



SISTEMAS DINÁMICOS PARA EL MANTENIMIENTO DE TURBINAS AERONÁUTICAS III

**TRABAJO FIN DE MÁSTER
Máster en Matemática Computacional**

Curso a distancia (2013-2015)

Presentado por: Francisco Antonio Buendía Hernández.

Director: Dr. Juan Carlos Momparler Pechuan

Castellón, noviembre 2015

Índice

1	Introducción y motivación.	5
2	Objetivos.	6
3	Selección de variables.	7
3.1	Medidores de actuación.	7
3.2	Elementos del sistema.	7
3.2.1	Modelo 1. Lanzar un proceso de trabajo al Taller.	7
3.2.2	Modelo 2. Control de tareas de Taller.	10
3.2.3	Modelo 3. Aseguramiento de la calidad.	12
3.2.4	Modelo 4. Comprobación de parámetros de motor en banco de pruebas.	16
3.2.5	Modelo 5. Proceso de preparación y entrega de motor reparado.	20
4	Análisis de sensibilidad.	24
4.1	Simulación 1. Variación de la calidad.	24
4.2	Simulación 2. Variación de la capacidad de taller.	26
4.3	Simulación 3. Un menor retraso en la detección de fallos.	27
4.4	Simulación 4. Cambio en la duración de TAT.	28
5	Métodos de validación a emplear.	29
5.1	Validación de la estructura.	29
5.2	Validación del comportamiento del modelo.	30
6	Conclusiones.	31
7	Bibliografía.	32
8	Ecuaciones del modelo.	33

Figuras y tablas del documento.

- Fig. 1. Diagrama del Modelo 1.
- Fig. 2. Gráfica del Proceso 2 y gráfica de ambos procesos 1 y 2 del Modelo 1.
- Fig. 3. Diagrama del Modelo 2.
- Fig. 4. Gráficas del Proceso 2 y Proceso 1 del Modelo 2.
- Fig. 5. Gráficas del Proceso 2 y Proceso 1 del Modelo 2, con una tasa de reparación de 15 módulos/semana.
- Fig. 6. Gráfica del Modelo 3. Aseguramiento de Calidad.
- Fig. 7. Gráfica de procesos 1 y 2 del Modelo 3.
- Fig. 8. Gráfica de fallos del Modelo 3.
- Fig. 9. Gráfica de fallos del Modelo 3, aumentando a 24 módulos/semana
- Fig. 10. Gráficas del Proceso 3 y fallos detectados.
- Fig. 11. Detalle de la variable auxiliar "Retraso por fallos".
- Fig. 12. Diagrama del Modelo 4.
- Fig. 13 Comportamiento del Fallo detectado en función de las distribuciones de look up.
- Fig. 14. Gráfica de fallos del Modelo 4.
- Fig. 15. Gráfica de Procesos 1 y 2 del Modelo 4.
- Fig. 16. Comportamiento del Proceso 3 y Fallos detectados para 10 mód/sem, y 24 mód/sem.
- Fig. 17. Diagrama del Modelo 5.
- Fig. 18. Gráfica de la Tasa de reparación del Modelo 5.
- Fig. 19. Comportamiento de los Procesos 1 y 2 en el Modelo 5.
- Fig. 20. Gráfica y tabla de variación de fallos en función del coeficiente de calidad.
- Fig. 21. Análisis de sensibilidad de la mejora porcentual de calidad (5%) sobre la Tasa de reparación.
- Fig. 22. Simulación 2. Variación de Capacidad de taller.
- Fig. 23. Tasa de reparación para diferentes capacidades.
- Fig. 24. Simulación 3, disminución retrasos por fallos.
- Fig. 25. Simulación 4. Aumento del TAT, efecto en la Tasa de reparación.
- Fig. 26. Simulación 4. Aumento del TAT, efecto en los fallos detectados.
- Fig. 27. Chequeo de las unidades del Modelo 5.
- Fig. 28. Comparativa gráfica de datos iniciales (Modelo 5) vs. Inspección de calidad.

