tesis no es un ejercicio de optimización, sino la representación de las prácticas de laboratorio. Por lo tanto, no se tienen posibles alternativas de solución.

Establecer los criterios de evaluación

Las medidas de rendimiento necesarias para describir el desempeño del laboratorio virtual son:

- Elaboración de diagramas utilizados en ingeniería de métodos.
- Presentación de tiempos y operaciones en los reportes de resultados.
- Presentación de alternativas.
- Facilidad de uso.

3.4.2 Construcción del modelo conceptual

Recolección de los datos

Los modelos de simulación tienen entradas (como tiempos entre arribos o demandas) las cuales son variables aleatorias, debido a eso, debemos especificar las distribuciones de probabilidad de esas entradas.

Dado que las variables aleatorias de entrada al modelo siguen una distribución en particular, la simulación debe proceder a generar valores para esas variables de entrada que sigan la distribución adecuada.

Para identificar el comportamiento aleatorio de las entradas, debemos recolectar datos de las variables de interés.

La técnica de muestreo utilizada en la recolección de datos para esta tesis, se puede aplicar en cualquier estudio, se deriva de la fórmula de obtención de intervalos de confianza para muestras pequeñas, y consta de los siguientes pasos:

1. Realizar un muestreo piloto

Después de realizar el muestreo piloto, se obtuvo la media (\bar{x}) y la desviación estándar (s) de cada una de las operaciones incluidas en las prácticas del laboratorio virtual.

2. Establecer la significancia de la prueba (α)

Se eligió una significancia de 0.05 porque es la más utilizada.

3. Establecer el error de muestreo

El error de muestreo se obtiene multiplicando el porcentaje de error del muestreo por la media. Se decidió tomar un porcentaje de error de muestreo del 10% debido a que los valores no son muy críticos.

4. Calcular el número de muestras necesarias para el componente aleatorio

Para calcular el número de muestras necesarias, se aplica la siguiente fórmula:

$$n = \left(\frac{t_{\alpha/2} s}{e} \right)^2$$

donde

n = número de muestras necesarias.

$t_{\alpha/2}$ = valor en tablas de la distribución t .

s = desviación estándar de la muestra.

e = error de muestreo.

Cuando se obtiene un número mayor a las muestras realizadas, se recopilan las $n-n_0$ muestras restantes.

En el anexo 2 se muestra una tabla con toda la información obtenida al aplicar la técnica de muestreo en el presente trabajo de tesis. Puede observarse que existe muy poca variación en los datos, por eso es que no se necesitó recopilar más muestras de las que se tenían.

Una vez obtenidos los datos, existen dos formas generales para especificar una distribución:

1. Técnicas estándares de inferencia estadística, que comparan una distribución teórica con los datos recolectados mediante una prueba de hipótesis.

- Los valores de los datos son utilizados para definir una distribución empírica, sin compararla con ninguna distribución teórica común. Entonces, en la simulación, usamos directamente los datos de la distribución empírica.

La forma 2 se utiliza cuando no se puede encontrar una distribución teórica que se ajuste a los datos de entrada. Sin embargo, la forma 1 debe utilizarse siempre que sea posible.

En el presente trabajo de tesis se utilizó una aplicación de *ProModel* la cual se llama *Stat:fit*; ésta proporciona la(s) distribución(es) de probabilidad que más se ajuste(n) a la serie de datos proporcionados. Las distribuciones obtenidas se muestran en cada tabla de los componentes aleatorios de cada práctica.

3.4.3 Modelación de las prácticas del laboratorio virtual

A continuación se presenta la modelación de cinco (de un total de nueve) prácticas contenidas en el laboratorio virtual.

Práctica # 1

La tabla 20 muestra los datos de los componentes aleatorios del sistema.

Tabla 20. Componentes aleatorios de la práctica 1.

Actividad	Distribución ajustada (seg)
Aserrado aproximado de patas	B(1.15, 1.92, 1., 1.7)
Unión de dos patas	6.+W(1.68, 2.16)
Cepillado de patas	B(1.89, 1., 18., 24.9)
Aserrado definitivo de patas	W(6.55, 1.19)
Inspección de patas	U(14.8, 1.75)
Lijado de patas	15.+W(2., 2.08)
Aserrado aproximado de bastidores	2.+W(2.99, 1.39)
Unión de dos bastidores	7.+W(2.56, 1.97)
Cepillado de bastidores	17.+5.97*(1./(1.+EXP(-(N(0.,1.)--0.117)/0.556)))
Aserrado definitivo de bastidores	W(6.28, 1.16)
Inspección de bastidores	B(2.22, 2.08, 7., 12.3)
Lijado de bastidores	B(1.54, 1.71, 15., 17.5)
Aserrado aproximado de cubiertas	10.+ER(1.82, 3.)
Unión de dos cubiertas	8.+3.58*(1./(1.+EXP(-(N(0.,1.)-5.9e-002)/0.59)))
Cepillado de cubiertas	20.+W(2.53, 3.07)
Aserrado definitivo de cubiertas	3.+W(2., 0.91)
Inspección de cubiertas	15.+4.86*(1./(1.+EXP(-(N(0.,1.)-0.137)/0.686)))
Lijado de cubiertas	29.+4.53*(1./(1.+EXP(-(N(0.,1.)--4.79e-002)/0.524)))
Ensamblado de los 4 bastidores	B(0.819, 0.853, 44., 49.7)
Ensamblado de las 4 patas	T(46., 52.5, 52.7)
Inspección completa	24.+ER(1.75, 5.)
Aplicación de barniz	61.+ER(5.04, 2.)

Tabla 20 (continuación).

Lijado por completo	B(1.37, 1.,73., 80.2)
Aplicación de capa de laca	B(1.33, 1.91, 65., 79.4)
Inspección final	45.+W(1.57, 2.67)

Entidades

La tabla 21 muestra las entidades de la práctica.

Tabla 21. Entidades de la práctica 1.

Barrote para patas	Dos bastidores unidos	Cubierta aserrada def
Pata para mesa	Bastidor cepillado	Cubierta lijada
Unión de dos patas	Bastidor aserrado def	Cubierta y bastidores
Pata cepillada	Bastidor lijado	Cubierta y patas
Pata aserrada def	Tabla para cubierta	Mesa barnizada
Pata lijada	Cubierta	Mesa lijada
Barrote para bastidores	Dos cubiertas unidas	Mesa con laca
Bastidor	Cubierta cepillada	

Recursos

La tabla 22 nos muestra los recursos que se emplean en la práctica 1.

Tabla 22. Recursos de la práctica 1.

Machinist	Machinist6	Machinist11	Machinist20	Machinist26
Machinist2	Machinist7	Machinist12	Machinist22	Machinist27
Machinist3	Machinist8	Machinist17	Machinist23	
Machinist4	Machinist9	Machinist18	Machinist24	
Machinist5	Machinist10	Machinist19	Machinist25	

Locaciones

La tabla 23 nos muestra las locaciones de la práctica 1.

Tabla 23. Locaciones de la práctica 1.

Llegada de barrotos	Aserrado definitivo de cubiertas
Aserrado aproximado de barrotos	Inspección de cubiertas
Unión de las orillas de dos patas	Lijado de cubiertas
Cepillado de patas	Contenedor de patas
Aserrado definitivo de patas	Contenedor de bastidores
Inspección de patas	Ensamblado de bastidores y cubierta
Lijado de patas	Ensamblado de patas

Tabla 23 (continuación).

Llegada_de_barrotes_para_bastidores	Inspección_de_mesa_antes_de_barniz_y_laca
Aserrado_aproximado_de_bastidores	Barnizado_de_mesa
Unión_de_las_orillas_de_dos_bastidores	Lijado_de_mesa
Cepillado_de_bastidores	Aplicación_de_laca
Aserrado_definitivo_de_bastidores	Inspección_final
Inspección_de_bastidores	Cubiertas_cepilladas_en_espera
Lijado_de_bastidores	Cubiertas_aserradas_def_en_espera
Llegada_tablas_cubierta	Cubiertas_inspeccionadas_en_espera
Aserrado_aproximado_de_tablas_para_cubierta	Cubiertas_lijadas_en_espera
Unión_de_las_orillas_de_dos_cubiertas	Cubiertas_con_bastidores_en_espera
Cepillado_de_cubiertas	Mesas_en_espera
Mesas_inspeccionadas_en_espera	Mesas_barnizadas_en_espera
Mesas_lijadas_en_espera	Mesas_pintadas_en_espera
Producto_terminado	Cubiertas_en_espera
Bastidores_aserrados_en_espera	Bastidores_cepillados_en_espera
Bastidores_aserrados_def_en_espera	Bastidores_inspeccionados_en_espera
Patas_aserradas_en_espera	Patas_cepilladas_en_espera
Patas_aserradas_def_en_espera	Patas_inspeccionadas_en_espera
Conveyor_de_bastidores	Conveyor_de_patas
Lugar_de_bastidores	Lugar_de_patas

Descripción del modelo

En una fábrica de mesas para teléfono se tienen tres líneas de trabajo.

En la primera línea se procesan las patas (4 por mesa). En la primera operación se cortan los barrotes al largo aproximado; en la siguiente estación se unen las dos orillas de dos patas y se cepillan a la medida, después se corta el largo definitivo, se verifican dimensiones y se realiza un lijado final. Lo siguiente es ensamblar las patas, los bastidores y la cubierta.

En la segunda línea se procesan los bastidores. Lo primero que se hace es cortar los barrotes al largo aproximado, en la siguiente estación se unen las orillas de dos bastidores y se cepillan; en la siguiente estación se corta el largo definitivo, se somete todo a una inspección y se realiza un lijado final.

En la tercera línea se procesa la cubierta. Primero se corta el largo aproximado, luego se unen ambos extremos, se cepillan a la medida, se corta el largo definitivo, se verifican las dimensiones y se realiza un lijado final.

La siguiente operación (donde se juntan las tres líneas de trabajo) es ensamblar los 4 bastidores y la cubierta, enseguida se ensamblan las patas completas al ensamble anterior. Después hay una inspección completa, se aplica una capa de barniz, se lija por completo, se aplica una capa de laca y se realiza la inspección final.

Tipo de sistema: Terminante.

Período de observación del sistema: 8 horas de trabajo.

Condiciones iniciales del sistema: Ninguna.

En el anexo 3 se muestra la imagen de la práctica 1. El diagrama de flujo se muestra en el anexo 4.

Práctica # 2

La tabla 24 muestra los datos de los componentes aleatorios del sistema.

Tabla 24. Componentes aleatorios de la práctica 2.

Actividad	Distribución ajustada (seg)
Ensamblar asientos	T(1., 4.54, 5.06)
Ensamblar carrocería	B(1.51, 1.82, 4., 7.)
Ensamblar cofre	6.+W(2.01, 1.74)
Ensamblar motor	B(1.04, 1., 9., 12.9)
Ensamblar defensa delantera	$10.+4.35*(1./(1.+EXP(-(N(0.,1.)--0.159)/0.791)))$
Ensamblar defensa trasera	10.+W(2.78, 2.47)
Inspeccionar carrocería	$5.+3.95*(1./(1.+EXP(-(N(0.,1.)--0.101)/0.634)))$
Ensamblar eje trasero a chasis	$15.+5.84*(1./(1.+EXP(-(N(0.,1.)--0.151)/0.842)))$
Ensamblar eje delantero a chasis	10.+W(2.43, 2.13)
Tiempo de inspección final	$9.+4.61*(1./(1.+EXP(-(N(0.,1.)--0.313)/0.473)))$
Ensamblar centro del rin	B(2.77, 1.98, 1., 2.)
Ensamblar la otra mitad del rin	B(1.57, 1.96, 1., 2.9)
Ensamblar neumático	B(1.04, 1., 9., 19.5)
Ensamblar llanta a eje	B(0.969, 1., 7., 9.9)
Tiempo de inspección de eje	4.+W(2.71, 2.31)

Entidades

La tabla 25 muestra las entidades de la práctica 2.

Tabla 25. Entidades de la práctica 2.

Chasis	Asientos
Asientos ensamblados	Carroceria ensamblada
Carroceria	cofre ensamblado
Motor ensamblado	Defensa delantera ensamblada
Defensa trasera ensamblada	Eje trasero ensamblado
Carro completo	Cofre

Tabla 25 (continuación).

Defensa delantera	Defensa delantera y tornillo
Defensa trasera y tornillo	Tornillo defensa delantera
Defensa trasera	Tornillo defensa trasera
Mitad del rin1	Mitad del rin2
Mitad del rin3	Mitad del rin4
Centro 1	Centro 2
Centro 3	Centro 4
Otra mitad del rin1	Otra mitad del rin2
Otra mitad del rin3	Otra mitad del rin4
Neumatico 1	Neumatico 2
Neumatico 3	Neumatico 4
Rin y centro 1	Rin y centro 2
Rin y centro 3	Rin y centro 4
Rin completo 1	Rin completo 2
Rin completo 3	Rin completo 4
Llanta completa 1	Llanta completa 2
Llanta completa 3	Llanta completa 4
Eje trasero con llantas	Eje delantero con llantas
Eje trasero	Eje delantero
Motor	Tornillo eje trasero
Tornillo eje delantero	

Recursos

La tabla 26 muestra los recursos de la práctica.

Tabla 26. Recursos de la práctica 2.

Machinist 2	Machinist 11	Machinist 20
Machinist 3	Machinist 12	Machinist 21
Machinist 4	Machinist 13	Machinist 22
Machinist 5	Machinist 14	Machinist 23
Machinist 6	Machinist 15	Machinist 24
Machinist 7	Machinist 16	Machinist 25
Machinist 8	Machinist 17	Machinist 26
Machinist 9	Machinist 18	Machinist 27
Machinist_10	Machinist_19	

Locaciones

La tabla 27 muestra las locaciones de la práctica.

Tabla 27. Locaciones de la práctica 2.

Inicio mitad de la rueda 1	Ensamblado del centro línea 1
Inicio centro 1	Ensamblado de la otra mitad de la rueda 1

Tabla 27 (continuación).

Inicio otra mitad de la rueda 1	Ensamblado de neumático 1
Inicio neumático 1	Ensamblado de llantas a eje trasero
Inicio mitad de la rueda 2	Ensamblado del centro línea 2
Ensamblado_de_la_otra_mitad_de_la_rueda 2	Ensamblado_de_neumático_2
Inicio centro 2	Inicio otra mitad de la rueda 2
Inicio neumático 2	Inicio de chasis
Ensamblado de asientos	Inicio de asientos
Ensamblado de carrocería	Inicio de carrocería
Ensamblado de cofre	Inicio de cofre
Ensamblado de motor	Inicio de motor
Ensamblado de defensa delantera	Inicio de defensa delantera
Inicio_de_tornillo_defensa_delanter a	Ensamblado_de_defensa_trasera
Inicio de defensa trasera	Inicio de tornillo defensa trasera
Inspección de carrocería	Ensamblado de eje trasero
Inicio tornillo eje trasero	Espera tornillo eje trasero
Inspección de eje trasero	Espera del eje trasero
Inicio mitad de la rueda 3	Ensamblado del centro línea 3
Inicio_centro_3	Ensamblado_de_la_otra_mitad_de_la_rueda 3
Inicio otra mitad de la rueda 3	Ensamblado de neumático 3
Inicio_de_neumático_3	Ensamblado_de_llantas_a_eje_delante ro
Inicio mitad de la rueda 4	Ensamblado del centro línea 4
Inicio_centro_4	Ensamblado_de_la_otra_mitad_de_la_rueda 4
Inicio otra mitad de la rueda 4	Ensamblado de neumático 4
Inicio neumático 4	Inspección eje delantero
Ensamblado eje delantero	Inicio tornillo eje delantero
Espera eje delantero	Inspección final
Producto terminado	Contenedor eje trasero
Contenedor eje delantero	Espera a la carrocería
Espera al resto del auto	Espera del tornillo eje delantero
Espera de llanta 2	Espera de llanta 1
Espera de llanta 3	Espera de llanta 4
Espera_del_eje_trasero_y_su_tornill o	Espera_del_eje_delantero_y_su_torni llo

Descripción del modelo

En el proceso de ensamblado de un carrito de juguete se tienen cinco líneas de ensamble.

Cada una de las llantas consta de cuatro componentes (dos mitades del rin, un centro y el neumático) los cuales se ensamblan en una mesa de trabajo cada uno. Después de ensamblar las llantas a los ejes, son inspeccionadas para después pasar a un contenedor y esperar a ser ensamblados al resto del auto. En la línea central se ensambla el resto de la carrocería. La carrocería está formada por nueve componentes los cuales se ensamblan uno por uno. En una determinada estación de trabajo se ensamblan los ejes al resto del auto para después ser inspeccionados y llevados hacia el área de producto terminado.

Tipo de sistema: Terminante.

Período de observación del sistema: 8 horas.

Condiciones iniciales del sistema: Ninguna.

En el anexo 5 se muestra la imagen de la práctica 2. El diagrama de flujo se muestra en el anexo 6.

Práctica # 3

La tabla 28 muestra los datos de los componentes aleatorios del sistema.

Tabla 28. Componentes aleatorios de la práctica 3.

Actividad	Distribución ajustada (seg)
Entrar o salir del automóvil	1.+W(3.89, 1.56)
Tocar timbre	$0.376 * (1. / ((1. / U(0.5, 0.5)) - 1.)) ** (1. / 5.48)$
Espera a entrar	10.+G(1.36, 2.)
Desconectar tanque de la unidad	T(18., 21.8, 23.1)
Inspección de abolladuras	B(0.893, 1., 75., 79.8)
Limpieza del tanque	T(135, 141, 141)
Colocación de tanque	3.+W(2., 1.84)
Conexión de máquina	B(1.54, 1., 10., 14.9)
Abrir válvula	B(1.36, 1., 13., 15.9)
Llenar tanque	B(1.34, 1.2, 725, 830)
Inspección de humidificador	30.+L(1.95, 1.45)
Inspección de presión	11.+W(2., 1.57)
Inspección de contenido	B(1.65, 1.99, 11., 13.9)
Conexión de tanque	60.+W(2.4, 3.71)
Inspección de humidificador en unidad	45.+G(1.19, 2.)
Espera a paciente	T(123, 126, 128)
Instalación de nueva cánula	150+ER(4.94, 4.)
Verificación de flujo	B(1.9, 1.78, 134, 141)
Fijación de etiqueta	B(1.74, 1.39, 61., 65.5)

Entidades

La tabla 29 muestra las entidades de la práctica 3.

Tabla 29. Entidades de la práctica 3.