Resumen

La Dinámica de Sistemas se estudia sistemas donde el estado de sus elementos varía con el tiempo, lo cual está en contraposición a un sistema estable y en equilibrio, a los que se denomina "sistemas estáticos". Por tanto, podemos decir, que la dinámica de sistemas se desarrolla en torno a dos aspectos muy concretos; uno es la noción de sistema dinámico, el otro será el concepto de realimentación. La realimentación será la encargada de conseguir una estabilidad del modelo, pues se ocupa de regular los distintos flujos y de controlar el aumento o disminución de las variables [Aracil, J. 1].

Otra de las características principales que se persigue mediante el estudio de sistemas a través de esta metodología es el análisis de sensibilidad, el cual pretende establecer en qué medida se altera el comportamiento normal del modelo como consecuencia de la alteración de uno de sus parámetros.

El presente trabajo fin de Máster utiliza la Dinámica de Sistemas aplicada al entorno de mantenimiento aeronáutico. Para ello se creará un modelo que simule los procesos de reparación y puesta en servicio, donde intervienen los principales parámetros de las áreas de negocio de un centro de mantenimiento de motores aeronáuticos. Este modelo nos ayudará a conocer la influencia de los principales parámetros que intervienen en los procesos de gestión de la reparación, puesta en servicio y la realimentación necesaria cuando ocurren fallos. En concreto se empleará un modelo de simulación progresiva desarrollado en el software Vensim®.

No obstante, este modelo podría configurarse para otros sectores de mantenimiento industrial, en los que la Dinámica de Sistemas simule procesos de gestión similares, analizando cómo mejorar los parámetros y variables y mitigar posibles problemas en la gestión del mantenimiento.

Palabras clave: Mantenimiento, sistemas dinámicos, Tiempo de reparación y entrega (TAT), mejora de parámetros de mantenimiento.

Abstract.

System Dynamics analyses system where the state of the elements varies over time is studied, which is opposed to a stable system in equilibrium, which is called "static systems". Therefore, we can say that the system dynamics is developed on two specific aspects; one is the notion of system dynamic, the other is the concept of feedback. The feedback will be responsible for achieving stability of the model, since it is responsible for regulating different flows and to control the increase or decrease of the variables [Aracil, J. 1].

Another major feature pursued by studying systems through this methodology is the sensitivity analysis, which seeks to establish to what extent the normal behaviour of the model is altered as a result of the alteration of one of its parameters.

This paper uses system dynamics applied to aircraft maintenance environment. A model for simulating the processes of repair and commissioning, which involved the main parameters of the business areas of a central maintenance of aircraft engines will be created. This model will help us to determine the influence of the main parameters involved in the management processes of repair and commissioning, and feedback when failures occur. In particular a model of progressive simulation software developed in Vensim® is used.

However, this model could be configured for other sectors of industrial maintenance, which simulate system dynamics similar management processes, analysing how to improve the parameters and variables and mitigate potential problems in maintenance management.

Keywords: Maintenance, dynamic systems, Turn Around Time (TAT), repairing process improvement maintenance parameters.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.

1 Introducción y motivación.

En el proceso de conceptualizar el proceso de mantenimiento y crear el modelo, vamos a seguir un procedimiento progresivo [Martín, J. 10]. Se empezará con la estructura más simple del problema, para irlo mejorando en sucesivas versiones del modelo. Esta es una técnica útil ya que nos proporciona etapas en las que el modelo nos reproduce bien algunos aspectos de la realidad, a la vez que nos muestra aspectos donde debe ser mejorado. Iremos simulando en cada una de las etapas, y viendo el efecto de los cambios introducidos en relación con la etapa anterior.

Este trabajo está orientado a desarrollar un modelo de Dinámica de Sistemas para el proceso de un Centro de Mantenimiento de Turbinas de Gas Aeronáuticas, explicando los siguientes aspectos [Sterman J., 12]:

- a) Objetivos y fase secuencial de construcción,
- b) Partes en las que se divide el modelo y elementos que lo integran,
- c) Principales ecuaciones características y sus variables,
- d) Métodos que se emplean para validación.

En este documento denominaremos a las Turbinas de Gas de forma genérica ‘motores’ y los elementos que lo constituyen les denominaremos, también de forma genérica, como ‘módulos’.

El modelo de negocio que vamos a realizar consiste en dar servicio de mantenimiento a clientes que son operadores de flotas de aviones. Para ello, vamos a modelar la gestión de un centro de mantenimiento de motores aeronáuticos, influyendo en sus principales parámetros de gestión, con la siguiente estructura:

- a) **Modelo 1.** Lanzar un proceso de trabajo al taller. Éste puede desglosarse de la forma siguiente:
 - Proceso 1. Variable de nivel que trata las acciones pendientes de mantenimiento: recepción de motor, limpieza, inspección, desmontaje modular, reparación montaje y pruebas en banco.
 - Tasa de reparación, variable de flujo que controla el trabajo de mantenimiento identificadas en el proceso 1.
 - Proceso 2. Variable de nivel que gestiona la finalización de las actividades de mantenimiento como es la certificación del motor probado.
- b) **Modelo 2.** Control de tareas de Taller, se trata del mecanismo que detiene el proceso cuando la tarea de mantenimiento finaliza y controla las siguientes variables auxiliares:
 - Tareas previstas.
 - Tareas finalizadas.
- c) **Modelo 3.** Aseguramiento de la Calidad. Comprueba si ha habido fallos durante el proceso del mantenimiento, o si debe repetirse alguna de las tareas mal realizada. Para ello incluiremos el Proceso 3 como variable de nivel del proceso de calidad, denominado NFF “No Fault Found”.
- d) **Modelo 4.** Comprobación de parámetros de motor en banco de pruebas. Una vez realizada la reparación el motor se envía a banco de pruebas para comprobar las prestaciones y parámetros característicos de los motores.
- e) **Modelo 5.** Proceso de preparación y entrega de motor reparado, evaluando:
 - Medir la duración de la reparación (TAT).
 - Evaluar la capacidad de trabajo del taller.

CAPÍTULO 2. OBJETIVO DEL MODELO.

2 Objetivos.

En el proceso de creación del modelo utilizaremos el programa de simulación Vensim® (Ventana de Simulación) para que nos muestre con claridad los efectos de los cambios que nosotros estamos haciendo en la estructura del modelo. Es importante saber interpretar las simulaciones que vamos a realizar y para ello, es conveniente que antes de cada simulación tengamos unas expectativas claras de lo que esperamos que ocurra, de forma que los resultados del modelo nos sirvan para confirmar nuestras expectativas.

Nota 1: El paquete Vensim® [Modeling Guide 13] es una herramienta visual que permite conceptualizar, documentar, simular y analizar sistemas dinámicos. Proporciona una forma flexible de construir modelos a partir del diseño del diagrama de acumulación y flujo. También permite crear relaciones entre diferentes variables de forma rápida y sencilla para mostrar las relaciones causales del modelo. Y crear la formulación entre las distintas variables.

La necesidad de tener un modelo de esta organización de mantenimiento viene dada por la necesidad de tener control de los tiempos de entrega de los motores reparados, pues a veces se dan retrasos en la entrega, siendo los principales factores de dichos retrasos:

- Problemas de planificación del repuesto.
Éstos se producen bien por la ausencia de herramientas de gestión eficaz o también debido a modelos de gestión poco fiables en las previsiones.
- Problemas en la previsión de carga de trabajo en taller.
En ocasiones la falta de previsión desencadena la llegada al centro de mantenimiento de un motor o módulos que exceden la capacidad productiva. Y en otras ocasiones ocurre lo contrario, se encuentra la plantilla del Taller parada, por falta de carga de trabajo.
- Problemas debidos a no-conformidades de calidad.
Se produce cuando el material reparado no pasa los controles de calidad o pruebas de banco, debiendo repetir el proceso de inspección y reparación. Obviamente esto genera retrasos o cuellos de botella en el proceso de mantenimiento.