Mano de la enfermera	Tanque de oxígeno
Tanque vacío	Tanque lleno
Cánula	Canula usada
Etiqueta	Tanque para llevar al paciente
Cánula en mano	Etiqueta en mano

Recurso

Enfermera.

Locaciones

La tabla 30 nos muestra las locaciones de la práctica.

Tabla 30. Locaciones de la práctica 3.

Espera_del_llenado_de_tanque	Colocación_de_tanque_en_dispositivo del vehículo
Inspección_de_humidificador	Conexión de máquina
Abrir_válvula_de_tanque	Inspección de presión
Inspección_de_contenido_del_tanque	Entrada o salida del automóvil
Timbre	Abrir puerta
Conexión_o_desconexión_de_tanque_en_la unidad del paciente	Inspección_de_abolladuras_o_grietas
Limpieza_de_tanque	Verificación_de_humidificador_en_la unidad del paciente
Fijación_de_etiqueta_con_fecha_de_inspección	Espera_para_instalar_nueva_cánula
Instalación_de_nueva_cánula	Verificación_de_flujo_del_tanque_con el paciente
Paciente	Cesto de basura
Llegada de etiqueta	Llegada de cánula
Lugar del tanque de oxígeno	Espera a que abran la puerta

Descripción del modelo

Para inspeccionar un tanque de oxígeno LUX en la casa de un paciente, una enfermera realiza lo siguiente:

Primero se traslada hacia la casa del paciente. Al llegar, baja del automóvil, camina hacia la puerta y toca el timbre. Después de esperar a que abran la puerta, entra a la casa, se dirige hasta donde está el tanque, lo desconecta, lo traslada hacia una mesa para revisar si tiene abolladuras, grietas o algún otro defecto; enseguida limpia el tanque, lo transporta hacia el automóvil (ambulancia), lo conecta a un dispositivo y lo llena de oxígeno.

Después de que el tanque está lleno, la enfermera verifica que el humidificador funcione bien y tanto la presión como el contenido sean los correctos; transporta el tanque hacia donde se encuentra el paciente, lo conecta, verifica el funcionamiento del humidificador, retira la cánula (máscara) usada e instala una nueva cánula al paciente; verifica el flujo, coloca una etiqueta con fecha de inspección y caducidad, regresa al vehículo y se retira.

Tipo de sistema: Terminante.

Período de observación del sistema: Un ciclo.

Condiciones iniciales del sistema: Ninguna.

En el anexo 7 se muestra la imagen de la práctica 3. El diagrama de flujo se muestra en el anexo 8.

Práctica # 4

La tabla 31 muestra los datos de los componentes aleatorios del sistema.

Tabla 31. Componentes aleatorios de la práctica 4.

Actividad	Distribución ajustada (seg)
Inspección de piezas	$B(1.6, 1.27, 12., 18.6)$
Ensamblar parte negra 1	$4+2.46*(1/(1+EXP(-(N(0.,1.)-0.289)/0.979)))$
Inspecciones cortas	$B(1.26, 1., 1., 2.91)$
Ensamblar parte negra 2	$T(9., 12., 13.3)$
Ensamblar horquilla trasera	$4.+W(2., 1.06)$
Ensamblar tornillo de la horquilla trasera	$T(7., 8.46, 9.72)$
Apretar tornillos	$B(1.25, 1., 3., 4.91)$
Ensamblar orificio para manubrios	$1.+ER(1.03, 3.)$
Ensamblar tornillo orificio manubrios	$7.+W(2., 2.38)$
Inspecciones largas	$4.+W(1.67, 1.26)$
Ensamblar manubrios	$T(3., 3.39, 5.15)$
Ensamblar horquilla delantera	$2+1.91*(1/(1+EXP(-(N(0.,1.)-.277)/.582)))$
Ensamblar guardafango	$5.+W(1.25, 1.23)$
Ensamblar llanta delantera	$B(1.69, 1., 1., 2.91)$
Ensamblar tornillo llanta delantera	$U(6.95, 0.95)$
Ensamblar asiento	$1.+W(2., 1.11)$
Ensamblar escape	$T(7., 11.8, 12.1)$
Ensamblar parabrisas	$T(10., 13.8, 14.)$
Ensamblar cubierta inferior	$3.+W(2.38, 1.08)$
Ensamblar llanta trasera	$T(2., 3.86, 3.97)$
Ensamblar tornillo llanta trasera	$4.+W(2.56, 1.84)$
Tiempo de inspección final	$U(14.4, 1.45)$

Entidades

La tabla 32 muestra las entidades de la práctica 4.

Tabla 32. Entidades de la práctica 4.

Motor	Parte negra 1
Parte negra 2	Horquilla trasera
Tornillo horquilla trasera	Comp tornillo horquilla trasera
Orificio de manubrios	Tornillo orificio de manubrios
Comp tornillo orificio de manubrios	Manubrios
Horquilla delantera	Guardafango

Tabla 32 (continuación).

Llanta delantera	Tornillo llanta delantera
Comp tornillo llanta delantera	Asiento
Escape	Parabrisas
Cubierta inferior	Llanta trasera
Tornillo llanta trasera	Comp tornillo llanta trasera
Cruceta	Moto completa
Solicitud de préstamo	

Recursos

1. Estudiante.
2. Encargada_almacén.

Locaciones

La tabla 33 muestra las locaciones de la práctica.

Tabla 33. Locaciones de la práctica 4.

Ventanilla almacén	Estante
Entrada al lab ing de métodos	Inicio de motor
Ensamblado parte negra 1	Inspección ensamblado parte negra 1
Ensamblado parte negra 2	Inspección ensamblado parte negra 2
Ensamblado horquilla trasera	Ensamblado de tornillo horquilla trasera
Atornillado_horquilla_trasera	Inspección_de_atornillado_horquilla_trasera
Ensamblado_de_orificio_para_manubrios	Ensamblado_de_tornillo_de_orificio_para_manubrios
Atornillado_de_orificio_para_manubrios	Inspección_del_atornillado_de_orificio_para_manubrios
Ensamblado de manubrios	Ensamblado de horquilla delantera
Atornillado_horquilla_delantera	Inspección_de_horquilla_delantera
Ensamblado de guardafango	Inspección ensamblado de guardafango
Ensamblado_de_llanta_delantera	Ensamblado_de_tornillo_llanta_delantera
Atornillado_de_llanta_delantera	Inspección_de_llanta_delantera
Ensamblado de asiento	Atornillado de asiento
Inspección de asiento	Ensamblado de escape
Inspección de escape	Ensamblado de parabrisas
Inspección de parabrisas	Ensamblado de cubierta inferior
Atornillado cubierta inferior	Inspección cubierta inferior
Ensamblado de llanta trasera	Ensamblado de tornillo llanta trasera
Atornillado de llanta trasera	Inspección atornillado llanta trasera
Inspección final	

Descripción del modelo

Un alumno que cursa la materia de ingeniería de métodos y quiere ensamblar una motocicleta de juguete, realiza los siguientes pasos en el laboratorio de ingeniería de métodos:

Primero se dirige hacia el almacén por la herramienta y la motocicleta de juguete. Después se regresa al laboratorio de ingeniería de métodos, distribuye las partes de la motocicleta de juguete sobre una mesa y se dispone a ensamblar las partes. Primero se ensambla el motor al cuerpo, después se ensambla la carrocería, luego se ensamblan los manubrios y la horquilla, se ensambla la cubierta inferior, el parabrisas, el escape, después se ensambla la llanta delantera, se ensambla la llanta trasera y finalmente se somete la pieza a una inspección final. Por supuesto que hay varias inspecciones intermedias, pero éstas son definidas por el estudiante de acuerdo a su juicio.

Tipo de sistema: Terminante.

Período de observación del sistema: Un ciclo.

Condiciones iniciales del sistema: Ninguna.

En el anexo 9 se muestra la imagen de la práctica 4. El diagrama de flujo se muestra en el anexo 10.

Práctica # 5

La tabla 34 muestra los datos de los componentes aleatorios del sistema.

Tabla 34. Componentes aleatorios de la práctica 5.

Actividad	Distribución ajustada (seg)
Cargar fuentes en la cocina	$5.+1.98*(1./(1.+EXP(-(N(0.,1.)--0.186)/0.74)))$
Servir porción de carne	$5.+3.02*(1./(1.+EXP(-(N(0.,1.)--0.467)/0.806)))$
Servir porción de legumbres	U(6.45, 1.45)
Comer	B(4.52, 7.77, 650, 952)
Servir postre	U(1.95, 0.95)

Entidades

La tabla 35 muestra las entidades de la práctica.

Tabla 35. Entidades de la práctica 5.

Bandeja con las 3 fuentes y platos	Bandeja con platos para comida
Fuente de carne	Fuente de legumbres 1
Fuente de legumbres 2	Fuente de postre
Pila de platos para postre	Bandeja sin platos

Tabla 35 (continuación).

Bandeja con las 3 fuentes	Bandeja de postre vacía
Bandeja con fuente de postre vacía	Bandeja con platos y postre
Platos para postre en bandeja	Bandeja con las 3 fuentes vacías
Bandeja con todos los platos sucios	Plato 1
Plato con carne 1	Plato con carne y leg 1
Plato completo 1	Plato con postre 1
Plato para postre 1	Plato vacío 1
Plato de postre vacío 1	Pila de todos los platos vacíos
Fuente de carne vacía	Fuente de legumbres 1 vacía
Fuente de legumbres 2 vacía	Fuente de postre vacía

Recurso

Enfermera.

Locaciones

La tabla 36 muestra las locaciones de la práctica.

Tabla 36. Locaciones de la práctica 5.

Mesa de la cocina	Descarga de bandeja
Lugar fuente de leg 1	Lugar de fuente de carne y postre
Lugar de bandeja de platos vacía	Lugar de fuente leg 2
Porciones de legumbres 2	Porciones de legumbres 1
Porciones de carne y postre	Platos
Punto para platos vacíos	Cama 1
Cama 2	Cama 3
Cama 4	Cama 5
Cama 6	Cama 7
Cama 8	Cama 9
Cama 10	Cama 11
Cama 12	Cama 13
Cama 14	Cama 15
Cama 16	Cama 17

Descripción del modelo

Una enfermera sirve comidas en una sala de hospital de la siguiente manera:

Primero toma los platos y las fuentes de comida en la cocina para llevarlos a la mesa de servicio que se encuentra en la sala de pacientes. Después coloca fuentes y platos sobre la mesa, distribuye en platos la comida de 3 fuentes (las fuentes incluyen legumbres y carne), lleva plato a cama 1 y vuelve, sirve el siguiente plato, lo lleva al paciente de la cama 2 y vuelve, sirve el plato 3; continúa así hasta servir en las 17 camas. Una vez terminado el

servicio, coloca las fuentes vacías sobre la bandeja y vuelve a la cocina. En la cocina toma la fuente con postre (panes) y la coloca sobre la bandeja. En la cocina espera un tiempo hasta que algunos pacientes hayan terminado de comer, entonces se dirige con los postres hacia la mesa de servicio y los empieza a repartir. Cada vez que entrega un postre, recoge el plato vacío de comida. Cuando termina de repartir los postres, espera a que los pacientes terminen de comérselos, recoge los platos vacíos, toma las fuentes vacías y se retira hacia la cocina.

Tipo de sistema: Terminante.

Período de observación del sistema: Un ciclo.

Condiciones iniciales del sistema: Ninguna.

En el anexo 11 se muestra la imagen de la práctica 5. El diagrama de flujo se muestra en el anexo 12.

3.4.4 Construcción del modelo de simulación

Una vez que se tiene la información, para empezar a construir el(los) modelo(s), se deberán dimensionar el proceso y el alcance que tendrá la simulación. El modelo se deberá ajustar progresivamente, por lo que se le podrán hacer mejoras en el proceso, en los tiempos, en las actualizaciones de los datos, etcétera. Por esta razón es fundamental definir muy bien el alcance que se quiere lograr con el modelo.

Cuando se está construyendo un modelo grande, es útil dividirlo en etapas. Estas etapas deben definirse claramente, para no tener problemas en el momento de analizar los resultados obtenidos.

Cuando se decide elaborar un modelo por etapas, éstas se pueden realizar en diferentes épocas o simultáneamente y por distintas personas. Es necesario que cada etapa tenga unas condiciones iniciales y unas finales. Esto es útil para trabajar en forma paralela, y evitar problemas cuando se decida ensamblar el modelo. Entre las condiciones que se deben definir para las etapas están: nombre de variables, entidades, puestos de trabajo y atributos.

Las prácticas virtuales ya están elaboradas (programadas en *ProModel*), pero se decidió no incluir toda la información de la programación en el presente trabajo de tesis.

Reporte de resultados de salida

Cada una de las prácticas tiene su propio reporte de resultados de salida diseñado especialmente.

Realización del muestreo de las medidas de rendimiento en el sistema real

Las medidas de rendimiento del laboratorio virtual no son los tiempos de cada operación, ya que no es un ejercicio de simulación. En realidad, las medidas de rendimiento son el

aprendizaje de elaboración de diversos diagramas de la materia de ingeniería de métodos, exposición al estudiante de ambientes de procesos reales, propuestas de soluciones para la eliminación de cuellos de botella y otros problemas.

Las medidas de rendimiento en el sistema real (laboratorio de ingeniería de métodos) no obtuvieron una buena calificación, ya que falta material, la línea de producción no funciona, las prácticas solo procesan una sola unidad y sobre todo, no se pueden mostrar los alcances de las mejoras propuestas. Por otro lado, el factor de visitas industriales es infinitamente superior al laboratorio virtual.

3.4.5 Realización de corridas piloto

Cada una de las prácticas del laboratorio virtual involucró muchas horas de trabajo, ya que fue una gran cantidad de información la que se tuvo que integrar. Esto trajo como consecuencia la aparición de errores. Por tal motivo, fue necesario realizar algunas corridas piloto para ver el comportamiento, confirmar la salida de datos esperada, animación apropiada, ausencia de errores al momento de modificar datos y algunos otros detalles.

Una vez que se realizaron las primeras corridas piloto, se encontraron los siguientes problemas:

1. La animación no era muy buena.
2. Se presentaron fallas al momento de hacer modificaciones. Esto quiere decir que la programación tenía ciertos errores.
3. No se contaba con alternativas para algunas de las prácticas, esto es, solamente se presentaba una sola distribución de las prácticas con sólo un tiempo de operación.
4. Las personas que examinaron las prácticas no entendían bien su funcionamiento.
5. El ambiente de las prácticas era en 2 dimensiones prácticamente.
6. Los resultados se mostraban en tablas que *ProModel* arroja automáticamente, lo cual es confuso y muestra mucha información innecesaria para la realización de las prácticas.
7. No se podía interactuar con las prácticas. Los usuarios no podían hacer modificaciones porque no conocían el manejo de *ProModel*.
8. El inicio de las prácticas era lento, porque se sólo se utilizaba una extensa biblioteca.
9. En las prácticas donde se debían mostrar distancias, éstas eran mostradas de forma confusa.
10. Demasiadas rutas en las prácticas traían como consecuencia el que, en ciertas ocasiones, no se pudieran utilizar, aunque se dispusiera de una PC con buena memoria en RAM y/o la versión completa de *ProModel*.

Después de identificar los problemas, se hicieron las modificaciones pertinentes, lográndose los siguientes resultados:

1. La animación fue mejorada, de manera que las imágenes de los “trabajadores” cambian al ir y venir (sólo en la práctica de “Recorrido de una enfermera sirviendo comida” no se mejoró este detalle, ya que acarrea muchos problemas). Por otro lado, ahora se puede observar cómo las manos (en las prácticas bimanuales) “se abren” y “se cierran” al tomar y soltar objetos.
2. Cada vez que se realizan cambios, las prácticas también cambian, por ejemplo, cuando se agregan más recursos, éstos siguen su programa normal. Anteriormente, al agregar más recursos, la práctica no tenía un comportamiento adecuado.
3. Se integraron macros a partir del mismo *software* utilizado, sin necesidad de hacer interfase con algún otro, logrando con esto, una mayor inmersión de los usuarios en el uso de *ProModel*. Además, las macros permiten una infinidad de alternativas posibles para la mayoría de las prácticas sin modificar la programación original.
4. La inclusión de imágenes diseñadas en AutoCAD, permite la visualización parecida a un ambiente tridimensional.
5. Se hicieron algunas programaciones para que en un apartado del reporte de resultados, se mostrara sólo la información necesaria para la realización de las prácticas.
6. Se separaron las bibliotecas de cada práctica, para evitar el inicio lento de sesión.
7. Se hicieron algunos ajustes para que las rutas de los recursos fueran menos, sin afectar la animación.

Programación del período de operación del sistema

En la tabla 37 se muestran los períodos de operación de cada una de las prácticas.

Tabla 37. Períodos de operación de las prácticas.

Número de la práctica	Período de operación
1	8 horas
2	8 horas
3	1 ciclo
4	1 ciclo
5	1 ciclo
6	Tiempo en ensamblar 10 piezas
7	1 ciclo
8	Tiempo en procesar 17 bultos de madera
9	39 días

Establecimiento del número de réplicas necesarias para la corrida de simulación

Las prácticas tienen una sola réplica, con la opción de cambiar tal número o la cantidad de horas, cuando el usuario lo considere conveniente.

Presentación del reporte de resultados

Cada una de las prácticas muestra, al final de la animación, los tiempos de cada una de las operaciones. Esto se estableció en base a la aplicación del QFD.

3.4.6 Diseño y ejecución de experimentos

El laboratorio virtual se utilizó por primera vez en septiembre de 2009.

Los alumnos pusieron en práctica lo aprendido con el marco teórico utilizando las prácticas del laboratorio virtual.

Determinación de diseños alternativos para simularse

Cada una de las prácticas cuenta con macros que permiten modificar los tiempos de operación, capacidad de las locaciones, velocidades y/o cantidad de recursos. Además, las prácticas virtuales muestran variaciones en las distribuciones de planta, como por ejemplo, una de las prácticas presenta 5 líneas de ensamble, pero además tiene la opción de dos líneas de ensamble (para más detalles, consultar el laboratorio virtual).

Establecimiento de las condiciones iniciales para las corridas

Las prácticas no presentan condiciones iniciales.

Establecimiento de la longitud de las corridas de simulación

El tiempo de operación de las alternativas de las prácticas serán las mismas que las prácticas base.

3.4.7 Realización de corridas de producción

Se realizará una corrida de producción por práctica, aunque se tiene la opción de hacer n corridas. Éstas podrán realizarse con o sin animación.