El modelo que vamos a construir permitirá conocer la influencia de los principales parámetros que intervienen en los procesos de gestión de mantenimiento y actuando sobre las variables características que intervienen, veremos cómo prevenir los problemas que hemos enunciado.

Adicionalmente y aprovechando las posibilidades del modelo, se podrían estudiar otros objetivos secundarios, como son:

- a) Identificar la capacidad óptima de taller para mejorar el TAT (Tiempo de la reparación).
- b) Identificar las causas de retrasos u otros factores que afectan al comportamiento del sistema, con el fin de poder introducir mejoras en la gestión y mitigar sus efectos.

El tiempo es la variable de integración del sistema, en este caso se medirá en semanas, pues es la unidad en la que se va a medir si el motor llega en el plazo indicado. El horizonte temporal viene determinado por la cantidad de días que serán necesarios para simular una visión del proceso completo, es decir, desde que se recibe de un cliente un pedido solicitando la reparación de un motor o cualquiera de los módulos que lo forman, hasta que se entregan reparados y probados. Vamos a tomar como horizonte temporal 24 semanas.

En este modelo ponemos TIME STEP = 0,25 porque si TIME STEP=1 haríamos 24 pasos en la simulación (Final Time – Initial Time = 24 - 0), pero en este caso queremos que se haga el cálculo cada 2 días. Ponemos 2 días expresados en semanas = 2 días x (52 semanas / 365 días) = 0,284 y escogemos la opción predeterminada más próxima, que es 0,25.

CAPÍTULO 3. ARQUITECTURA DEL MODELO.

3 Selección de variables.

En este capítulo se explican las variables características del sistema y los principales parámetros sobre los que se podrá influir.

3.1 Medidores de actuación.

Existen diferentes medidores tanto cualitativos, que reflejan conceptos difíciles de medir, como cuantitativos, que permiten ser medidos y mejorados [Sterman, 12]. Dentro de los cuantitativos podemos encontrar las tasas de preparación para la reparación, procesado y preparación de envío, que permiten conocer el tiempo de mantenimiento y entrega del motor reparado que nos ha pedido un cliente, y que agruparemos en la variable de flujo “Tasa de reparación” y otras variables auxiliares asociadas, que se irán relacionando en los modelos progresivos.

3.2 Elementos del sistema.

Para el desarrollo del modelo es necesaria la construcción de una estructura que facilite entender las relaciones de influencia que existen entre los elementos que forman el sistema, aportando la visión del negocio, que iremos complementando conforme aumentemos en número de variables y relaciones en el modelo.

3.2.1 Modelo 1. Lanzar un proceso de trabajo al Taller.

La característica fundamental de una actividad de mantenimiento es que hay un trabajo que hacer progresivamente y que el tiempo para realizarlo es limitado, para ello se va a seguir un esquema muy parecido al que Vensim® detalla en el ejemplo de su manual de “Gestión de tareas, dinámica de un proyecto”, ([Martín, J. 10] y [Vensim, 13]). Vamos a ir introducir estos conceptos en los modelos pero orientando los conceptos al alcance de las tareas de un mantenimiento.

En el Modelo 1 el “Proceso 1” identifica la variable de nivel que agrupa las tareas de mantenimiento. Cuando todas estas tareas están realizadas y el motor se comprueba que está reparado y puede ser entregado, se tiene el “Proceso 2”. La velocidad con la que las tareas se realizan se define como “Tasa de reparación”. Obviamente dicha tasa dependen del número de trabajadores y de la eficiencia con la que trabajan.