Observación del rendimiento de los datos en los diseños alternativos del sistema de interés

Después de ver las alternativas de las prácticas virtuales, el usuario podrá observar el rendimiento de todos los parámetros. Para esto se basará en los reportes de resultados de salida.

Obtención de los datos del rendimiento de cada alternativa

En la mayoría de las prácticas, los datos más importantes son la cantidad de piezas producidas y los tiempos de ciclo. El catedrático puede tomar cualquier información adicional que arroje *ProModel*, si así lo considera conveniente.

Diseño de un reporte de resultados que sirva para comparar las alternativas

El usuario deberá diseñar un reporte donde se muestre la comparación de los datos observados en los reportes de salida.

3.4.8 Análisis de resultados de salida

El catedrático explicará a los estudiantes el significado y efecto de los resultados mostrados en los reportes. Una vez comprendidos los conceptos, el estudiante podrá interpretar los resultados de las prácticas virtuales, para determinar sus conclusiones y mejoras al proceso.

Elección del mejor sistema alternativo

El usuario tomará la decisión de escoger el mejor sistema, en base a los resultados del reporte de salida.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 Resultados

Para finalizar el presente trabajo de tesis, se hizo una comparación entre los tiempos arrojados por el laboratorio virtual y la realidad. Por un lado se recopilaron tiempos reales y por el otro se solicitaron los reportes de las prácticas de los alumnos de ingeniería de métodos.

Se realizaron pruebas de hipótesis con un valor p de 0.01 (en las operaciones de todas las prácticas) porque los datos arrojados por el laboratorio virtual deben ser lo más apegados a la realidad. Los valores p de cada operación se obtuvieron utilizando el *software Minitab*.

A continuación se presenta el planteamiento de la prueba de hipótesis para todas las operaciones de las prácticas del laboratorio virtual:

$$H_0 : \mu_R = \mu_V$$

$$H_1 : \mu_R \neq \mu_V$$

Donde

μ_R = Media de los datos reales.

μ_V = Media de los datos arrojados por el laboratorio virtual.

4.1.1 Comparación de la práctica 1

Para la realización de esta comparación, se tomaron los tiempos de operación de algunos trabajadores de carpinterías.

La figura 49 muestra la representación gráfica de la realidad y los datos arrojados por el laboratorio virtual en la operación *aserrado aproximado de bastidores*.

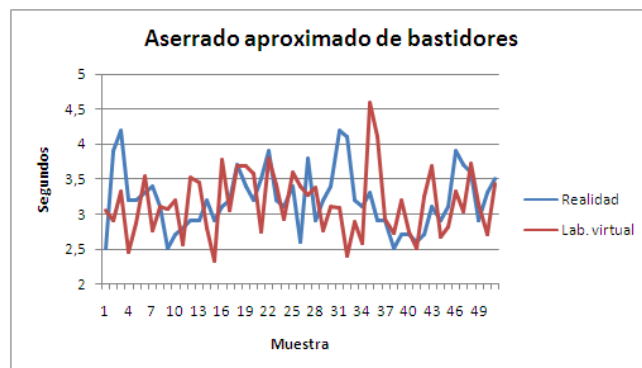


Figura 49. Gráfico de la operación Aserrado aproximado de bastidores.

La figura 50 muestra la representación gráfica de la realidad y los datos arrojados por el laboratorio virtual en la operación *barnizado*.

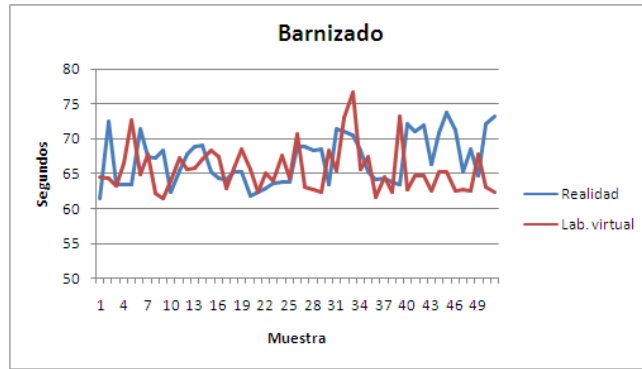


Figura 50. Gráfico de la operación Barnizado.

El resto de las gráficas comparativas de la práctica 1 se muestran en el anexo 13.

La tabla 38 presenta los valores p de todas las operaciones en la práctica 1.

Tabla 38. Valores p de las operaciones en la práctica 1.

Operación	Valor p
Aserrado aproximado de patas	0.074
Aserrado aproximado de bastidores	0.576
Aserrado aproximado de cubiertas	0.529
Cepillado de patas	0.223
Cepillado de bastidores	0.485
Cepillado de cubiertas	0.628
Aserrado definitivo de patas	0.366
Aserrado definitivo de bastidores	0.812
Aserrado definitivo de cubiertas	0.367
Lijado de patas	0.497
Lijado de bastidores	0.32
Lijado de cubiertas	0.603
Ensamblado de bastidores y cubiertas	0.463
Ensamblado de patas	0.773
Barnizado	0.032
Lijado de mesa	0.149
Aplicación de laca	0.787

Como se observa en la tabla 38, todos los valores p son mayores a 0.01; por lo tanto, se acepta la hipótesis nula de todas las operaciones en la práctica 1.

Adicionalmente, en el comparativo de la práctica 1 el lector puede darse cuenta de lo siguiente:

1. En la figura 49 se observa cómo el laboratorio virtual presenta un valor que “se dispara”, esto quiere decir que la distribución utilizada representa de manera aproximada a la realidad.

2. En las operaciones *aserrado aproximado de patas y barnizado* se obtuvieron unos valores p muy pequeños: esto nos dice que las distribuciones utilizadas no presentan un comportamiento tan semejante a la realidad como el resto de ellas.
3. No solamente *barnizado* presenta un valor p muy bajo; si se observa la figura 50, se puede apreciar cómo en los últimos valores ambas curvas tienden a la separación.
4. Las operaciones *aserrado definitivo de bastidores y aplicación de laca* son las que presentan un comportamiento más semejante a la realidad.
5. Las operaciones que involucran máquinas tienen menor variación comparadas con aquellas operaciones manuales.

4.1.2 Comparación de la práctica 2

Los tiempos para realizar el comparativo de la práctica 2 fueron obtenidos de los reportes hechos por los alumnos de ingeniería de métodos.

La figura 51 muestra la representación gráfica de la realidad y los datos arrojados por el laboratorio virtual en la operación *ensamblar dos llantas a eje*.

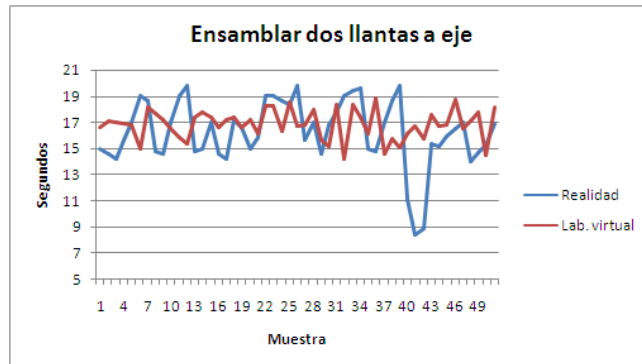


Figura 51. Gráfico de la operación Ensamblar dos llantas a eje.

El anexo 14 contiene el resto de las gráficas comparativas de la práctica 2.

La tabla 39 presenta los valores p de todas las operaciones en la práctica 2.

Tabla 39. Valores p de las operaciones en la práctica 2.

Operación	Valor p
Ensamblar llanta	0.6
Ensamblar dos llantas a eje	0.126
Ensamblar asientos a chasis	0.123
Ensamblar carrocería	0.535
Ensamblar cofre	0.173

Tabla 39 (continuación).

Operación	Valor p
Ensamblar motor	0.371
Ensamblar defensa trasera	0.939
Ensamblar defensa delantera	0.168
Ensamblar eje trasero a chasis	0.07
Ensamblar eje delantero a chasis	0.188

Como se observa en la tabla 39, todos los valores p son mayores a 0.01; por lo tanto, se acepta la hipótesis nula de todas las operaciones en la práctica 2.

Las operaciones *ensamblar defensa trasera* y *ensamblar defensa delantera* son muy similares, prácticamente iguales; sin embargo, los valores p de ambas operaciones difieren mucho.

Las operaciones donde se ensamblan los ejes presentan valores p muy bajos.

El promedio de los valores p en la práctica 2 es bajo comparado con los de la práctica 1.

En la figura 51 se muestran unos valores que se comportan diferente al resto de la gráfica.

Todas las gráficas del laboratorio virtual en la práctica 2 presentan un comportamiento similar a la realidad.

4.1.3 Comparación de la práctica 3

No se hizo una comparación de la práctica 3 con la realidad porque las distribuciones de la mayoría de sus operaciones se hicieron en ausencia de datos. Sin embargo, la práctica sirve como material didáctico, esto es, se pueden explicar los pasos para la realización de un diagrama de flujo del proceso (normalmente el catedrático da la clase verbalmente y/o utilizando el pintarrón).

Adicionalmente, la práctica 3 contiene macros, las cuales permiten hacer algunas modificaciones y mostrar a los alumnos sus consecuencias, lo cual no sería posible si se utilizara un video.

La práctica 3 ya ha sido utilizada, y se ha confirmado que efectivamente sirve para explicar la construcción de diagramas de flujo del proceso, a pesar de que la mayoría de los datos no se compararon con la realidad.

4.1.4 Comparación de la práctica 4

Para realizar este comparativo, se utilizaron los tiempos contenidos en los reportes entregados por alumnos de ingeniería de métodos.

La figura 52 muestra la representación gráfica de la realidad y los datos arrojados por el laboratorio virtual en la operación *ensamblar guardafangos*.

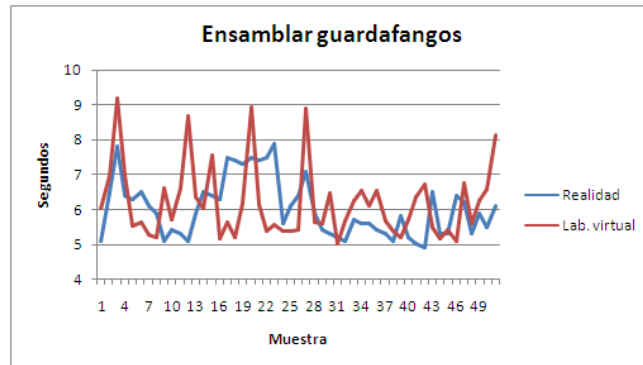


Figura 52. Gráfico de la operación Ensamblar guardafangos.

En el anexo 15 se pueden observar el resto de las gráficas comparativas de la práctica 4.

La tabla 40 presenta los valores p de todas las operaciones en la práctica 4.

Tabla 40. Valores p de las operaciones en la práctica 4.

Operación	Valor p
Espera en ventanilla (recibo e inspección)	0.962
Ensamblar las dos partes negras	0.387
Ensamblar horquilla trasera	0.188
Ensamblar orificio para manubrios	0.391
Ensamblar manubrios y horquilla delantera	0.59
Ensamblar guardafangos	0.432
Ensamblar llanta delantera	0.816
Ensamblar asiento	0.08
Ensamblar escape	0.623
Ensamblar parabrisas	0.084
Ensamblar cubierta inferior	0.533
Ensamblar llanta trasera	0.378
Inspecciones cortas	0.496
Inspecciones largas	0.543
Inspección final	0.388

Como se observa en la tabla 40, todos los valores p son mayores a 0.01; por lo tanto, se acepta la hipótesis nula de todas las operaciones en la práctica 4.

Las operaciones que los alumnos no dominan son *ensamblar asiento* y *ensamblar parabrisas*, por eso es que sus distribuciones arrojan bajos valores p .

Al observar la figura 52, surge la siguiente pregunta: ¿Qué pasaría con el comportamiento del laboratorio virtual si se recogieran más datos de la realidad?

4.1.5 Comparación de la práctica 5

Solamente se compararon dos operaciones con la realidad. Esto se debió a que hay algunas actividades, como *comer*, donde no importa el tiempo que tarden los pacientes, de todos modos la enfermera espera a que algunos terminen para continuar con su trabajo (consultar la práctica, para más información).

La figura 53 muestra la representación gráfica de la realidad y los datos arrojados por el laboratorio virtual en la operación *servir un plato con comida*.

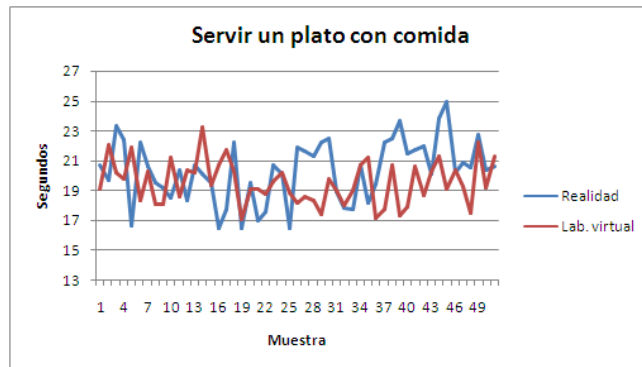


Figura 53. Gráfico de la operación Servir un plato con comida.

La figura 54 muestra la representación gráfica de la realidad y los datos arrojados por el laboratorio virtual en la operación *servir un plato con postre*.

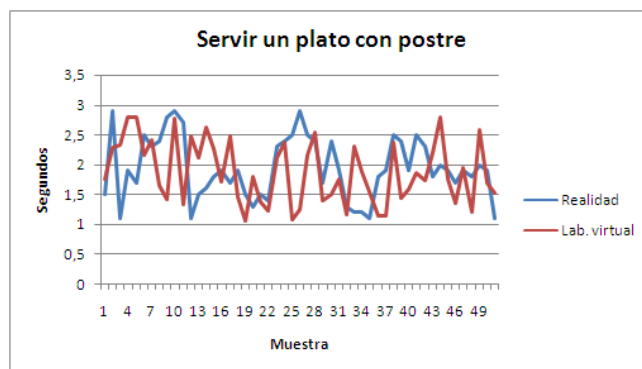


Figura 54. Gráfico de la operación Servir un plato con postre.

La tabla 41 presenta los valores p de dos operaciones en la práctica 5.

Tabla 41. Valores p de dos operaciones en la práctica 5.

Operación	Valor p
Servir un plato con comida	0.034
Servir un plato con postre	0.51

Como se puede observar en la tabla 41, la sencillez de “servir un plato con postre” hace que su valor p sea mayor al de *servir un plato con comida*.

Ambas operaciones tienen un valor p mayor a 0.01, por lo tanto, se acepta la hipótesis nula de todas las operaciones en la práctica 5.

4.1.6 Comparación de la práctica 6

Para realizar esta comparación, se solicitó el apoyo de voluntarios que realizaran las dos operaciones.

La figura 55 muestra la representación gráfica de la realidad y los datos arrojados por el laboratorio virtual en la operación *ensamblar abrazadera*.

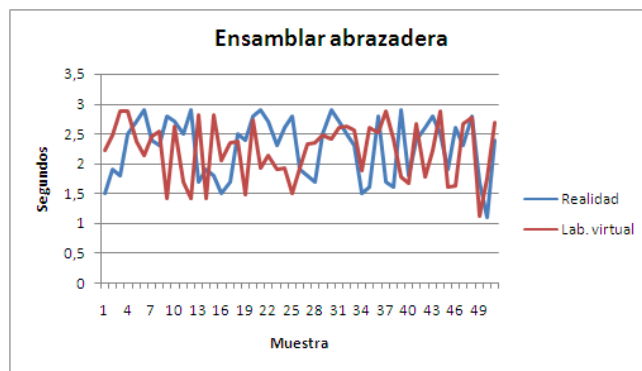


Figura 55. Gráfico de la operación Ensamblar abrazadera.

La figura 56 muestra la representación gráfica de la realidad y los datos arrojados por el laboratorio virtual en la operación *ensamblar tuerca*.

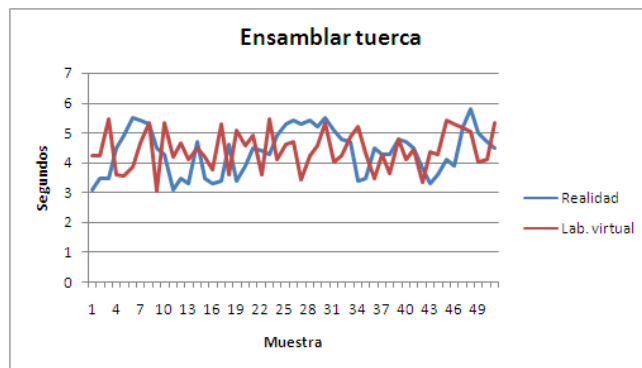


Figura 56. Gráfico de la operación Ensamblar tuerca.

La tabla 42 presenta los valores p de las operaciones en la práctica 6.

Tabla 42. Valores p de las operaciones en la práctica 6.

Operación	Valor p
Ensamblar abrazadera	0.599
Ensamblar tuerca	0.769

Como se aprecia en la tabla 42, ambas operaciones tienen un valor p mayor a 0.01, por lo tanto se dice que la práctica número 6 presenta un comportamiento semejante a la realidad.

Las figuras 55 y 56 muestran el comportamiento similar del laboratorio virtual y la realidad.

4.1.7 Comparación de la práctica 7

Los tiempos de la práctica 7 fueron obtenidos de los reportes entregados por los alumnos de ingeniería de métodos.

La figura 57 muestra la representación gráfica de la realidad y los datos arrojados por el laboratorio virtual en la operación *ensamblar vástago*.

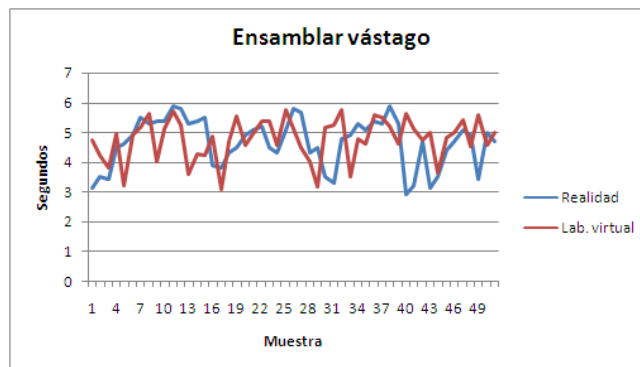


Figura 57. Gráfico de la operación Ensamblar vástago.

En el anexo 16 se pueden observar el resto de las gráficas comparativas de la práctica 7.

La tabla 43 presenta los valores p de las operaciones en la práctica 7.