Sobre la base de este breve escenario, evidentemente hay dos variables de nivel, una donde el trabajo se recibe y otra donde se acumula el mantenimiento realizado, en el variable de control que es la que gestiona que el trabajo recibido es reparado y pasa al estar terminado. En cuanto a las unidades de medida las variables de nivel vendrán medidos en el número de módulos a reparar (Proceso 1) y reparados y completados (Proceso 2), en cuanto a la Tasa de reparación, es una variable de flujo, las unidades de medida será módulos/semana.

Nota 2: [Forrester, J. 8]. Las variables que utilizamos en este modelo se pueden agrupar en:

- Variables de Nivel: constituyen aquel conjunto de variables cuya evolución es significativa para el estudio del sistema. Los niveles representan magnitudes que acumulan los resultados de acciones tomadas en el pasado.
- Variables de Flujo: determinan las variaciones en los niveles del sistema. Las variables de flujo caracterizan las acciones que se toman en el sistema, las cuales quedan acumuladas en los correspondientes niveles. Dichas variables determinan como se convierte la información disponible en una acción o actuación. Debido a su naturaleza se trata de variables que no son medibles en sí, sino por los efectos que producen en los niveles con los que están relacionadas.

Las variables de nivel equivalen a las variables de estado de la teoría de sistemas. Es decir, el estado de un sistema se representa por dichas variables y su valor condiciona la futura evolución del sistema,

a partir de un instante determinado, en la medida que determinan los valores que toman las variables de flujo.

- Variables Auxiliares: Las variables auxiliares representan pasos o etapas en que se descompone el cálculo de una variable de flujo a partir de los valores tomados por los niveles. La razón de su existencia es que las ecuaciones que definen las variables de flujo son muy complejas al depender de varios niveles por lo que se corre el peligro de oscurecer el significado de las ecuaciones. Por ello, es conveniente descomponer dichas ecuaciones en componentes de menor tamaño que son las variables auxiliares”.

Las hipótesis de partida del modelo son:

- Un motor está compuesto de 12 módulos.
- La actividad de taller en 24 semanas permite reparar 20 motores.

Luego el total de módulos a mantener en 24 semanas 20 motores es:

$$20 \text{ motores} \times 12 \frac{\text{módulos}}{\text{motor}} = 240 \text{ módulos}$$

Es decir, la tasa de reparación es de 10 módulos/semana para que en 24 semanas se puedan reparar los 240 módulos.

Total de módulos a mantener 240

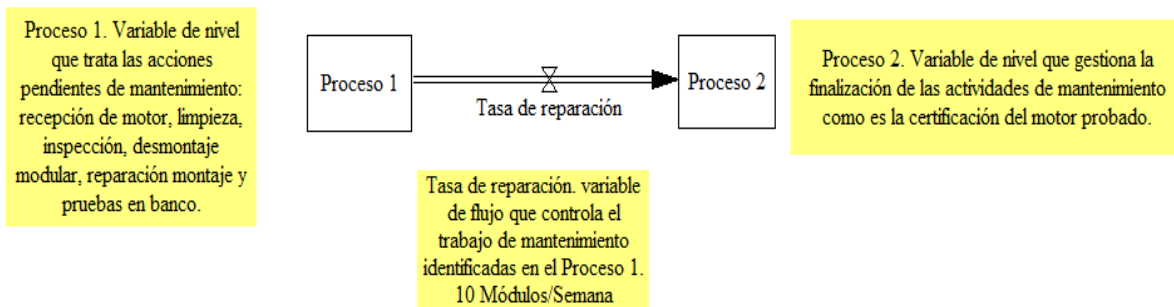


Fig. 1. Diagrama del Modelo 1.

Las ecuaciones diferenciales del modelo son las siguientes:

$$\text{Proceso 1} = \text{Total de módulos a mantener}(t_0) - \int_0^{24} (\text{Tasa de reparación}) dt$$

$$\text{Proceso 2} = \int_0^{24} (\text{Tasa de reparación}) dt$$

Las ecuaciones del Modelo 1 son:

- (1) Total de módulos a mantener= 240
Units: Módulos
Número de motores x número de módulos por motor
- (2) FINAL TIME = 24
Units: Week
The final time for the simulation.
- (3) INITIAL TIME = 0
Units: Week
The initial time for the simulation.