Tabla 43. Valores p de las operaciones en la práctica 7.

Operación	Valor p
Ensamblar parte interna	0.415
Ensamblar resorte interno	0.355
Ensamblar vástago	0.405
Ensamblar tornillo	0.316
Ensamblar resorte y regulador	0.641
Ensamblar regulador al resto de la válvula	0.302

Como se observa en la tabla 43, todos los valores p son mayores a 0.01, por lo que se acepta la hipótesis nula de todas las operaciones de la práctica 7.

Todos los tiempos arrojados por la práctica 7 del laboratorio virtual son semejantes a la realidad; especialmente la figura 57 muestra como el laboratorio virtual y la realidad presentan curvas semejantes.

4.1.8 Comparación de la práctica 8

Para realizar esta comparación, se tomaron tiempos de operadores de montacargas y algunas operaciones de carpintería.

Hay que hacer notar lo siguiente:

- Para la descarga de bultos de madera, el operador de montacargas tenía cuidado ya que una carga mal ubicada podía ocupar demasiado espacio.
- El tiempo de flejado automático no es precisamente una operación donde la máquina actúa sola: un trabajador se encargaba de acomodar la filmina por la parte superior.

La figura 58 muestra la representación gráfica de la realidad y los datos arrojados por el laboratorio virtual en la operación *sellado*.

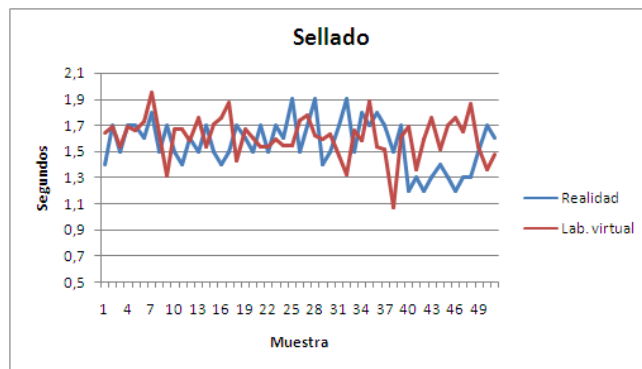


Figura 58. Gráfico de la operación Sellado.

En el anexo 17 se pueden observar el resto de las gráficas comparativas de la práctica 8.

La tabla 44 presenta los valores p de las operaciones en la práctica 8.

Tabla 44. Valores p de las operaciones en la práctica 8.

Operación	Valor p
Cargar bulto de madera	0.999
Descargar bulto de madera	0.723
Cortar cuatro piezas con la sierra de péndulo	0.325

Tabla 44 (continuación).

Operación	Valor p
Sellado	0.129
Taladrado	0.974
Corte con sierra cinta	0.372
Flejado manual	0.922
Pintado	0.611
Flejado automático	0.386

Como puede observarse en la tabla 44, todos los valores p son mayores a 0.01, por lo tanto, se acepta la hipótesis nula en todas las operaciones de la práctica 8.

La operación que presenta mayor variación (según la figura 58 y el valor p) es *sellado*.

Según el valor p , la operación que prácticamente es igual a la realidad es *cargar bulto de madera*.

Si los tiempos hubieran sido tomados de una máquina de flejado que realmente hiciera su trabajo sin apoyo humano, el valor p de esta operación hubiera sido diferente al obtenido.

4.1.9 Comparación de la práctica 9

No se realizó una comparación de la práctica 9 porque ésta fue un proyecto de titulación de alumnos de ingeniería industrial, de manera que esta práctica ya se encuentra validada.

Otro de los resultados fue el instructivo del laboratorio virtual, el cual está diseñado para usuarios que no sepan utilizar *ProModel*.

CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados, es posible elaborar un laboratorio virtual de ingeniería de métodos utilizando el método del QFD y utilizando cualquier *software* de simulación.

Se cumplieron las metas y el objetivo propuesto.

El nivel del laboratorio virtual elaborado está entre el tercero y el cuarto, pero existe la posibilidad de subirlo al quinto (ya sea adquiriendo el módulo tridimensional para *ProModel* o haciendo la conversión a otro *software*).

Un estudio de mercado es muy importante para aplicar el QFD, ya que permite encontrar las demandas más importantes para el cliente.

No todas las demandas de los clientes fueron tomadas en cuenta, solamente se consideraron las más significativas; de otra manera, el proceso del QFD hubiera sido difícil de aplicar.

El laboratorio virtual debe tener como objetivo prioritario el mejoramiento continuo. Satisfacer a un cliente no es fácil, y sobre todo, algo virtual siempre estará en desventaja con la realidad.

Los laboratorios virtuales se pueden aplicar en una gran cantidad de campos, el único límite es el que establezca la imaginación de la mente humana.

Manejar el *software* de simulación *ProModel* en proyectos de gran escala requiere mucha paciencia y seguridad, ya que no presenta la opción “rehacer” (*undo*, en inglés).

Los tiempos arrojados por el laboratorio virtual se encuentran dentro del rango de los datos obtenidos en la realidad.

Los estudiantes no encuentran divertidas, interesantes o constructivas a las prácticas reales que se realizan en los laboratorios de ingeniería de métodos. Por el contrario, encuentran muy pocas desventajas en el laboratorio virtual y están a la espera de poder utilizarlo de una manera más profunda.

Los profesores de ingeniería de métodos presentan resistencia al cambio (al igual que la mayoría de la gente) y no ven conveniente al laboratorio virtual de ingeniería de métodos. Es necesario (según se vio en “características de la realidad virtual”) que quien utilice un laboratorio virtual presente una “suspensión de la incredulidad”.

Un problema que varios ingenieros industriales recién graduados presentan, es que no saben cómo tomar los tiempos en un estudio de tiempos y movimientos. Algunos profesores comentan que una desventaja del laboratorio virtual es que no permite a los alumnos el aprender a tomar los tiempos. Esto se puede solucionar tomando una o dos horas para enseñar el método, y después de eso utilizar el laboratorio virtual.

La presencia de macros y reportes de resultados convierten automáticamente en prácticas de laboratorio virtual a cualquier proyecto de simulación.

No se pretende sustituir a las prácticas reales con el laboratorio virtual de ingeniería de métodos: es solamente un apoyo didáctico para aquellas situaciones donde no se encuentren disponibles los laboratorios físicos.

El laboratorio virtual de ingeniería de métodos presenta las siguientes ventajas (las cuales se multiplicarán cuando los profesores de ingeniería de métodos sepan utilizar *ProModel*):

1. Poco espacio utilizado.
2. Disponibilidad.
3. Portabilidad.
4. Rapidez.
5. No está propenso al desgaste o pérdida.
6. Presentación de empresas reales.
7. Reproducción ilimitada.
8. Instructivo.
9. Variedad de procesos.
10. Modificaciones de procesos.
11. Presentación de resultados.
12. Introducción de los estudiantes al aprendizaje de simulación.

El laboratorio virtual de ingeniería de métodos es una buena opción como material educativo, no solamente por las opciones que presenta, sino por las características de las prácticas reales que se realizan en los laboratorios de ingeniería de métodos de la UABC.

RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

Las prácticas presentadas en el laboratorio virtual de ingeniería de métodos, bien pueden utilizarse en muchas otras materias de la carrera de ingeniería industrial (con ciertas modificaciones).

Preparar un curso de *ProModel* orientado solamente al uso de las macros (ya que los alumnos aún no están preparados para aprender simulación), de manera que se explote de una mejor manera al laboratorio virtual.

Proporcionar un curso de *ProModel* a profesores de ingeniería de métodos, para ampliar sus horizontes y tener una opinión más objetiva acerca del laboratorio virtual.

Realizar un muestreo con una máquina de flejado que en verdad trabaje de manera automática, porque en la realización de este proyecto no se pudo tener acceso a una máquina así.

Las siguiente es una serie de características que se pueden agregar al laboratorio virtual de ingeniería de métodos para hacer más completas las prácticas:

1. Vista en tres dimensiones (ya sea adquiriendo el módulo para *ProModel* o haciendo la conversión a otro *software* de simulación).
2. Visita guiada a través de la práctica.
3. Presentación de costos relacionados con la práctica en uso.
4. Paros (programados y no programados).
5. Agregar más detalles a los recursos, tales como ir sobre la entidad más cercana, establecimiento de un lugar de descanso, aceleración, tiempo de carga, etcétera.
6. Retrabajos.
7. Horarios de trabajo.
8. Presentar reportes en interfase con Excel.
9. Presentar las dimensiones del producto.

Hacer un comparativo general entre los laboratorios reales y el laboratorio virtual, de manera que se expliquen de manera más profunda las ventajas y desventajas.

REFERENCIAS

- [1] <http://monografias.com/trabajos28/realidad-virtual/realidad-virtual.shtml> 23 de abril de 2010.
- [2] Corina Schmelkes. Manual para la presentación de anteproyectos e informes de investigación (tesis). Oxford University Press. Segunda edición. México. pp 199. 1998.
- [3] http://es.wikipedia.org/wiki/Inteligencia_Artificial 23 de abril de 2010.
- [4] <http://www.monografias.com/trabajos7/holis/holis.shtml> 23 de abril de 2010.
- [5] <http://www.wordreference.com/definicion/preceptivo> 23 de abril de 2010.
- [6] <http://es.wikipedia.org/wiki/Interdependencia> 23 de abril de 2010.
- [7] <http://es.wikipedia.org/wiki/Benchmarking> 23 de abril de 2010.
- [8] <http://es.wikipedia.org/wiki/Heur%C3%ADstica> 23 de abril de 2010.
- [9] <http://www.monografias.com/trabajos4/realvirtual/realvirtual.shtml?relacionados> 28 de agosto de 2008.
- [10] <http://arcadia.eafit.edu.co/virtualc/articulos/AUC.htm> 23 de abril de 2010.
- [11] http://aportes.educ.ar/quimica/nucleo-teorico/tradiciones-de-ensenanza/como-ensenamos/simulacion_el_laboratorio_virt.php 23 de abril de 2010.
- [12] <http://www.cs.ubc.ca/nest/magic/projects/hands/home> 29 de agosto de 2008.
- [13] <http://www.jhu.edu/~virtlab/virtlab.html> 23 de abril de 2010.
- [14] <http://www.uwinnipeg.ca/~simmons/index.htm> 30 de agosto de 2008.
- [15] <http://www.nasa.gov> 23 de abril de 2010.
- [16] <http://jersey.uoregon.edu/vlab/> 23 de abril de 2010.
- [17] <http://geocities.yahoo.com.br/saladefisica3/laboratorio.htm> 2 de septiembre de 2008.
- [18] <http://enebro.pntic.mec.es/~fmag0006/Prism200.htm> 3 de septiembre de 2008.
- [19] <http://physicsweb.org/vlab/> 2 de septiembre de 2008.
- [20] <http://www.chem.ox.ac.uk/vrchemistry/> 23 de abril de 2010.
- [21] rbt.biologia.ucr.ac.cr/public/evollab4.doc 29 de agosto de 2008.
- [22] <http://www.utpl.edu.ec/blog/simulacionsistemas/category/simulacion> 29 de agosto de 2008.
- [23] http://www.licef.teluq.quebec.ca/gmec/1vphysique/LVP_EDMEDIA.htm 4 de septiembre de 2008.

- [24] <http://www.virtualexgames.com/> 23 de abril de 2010.
- [25] <http://www.vrinnovations.com> 23 de abril de 2010.
- [26] <http://www.cnn.com/2001/TECH/computing/01/19/virtual.sex.idg/> 26 de abril de 2010.
- [27] Charles Harrell, Biman K. Ghosh, Royce Bowden. Simulation using ProModel. McGraw-Hill. 3ª edición. Boston, Massachusetts. pp 603. 2000.
- [28] <http://www.informs-cs.org/wsc97papers/0619.PDF> 3 de marzo de 2009.
- [29] W. David Kelton, Randall P. Sadowski, David T. Sturrock. Simulación con software arena. McGraw-Hill. 4ª edición. México D.F. pp 631. 2008.
- [30] http://www.arenasimulation.com/products/feature_matrix.asp 5 de julio de 2009.
- [31] <http://www.informs-cs.org/wsc97papers/0711.PDF> 20 de julio de 2009.
- [32] <http://en.wikipedia.org/wiki/DELMIA> 26 de abril de 2010.
- [33] <http://mx.dir.groups.yahoo.com/group/DesignMecanico3D/message/579> 26 de abril de 2010.
- [34] http://www.3dx.com.mx/index.php?option=com_content&task=view&id=50&Itemid=26 1 de julio de 2009.
- [35] <http://www.emplant.de/english/Plant%20Simulation%20Product%20Description%20English.pdf> 20 de julio de 2009.
- [36] <http://www.promodel.com.mx/promodel.php> 26 de abril de 2010.
- [37] Dennis D. Wackerly, William Mendelhall III, Richard L. Scheaffer. Estadística matemática con aplicaciones. Thomson. 6ª edición. México D.F. pp 853. 2002.
- [38] Olger Rodas, Claudia Bolaños, Sandra Barrientos, José Díaz y Marisol Sican, <http://www.monografias.com/trabajos11/tebas/tebas.shtml> 26 de abril de 2010.
- [39] Bernardo A. Calderón, http://siona.udea.edu.co/~bcalderon/5_aleasimple.html 27 de octubre de 2008.
- [40] <http://dcb.fi-c.unam.mx/profesores/irene/Notas/PruebaBondad.pdf> 29 de octubre de 2008.
- [41] http://bochica.udea.edu.co/~bcalderon/6_pruebasbondadajuste.html 29 de octubre de 2008.
- [42] Benjamin W. Niebel, Andris Freivalds. Ingeniería industrial: métodos, estándares y diseño del trabajo. Alfaomega. 10ª edición. México D.F. pp 728. 2001.
- [43] <http://www.monografias.com/trabajos14/balanceolineas/balanceolineas.shtml> 26 de abril de 2010.

- [44] http://www.elprisma.com/apuntes/ingenieria_industrial/balanceodelinea/ 3 de mayo de 2010.
- [45] http://www.publicacions.ub.es/revistes/phonica1/PDF/articulo_04.pdf 26 de abril de 2010.
- [46] González Espinoza Marvin Eduardo. La función despliegue de la calidad. Una guía práctica para escuchar la voz del cliente. McGraw-Hill. 1ª edición. México D.F. pp 163. 2001.
- [47] Lind Douglas A. Robert D. Mason, William G. Marchal. Estadística para administración y economía. McGraw-Hill. México D.F. pp 575. 2001.
- [48] Benjamin W. Niebel, Andris Freivalds. Ingeniería industrial: métodos, estándares y diseño del trabajo. McGraw-Hill. 12ª edición. México D.F. pp 592. 2009

ANEXOS

Anexo 1. Cuestionario – encuesta

¿Ya llevaste la materia de ingeniería de métodos?

Sí () No ()

¿Qué tipo de prácticas sería mejor realizar en un laboratorio virtual?

() Análisis para el ensamble de un producto.

() Diagrama de operaciones de proceso.

() Biblioteca.

() Diagrama hombre – máquina.

() Análisis de operaciones.

() Estudio de tiempos.

Otras _____

¿Qué crees que le falta a los laboratorios de ingeniería de métodos?

¿Qué desventajas encuentras en realizar las prácticas de laboratorio en un laboratorio virtual?

¿Qué ventajas encuentras en realizar las prácticas de laboratorio en un laboratorio virtual?

Características deseadas de las prácticas virtuales:

() Poder realizarlas por Internet.

() Que sean lo más apegadas a la realidad posible.

() Que se utilicen fotos de personas en lugar de dibujos.

() Que contengan fotos de construcciones reales y no dibujos.

() Que sean en tercera dimensión.

() Que contengan sonidos reales.

() Que sean fáciles de realizar.

() Que el laboratorio virtual tenga un instructivo.

() Que el laboratorio virtual sea fácil de utilizar.

() Que el laboratorio virtual tenga niveles de usuario.

() Poder mover los elementos (dibujos) con exactitud métrica.

() Que sólo se vea la animación por un corto tiempo, ya que se torna aburrido.

() Que contenga procesos de empresas reales.

() Que cada año se actualice con más procesos de empresas reales (variar).

() Que dé recomendaciones y/o advertencias.

() Otras: _____

Comentarios y/o sugerencias:

Anexo 2. Información obtenida con la técnica de muestreo aplicada

Operación	\bar{x}	s	n
Aserrado aproximado de patas	1.26	0.19	1.11
Aserrado aproximado de bastidores	3.23	0.45	2.42
Aserrado aproximado de cubiertas	11.82	1.02	3.44
Unión de orillas de patas	7.93	1.14	6.35
Unión de orillas de bastidores	8.75	0.75	2.47
Unión de orillas de cubiertas	9.69	1.05	4.39
Cepillado de patas	22.58	1.68	4.82
Cepillado de bastidores	20.16	1.82	6.37
Cepillado de cubiertas	22.75	1.13	2.18
Aserrado definitivo de patas	1.11	0.2	1.43
Aserrado definitivo de bastidores	1.07	0.19	1.36
Aserrado definitivo de cubiertas	3.84	0.35	1.23
Inspección de patas	14.74	1	2.65
Inspección de bastidores	9.8	1.22	5.83
Inspección de cubiertas	17.22	1.35	4.06
Lijado de patas	16.82	1.01	2.33
Lijado de bastidores	16.19	0.69	1.15
Lijado de cubiertas	31.28	1.4	2.42
Ensamblado de bastidores y cubierta	46.85	1.93	3.08
Ensamblado de patas al resto de la mesa	50.23	1.83	2.56
Inspección antes de aplicar barniz y laca	25.74	0.74	0.82
Barnizado	66.04	3.06	5.45
Lijado de mesa con barniz	77.1	1.86	1.73
Aplicación de laca	71.22	3.69	7.35
Inspección final de mesas	47.41	1.49	1.8
Ensamblado de asientos	3.56	0.84	7.6
Ensamblado de carrocería	5.38	0.84	5.08
Ensamblado de cofre	7.54	0.8	3.32
Ensamblado de motor	11.05	1.29	5.83
Ensamblado de defensa delantera	12.34	1.06	3.53
Ensamblado de defensa trasera	12.19	0.87	2.39
Inspección de carrocería	7.13	1.11	6.69
Ensamblado de eje trasero a chasis	12.19	0.87	2.39
Ensamblado de eje delantero a chasis	11.89	0.84	2.29
Inspección final	11.78	1.46	7.01
Ensamblado del centro del rin	1.57	0.23	1.38
Ensamblado de la otra mitad del rin	1.86	0.52	5.78
Ensamblado de neumático	14.27	3.18	27.22
Ensamblado de llanta a eje	8.45	0.96	4.21
Inspección de eje con llantas	6.05	0.84	4.54
Subir o bajar del auto	2.4	0.44	3.14
Tocar timbre	0.38	0.1	1.32
Esperar a entrar a la casa	12.36	1.56	8.47
Desconectar tanque de unidad	20.93	1.2	2.65
Inspección de abolladuras	77.33	1.6	1.28

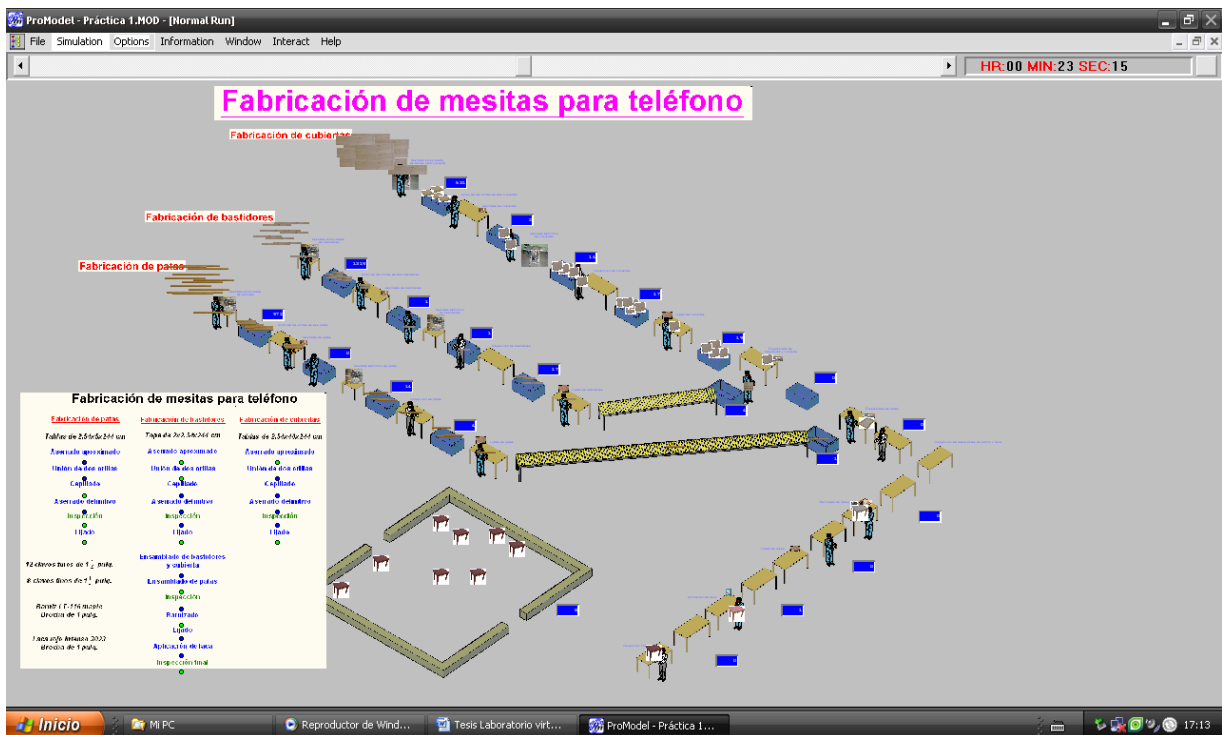
Anexo 2 (continuación)

Operación	\bar{x}	s	n
Limpiar tanque	138.74	1.62	0.73
Colocar tanque en máquina de llenado	4.67	0.75	4.69
Conectar máquina	12.98	1.33	5.24
Abrir válvula	14.65	0.78	1.62
Llenado de tanque	781.35	27	35.84
Inspección de humidificador	31.89	1.1	1.45
Inspección de presión	12.38	0.73	1.68
Inspección de contenido	12.35	0.74	1.72
Conexión de tanque en unidad del paciente	63.28	1.47	1.32
Inspección de humidificador en la unidad del paciente	47.25	1.61	2.12
Esperar a que el paciente se quite la cánula	125.77	1.15	0.4
Instalación de nueva cánula	154.93	2.25	1.26
Verificación de flujo	137.86	1.83	0.94
Fijación de etiqueta	63.5	1.21	0.88
Recibo e inspección de piezas	15.75	1.71	7.14
Ensamblar parte negra 1 a motor	5.07	0.53	2.14
Inspecciones cortas	2.08	0.62	7.18
Ensamblar parte negra 2 a motor	11.46	0.9	2.73
Ensamblar horquilla trasera	4.94	0.49	1.88
Ensamblar el tornillo de la horquilla trasera	8.37	0.62	1.81
Apretar tornillo	4.05	0.55	2.94
Ensamblar el orificio para manubrios	2.03	0.54	5.65
Ensamblar el tornillo del orificio para manubrios	9.1	1.12	5.31
Inspecciones largas	5.12	0.68	3.51
Ensamblar manubrios	3.88	0.5	2.5
Ensamblar horquilla delantera	3.1	0.55	3.83
Ensamblar guardafangos	6.14	0.87	4.75
Ensamblar llanta delantera	2.2	0.49	4.23
Ensamblar el tornillo de la llanta delantera	6.96	0.53	1.58
Ensamblar asiento	2	0.47	4.37
Ensamblar escape	10.22	1.41	7.47
Ensamblar parabrisas	12.54	1.09	3.66
Ensamblar cubierta inferior	3.95	0.43	1.82
Ensamblar llanta trasera	3.25	0.5	3.04
Ensamblar el tornillo de la llanta trasera	5.64	0.69	3.25
Inspección final	14.51	0.92	2.28
Cargar bandeja con fuentes de comida	6.07	0.5	1.59
Servir una porción de carne	6.83	0.7	2.81
Servir una porción de legumbres	6.5	0.86	4.4
Comer	757.64	22.19	24.96
Cargar bandeja con fuente de postre	806.15	13.61	8.83
Servir una porción de postre	1.95	0.56	6.24
Recoger fuentes vacías	1.66	0.19	0.88
Soltar un plato	1.51	0.2	1.04
Juntar un plato con el resto de los platos vacíos	0.33	0.12	1.65

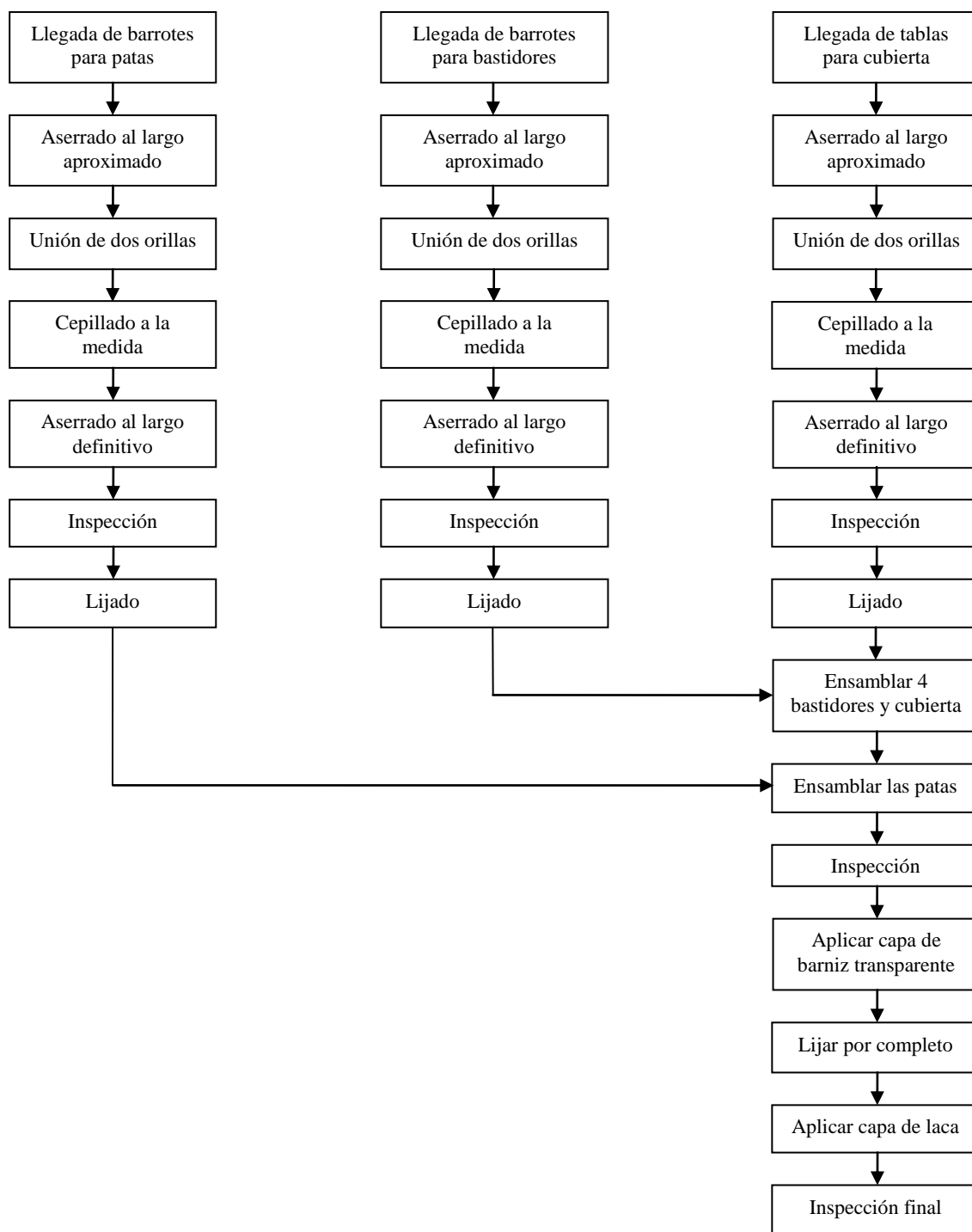
Anexo 2 (continuación)

Operación	\bar{x}	s	n
Ensamblar abrazadera	2.27	0.49	4.12
Ensamblar tuerca	4.37	0.78	5.35
Ensamblar parte interna	0.9	0.25	2.79
Ensamblar resorte interno	2.1	0.45	3.81
Ensamblar vástago	4.82	0.77	4.77
Ensamblar tornillo hexagonal	4.78	0.61	3.05
Ensamblar resorte y regulador	1.65	0.16	0.6
Ensamblar regulador al resto de la válvula	2.46	0.36	2.06
Apretar tornillos	10.53	0.86	2.71
Cargar un bulto de madera	14.21	2.49	16.85
Descargar un bulto de madera	6.14	1.25	9.78
Inspección y registro de bulto de madera 17	76.94	5.16	13.32
Corte con sierra de péndulo	3.03	0.38	1.88
Sellado	1.62	0.14	0.48
Taladrado	2.22	0.37	2.46
Corte con la sierra cinta	22.97	2.61	11.39
Flejado manual	21.33	3.24	18.98
Pintado	22.38	3.64	22.81
Flejado automático	123.6	3.9	4.74
Transportar material	183.8	6.94	10.09
Cargar programa de corte	20.64	3.32	20.52
Acomodar vidrio	12.76	2.28	15.74
Tiempo de corte	136.53	7.67	16.56
Tiempo de descarga	21.69	3.64	23.5
Inspección de material	36.48	6.08	38.94
Transporte de material pintado	13.38	1.51	6.58
Centrar pieza	7.16	1.53	12.71
Revisar viscosidad	11.05	1.19	4.93
Operación de máquina de pintura	3928.76	57.54	32.37
Limpiar máquina de pintura	36.43	4.21	18.74
Desmontar malla	16.92	2.26	11.63

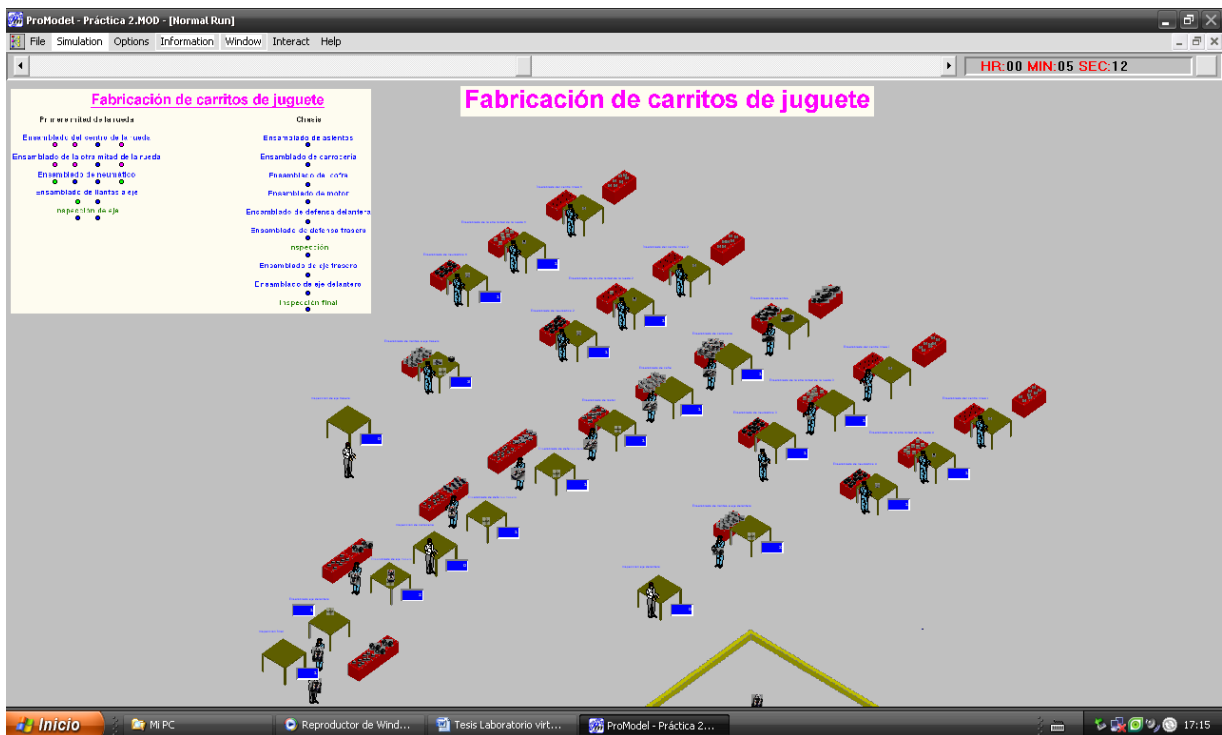
Anexo 3. Imagen de la práctica 1



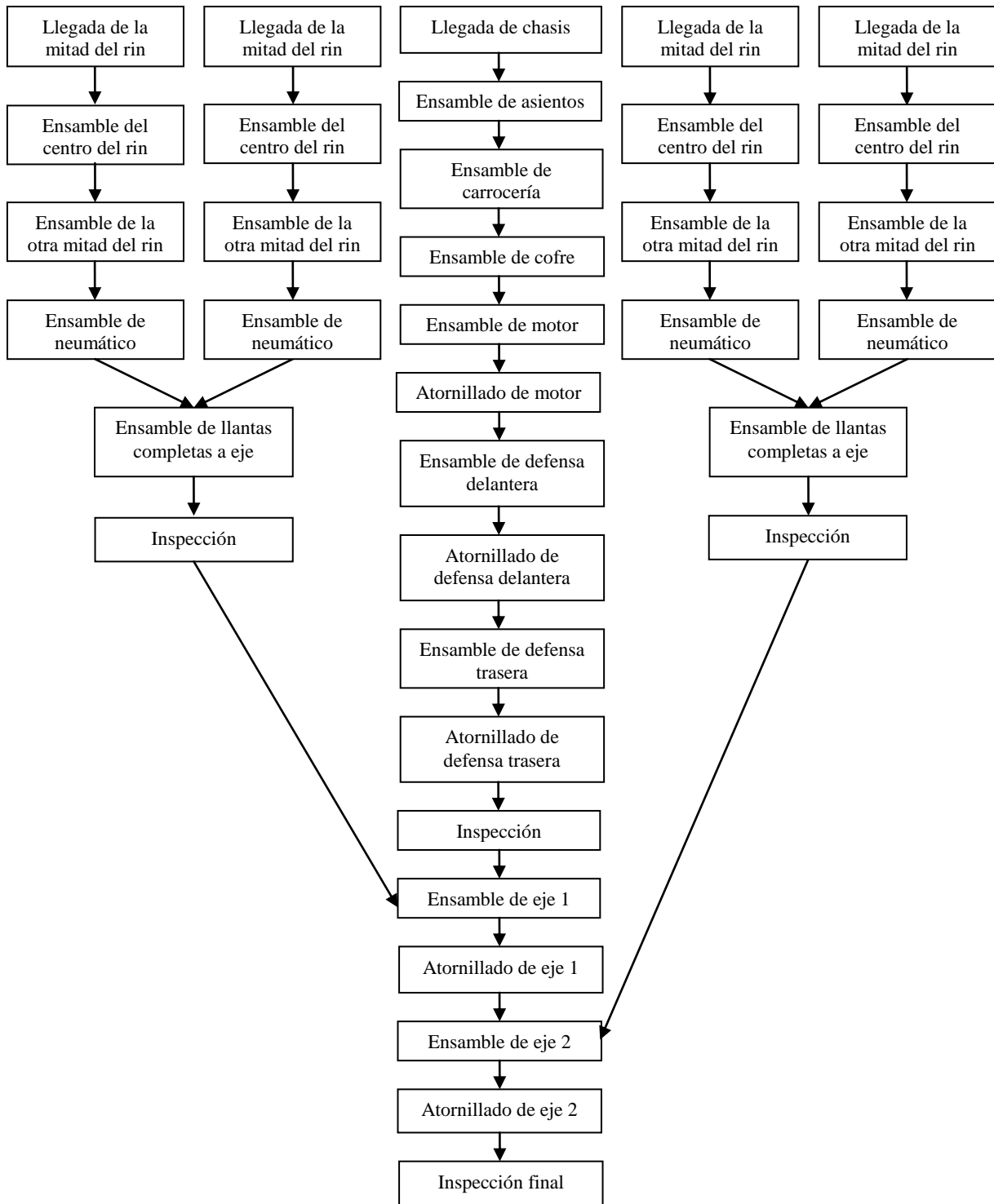
Anexo 4. Diagrama de flujo de la práctica 1



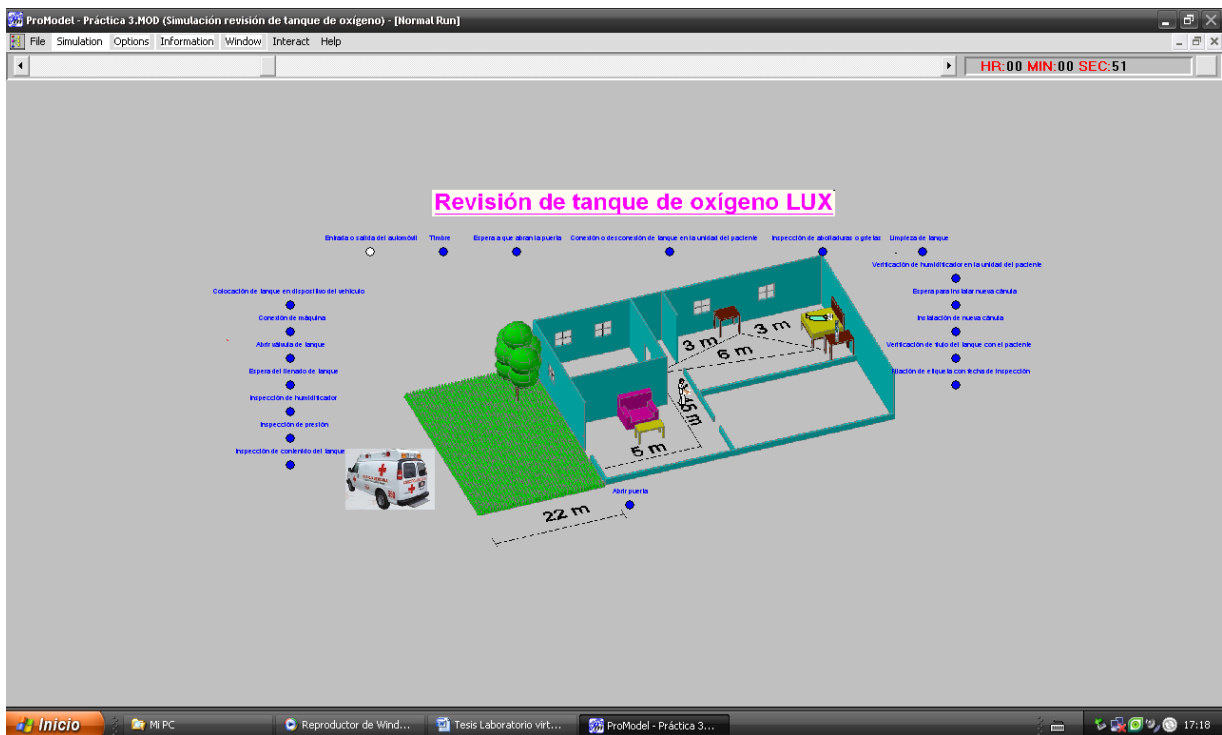
Anexo 5. Imagen de la práctica 2



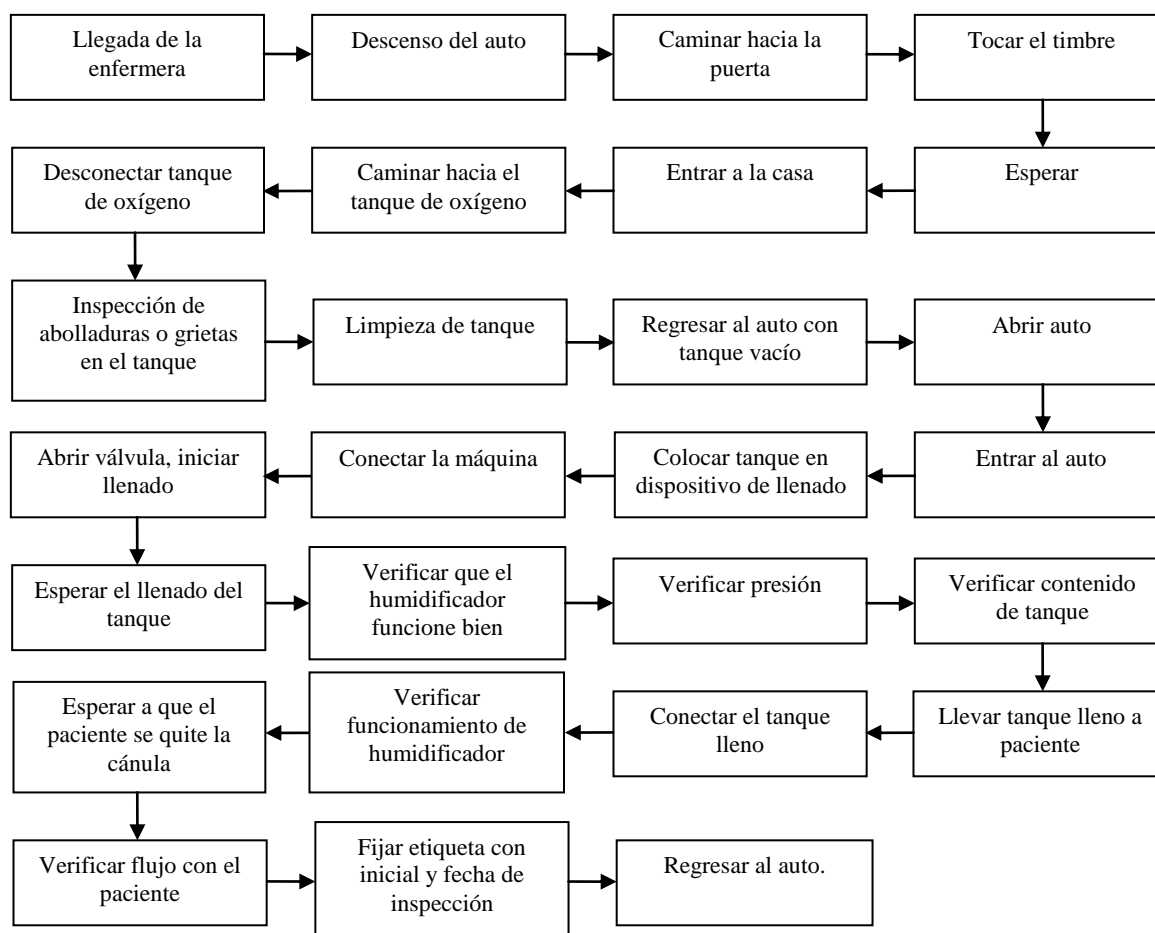
Anexo 6. Diagrama de flujo de la práctica 2



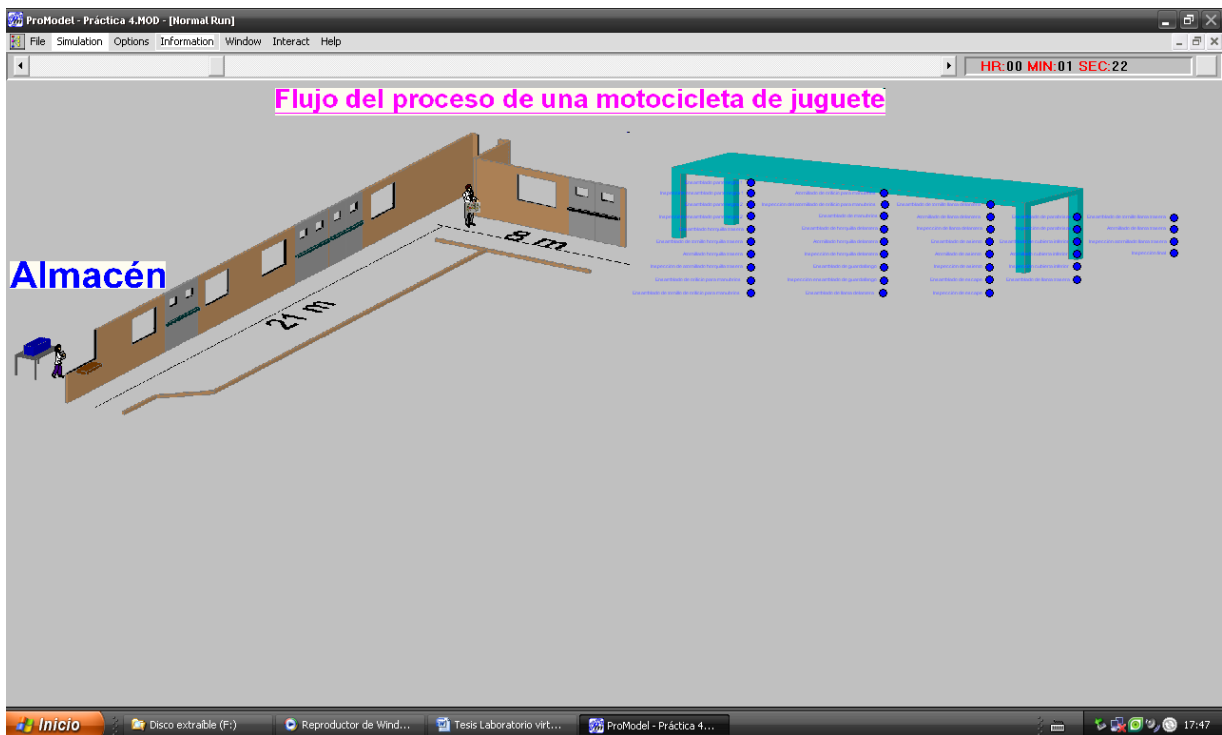
Anexo 7. Imagen de la práctica 3



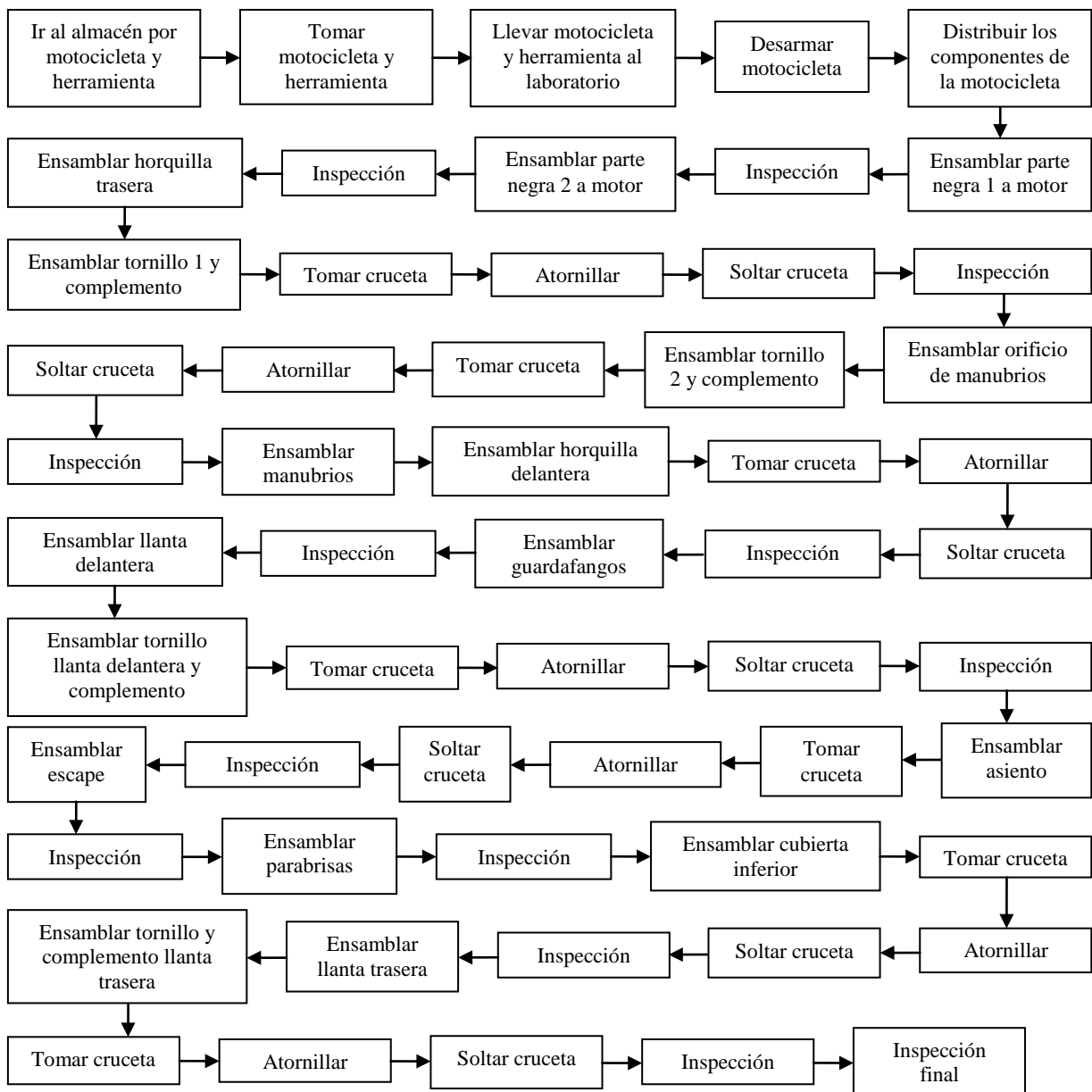
Anexo 8. Diagrama de flujo de la práctica 3



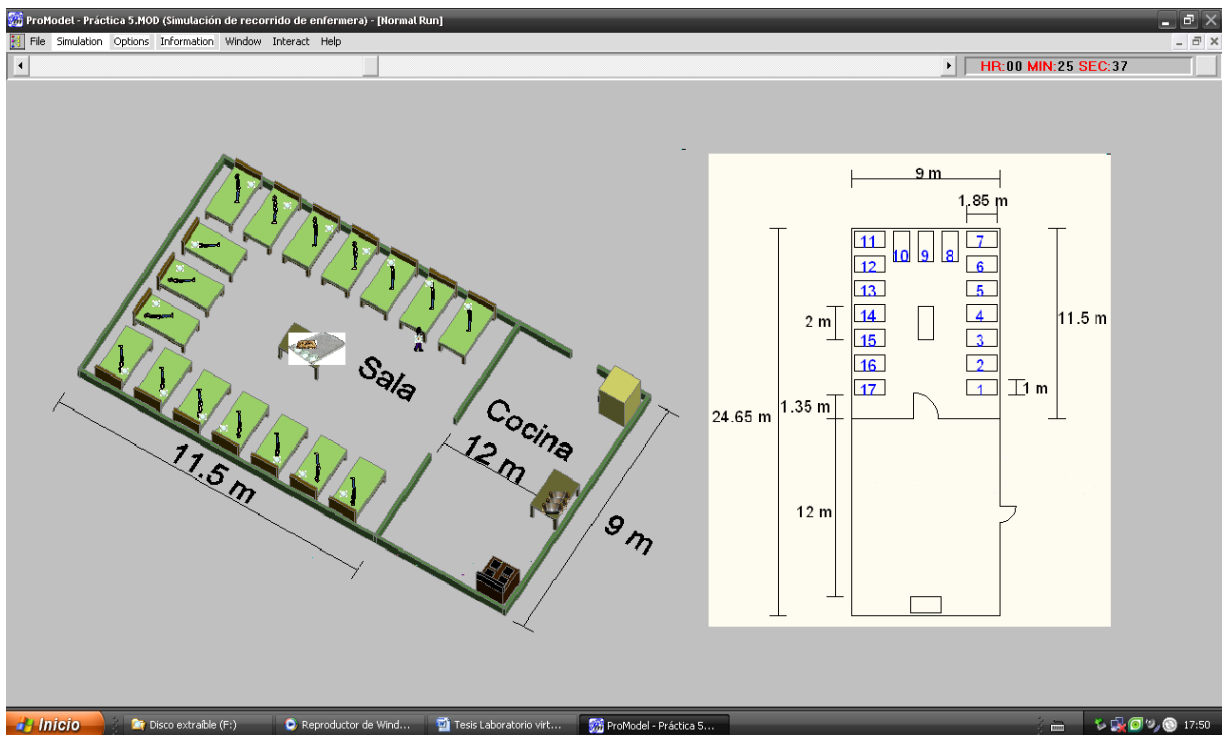
Anexo 9. Imagen de la práctica 4



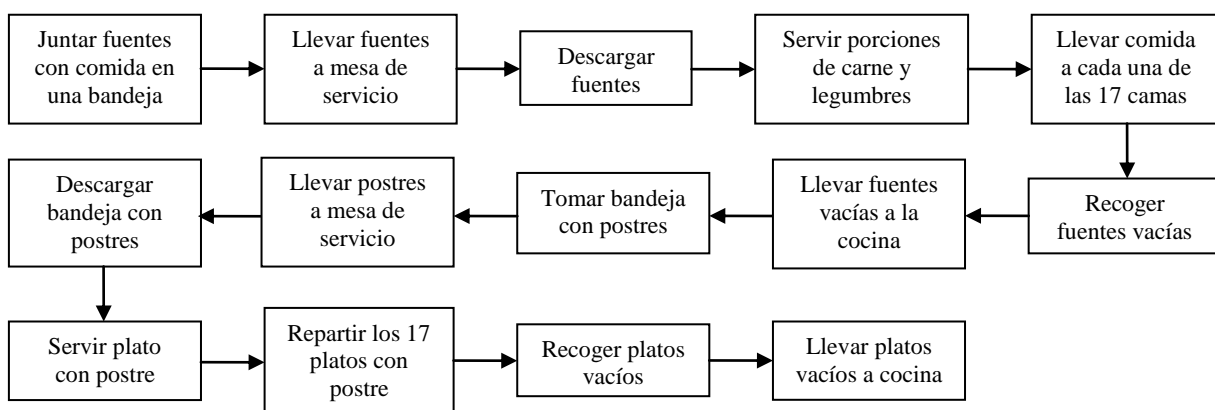
Anexo 10. Diagrama de flujo de la práctica 4



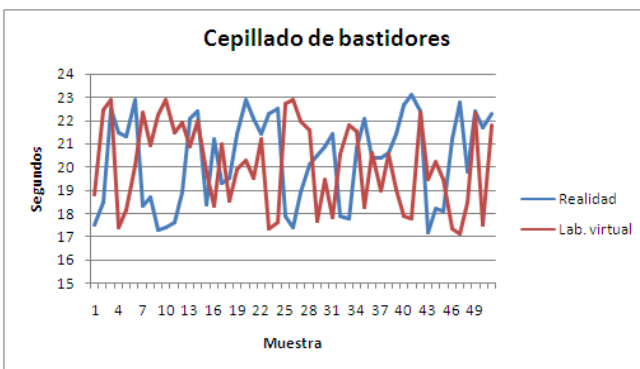
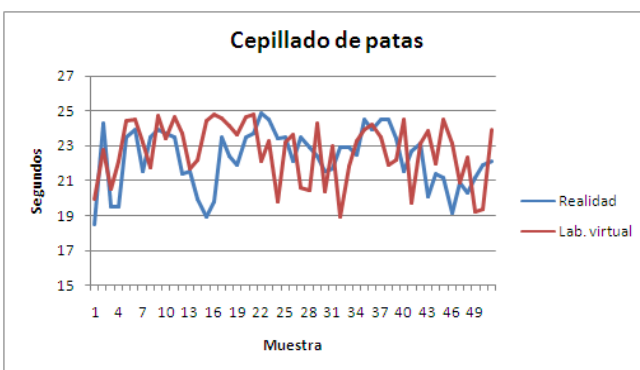
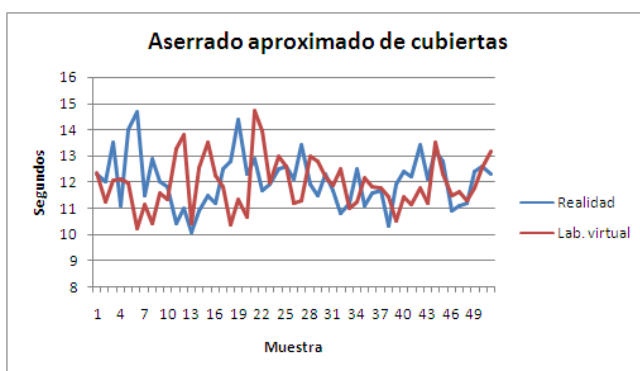
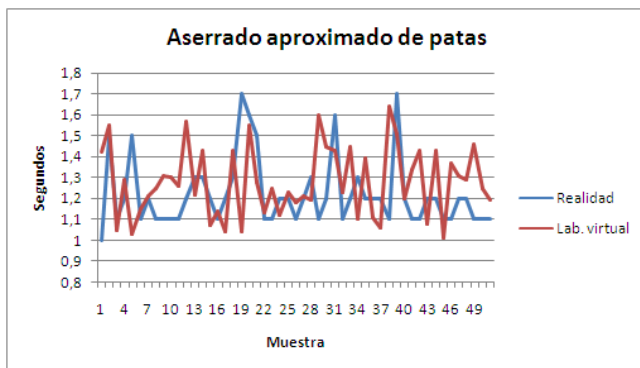
Anexo 11. Imagen de la práctica 5



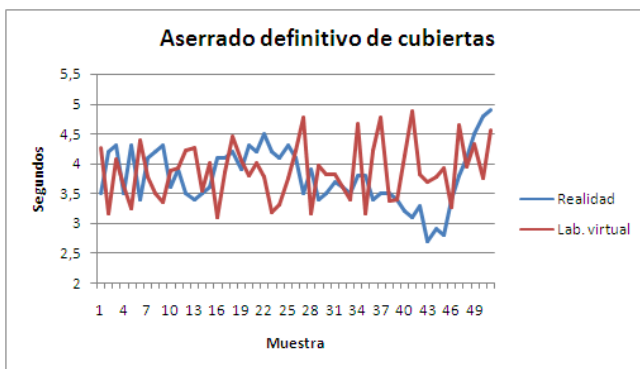
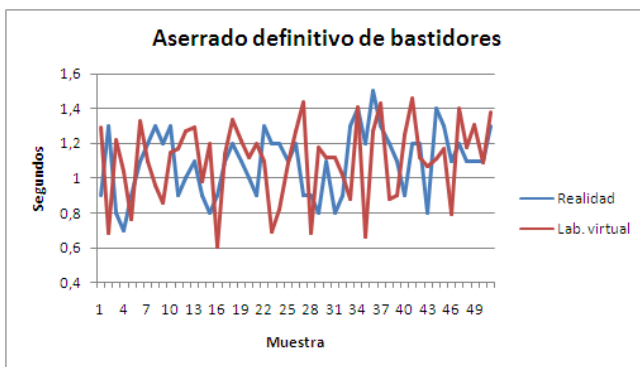
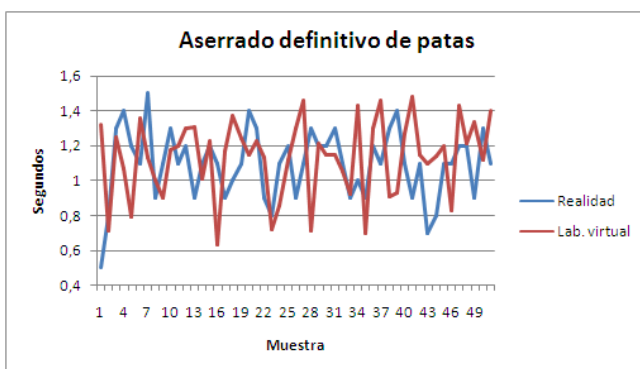
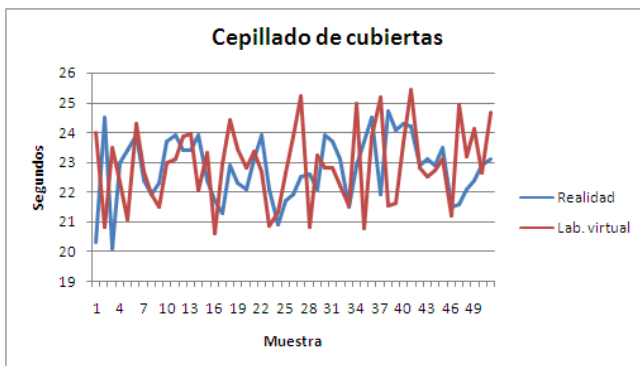
Anexo 12. Diagrama de flujo de la práctica 5



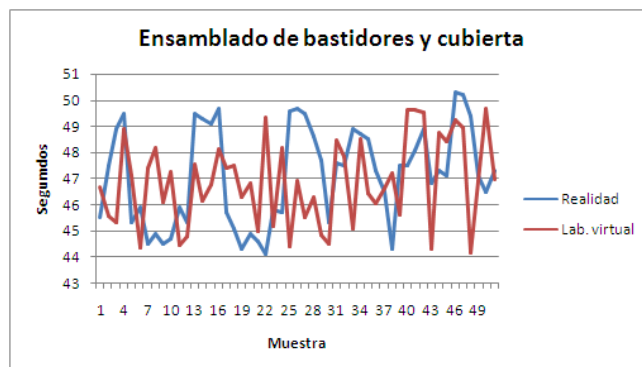
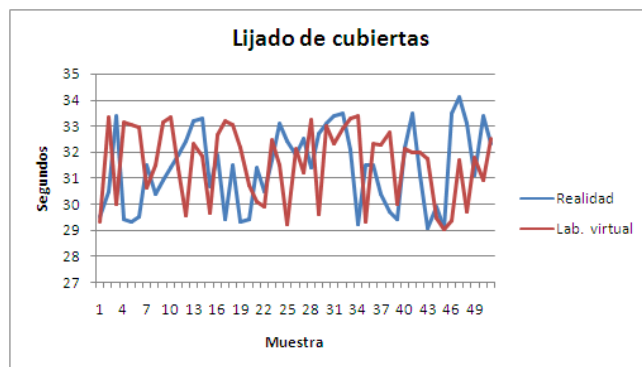
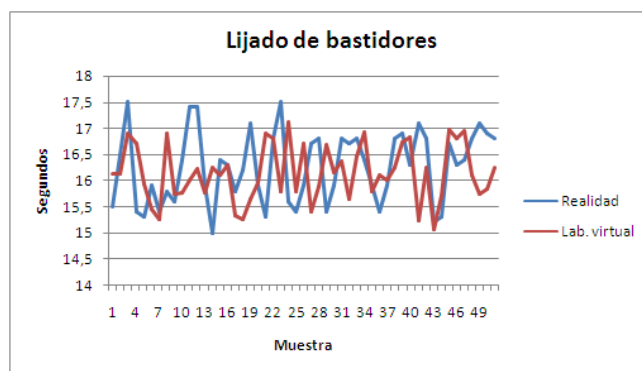
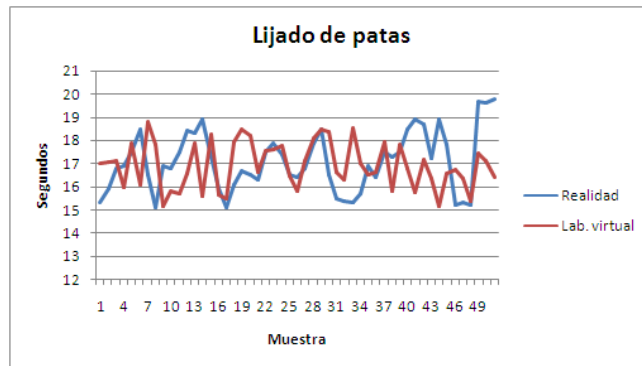
Anexo 13. Gráficas comparativas de la práctica 1



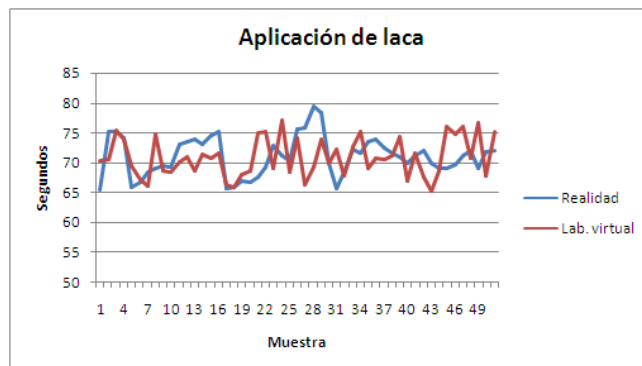
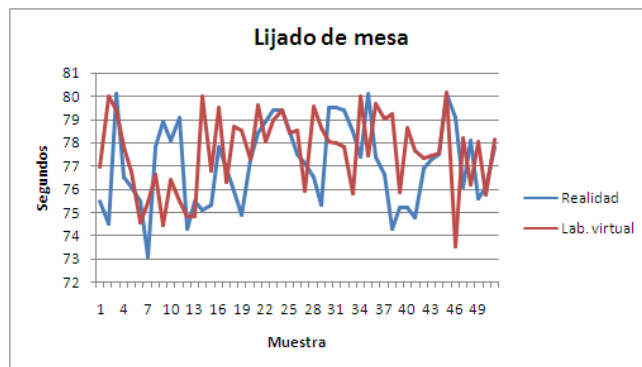
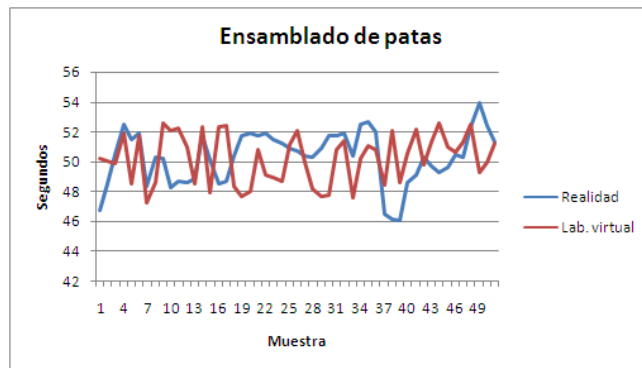
Anexo 13 (continuación)



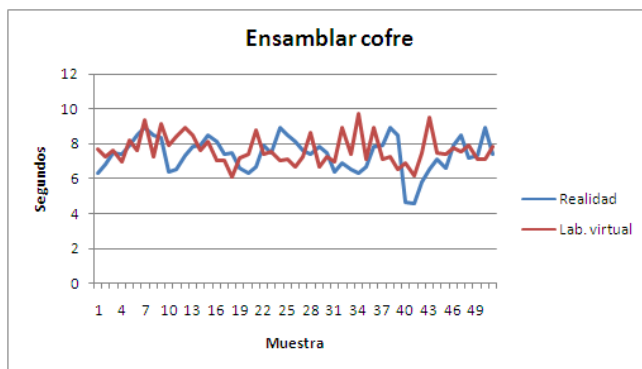
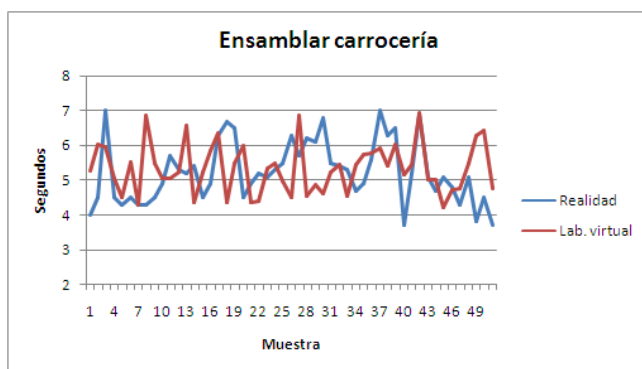
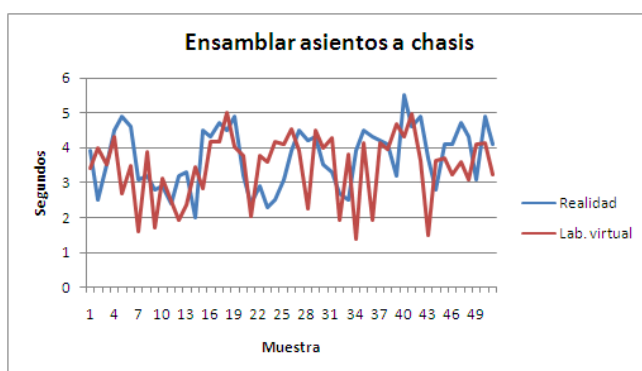
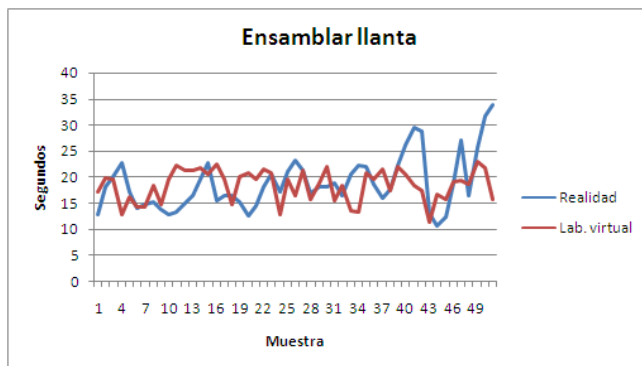
Anexo 13 (continuación)



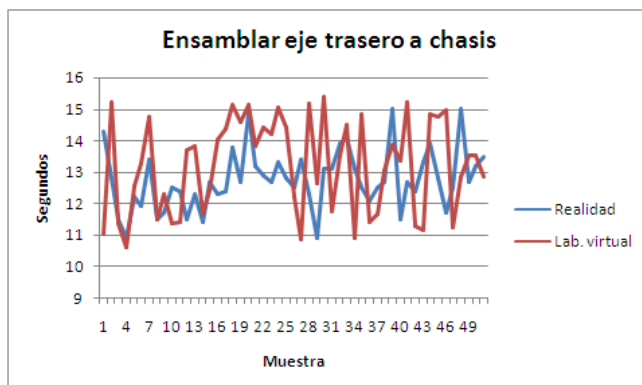
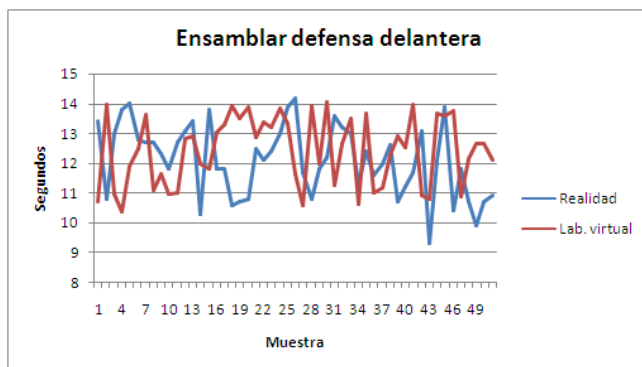
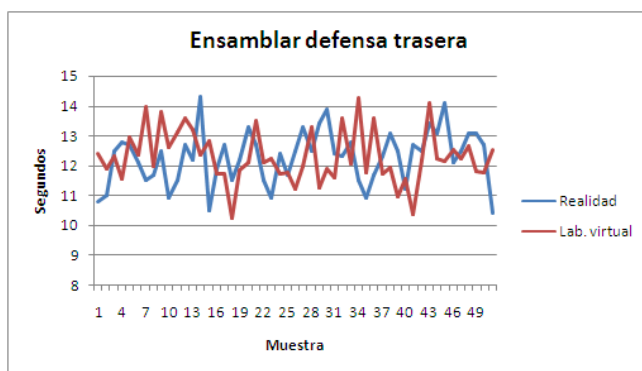
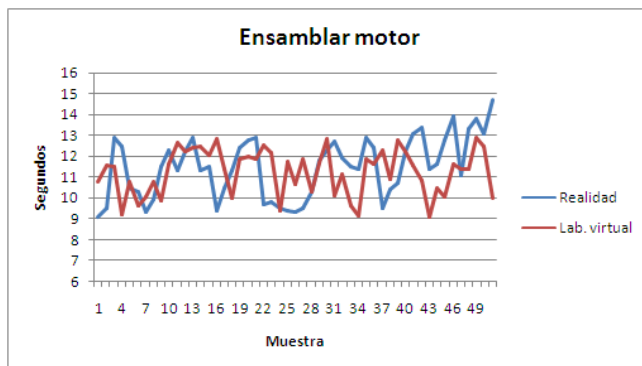
Anexo 13 (continuación)



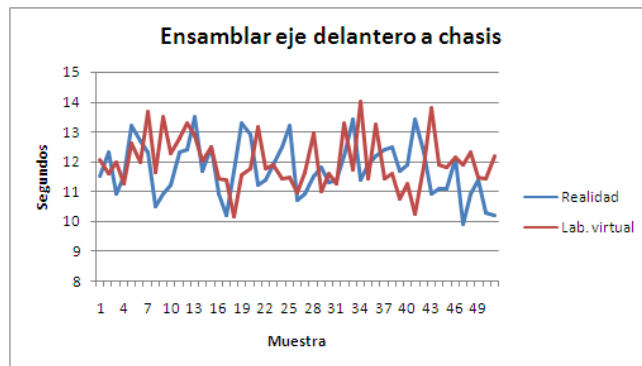
Anexo 14. Gráficas comparativas de la práctica 2



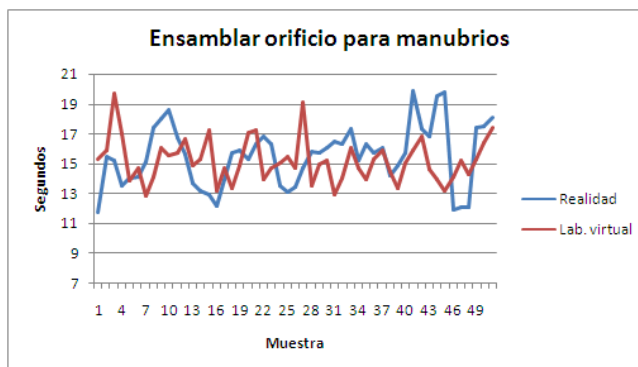
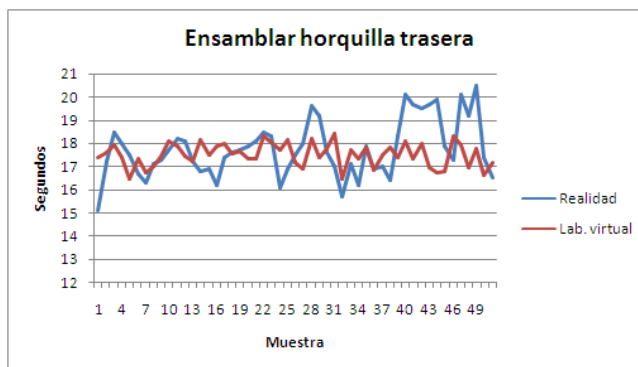
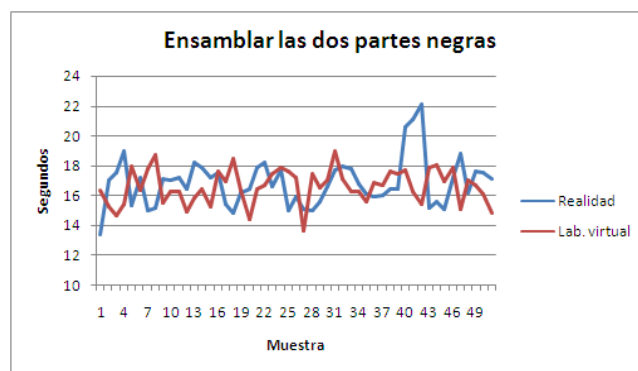
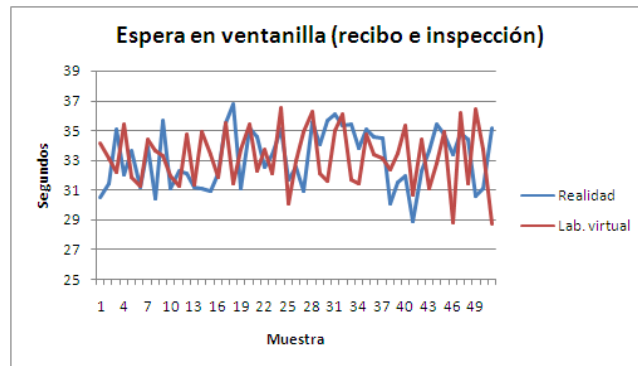
Anexo 14 (continuación)



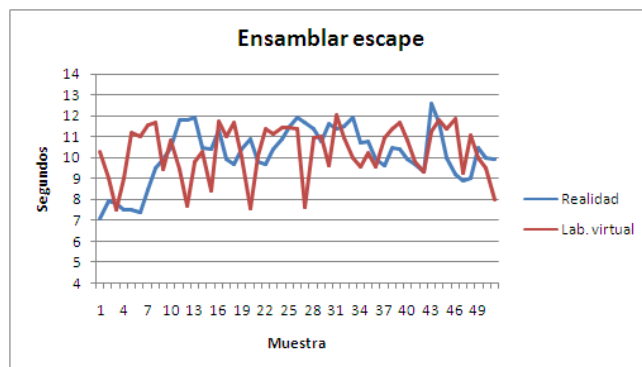
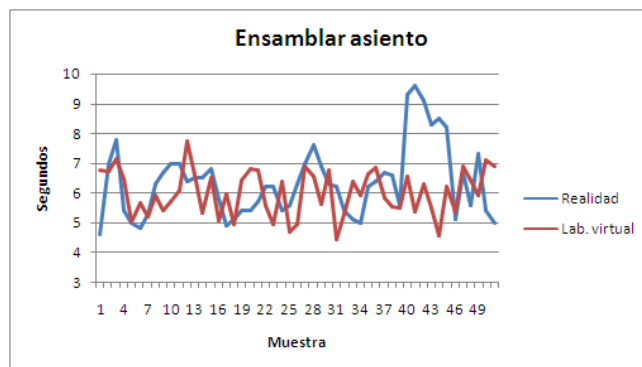
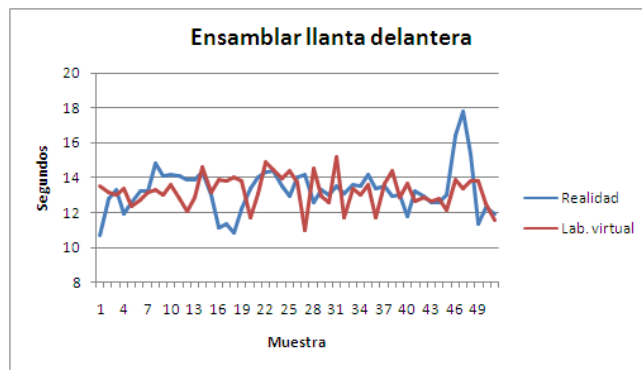
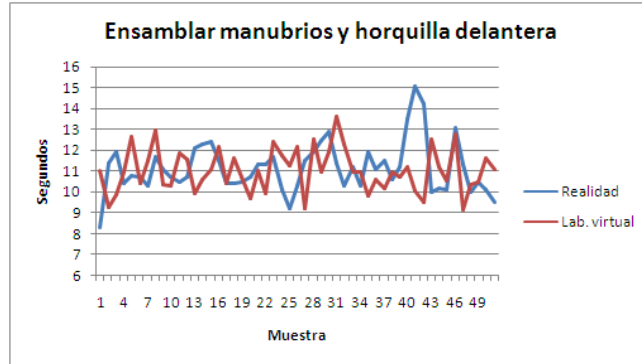
Anexo 14 (continuación)



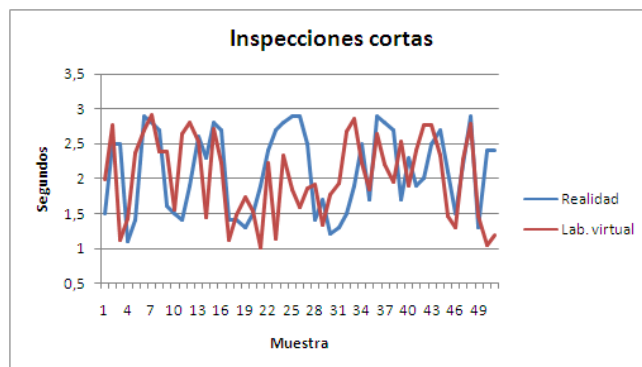
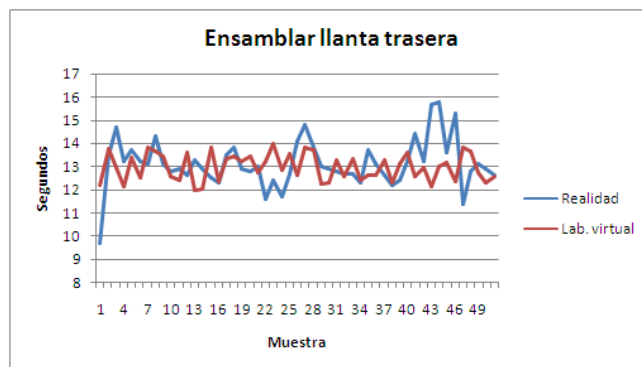
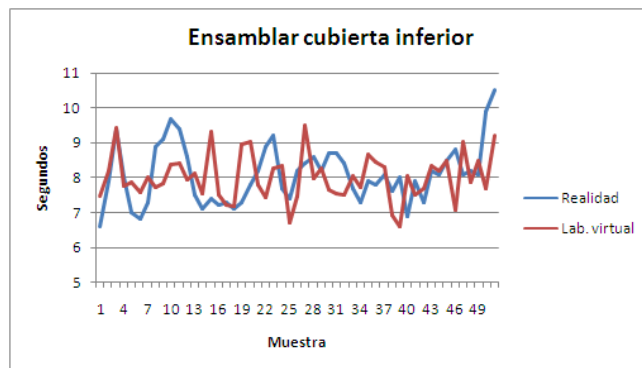
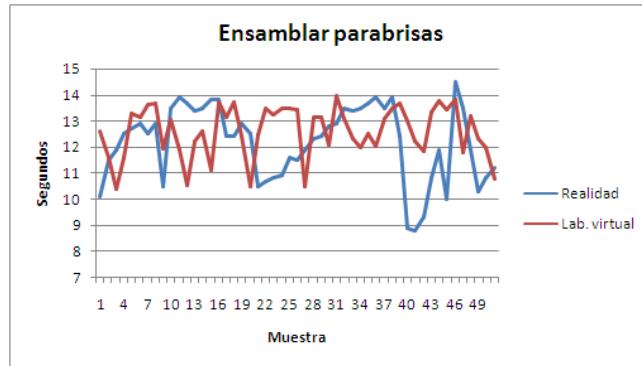
Anexo 15. Gráficas comparativas de la práctica 4



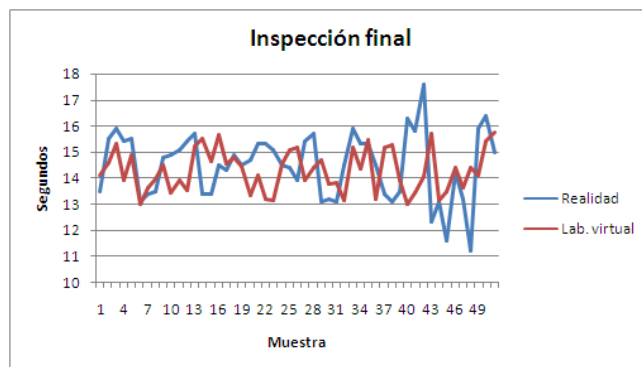
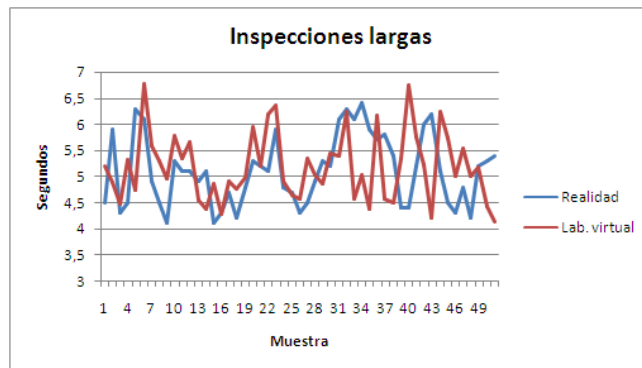
Anexo 15 (continuación)



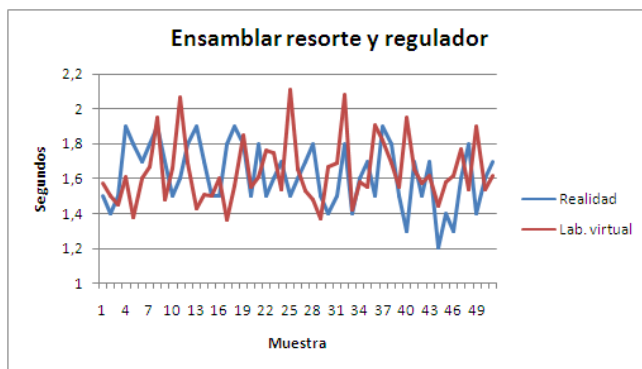
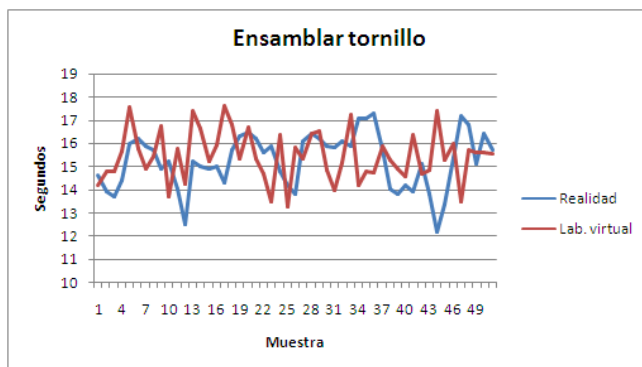
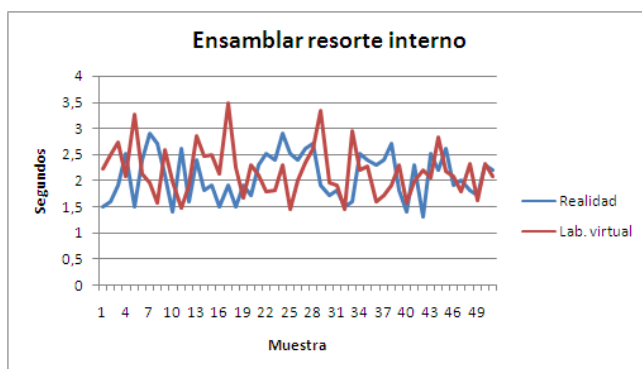
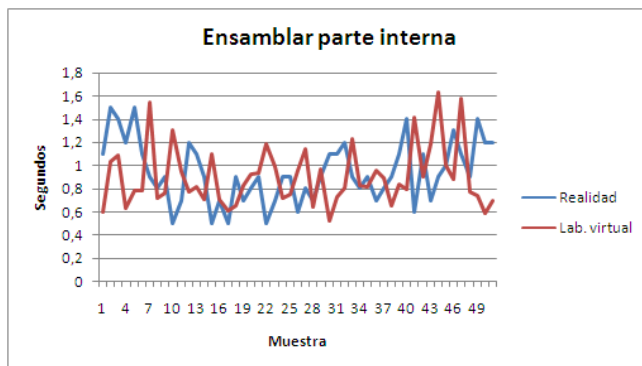
Anexo 15 (continuación)



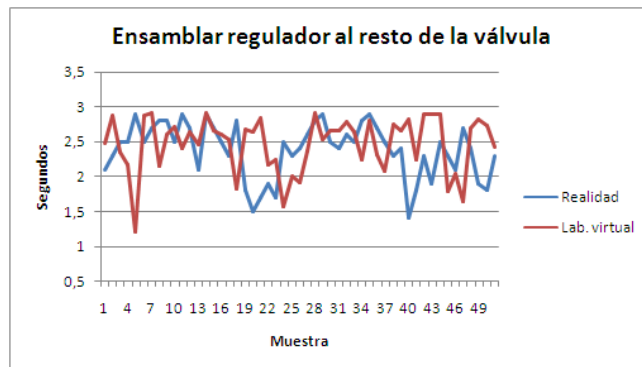
Anexo 15 (continuación)



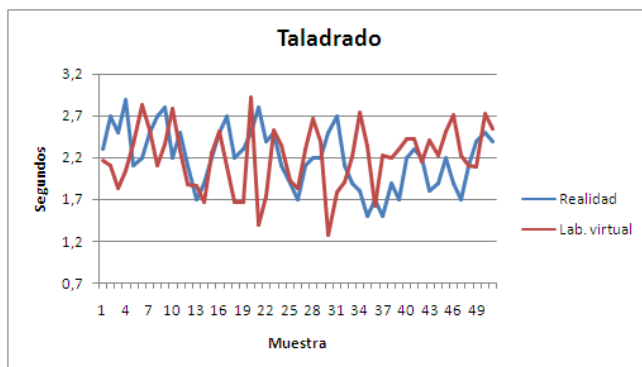
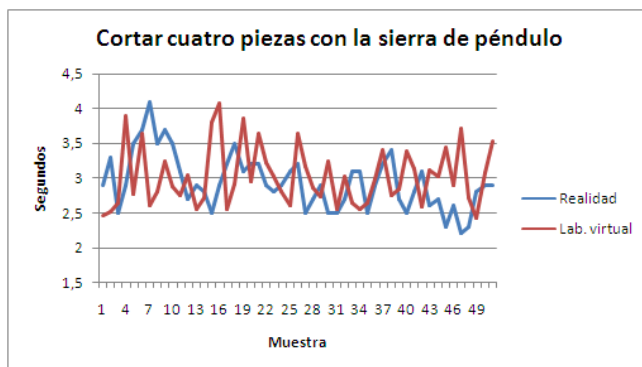
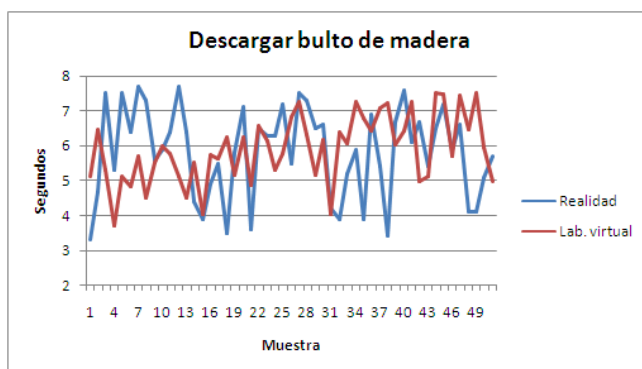
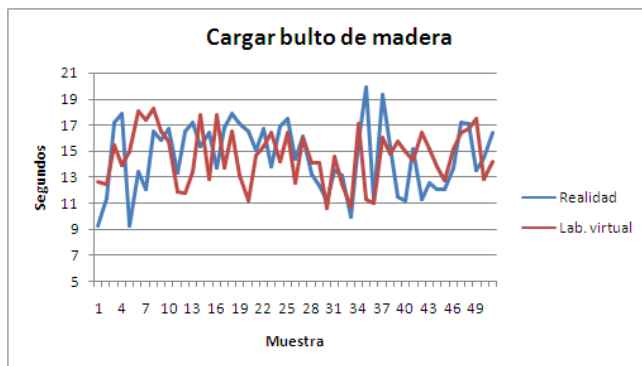
Anexo 16. Gráficas comparativas de la práctica 7



Anexo 16 (continuación)



Anexo 17. Gráficas comparativas de la práctica 8



Anexo 17 (continuación)