- (4) Proceso 1= INTEG (Tasa de reparación, Total de módulos a mantener)
Units: Módulos
Proceso 1. Variable de nivel que mide la recepción de motor, limpieza e inspección
- (5) Proceso 2= INTEG (Tasa de reparación, 0)
Units: Módulos
Proceso 2. Variable de nivel que mide el montaje del módulo reparado, pruebas y certificación.
- (6) SAVEPER = TIME STEP
Units: Week
The frequency with which output is stored.
- (7) Tasa de reparación= 10
Units: Módulos/Semana
Tasa de reparación indica la tasa de reparación, variable de flujo que controla la tasa de reparación modular por semana.
- (8) TIME STEP = 0.25
Units: Week
The time step for the simulation.

Observación 1:

- No chequear las unidades (Units Check) hasta el modelo 5.
- Si aparece un aviso del tipo "Proceso 1 y Proceso 2 is not used" es porque el software detecta que esta variable no influye en ninguna otra, y nos avisa ya que esto no es normal.

Al ejecutar el modelo es resultado es el esperado.

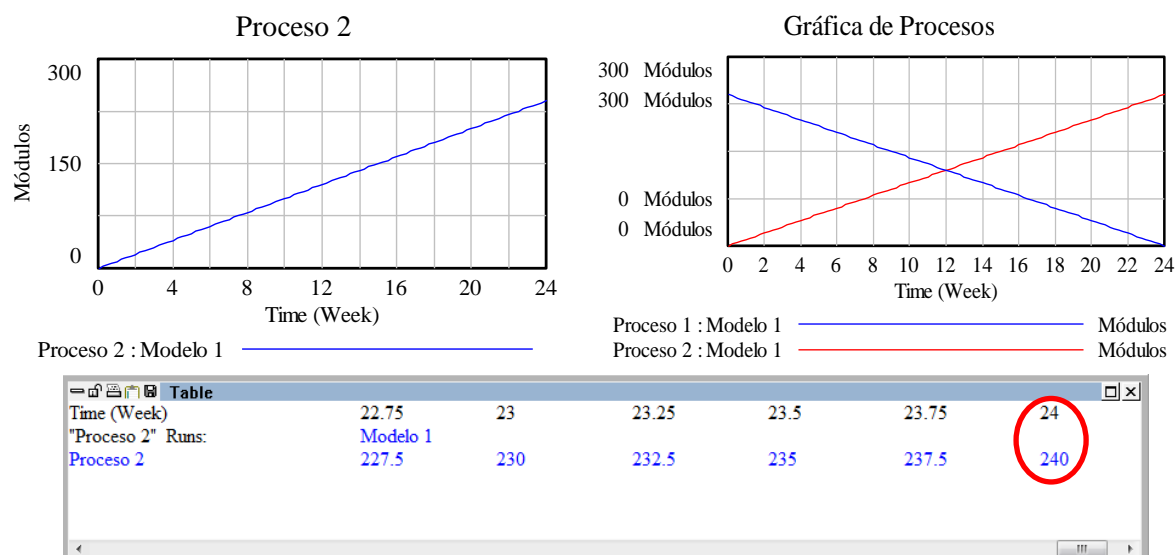


Fig. 2. Gráfica del Proceso 2 y gráfica de ambos procesos (1 y 2) del Modelo 1.

Desde del proceso 2 el mantenimiento de los 240 módulos empieza en 0 y termina a los 24 meses habiendo reparado los 240 módulos. Y la gráfica del Proceso 1, comienza teniendo un total de 240 módulos que mantener que completa en 24 meses. El comportamiento de ambas variables es completamente lineal.

Por otro lado, también observamos en la gráfica de Proceso 1 y Proceso 2, el punto de corte de ambas funciones. Es decir, que en la semana 12 el número de módulos pendientes de reparación es igual al número de módulos entregados.

Observación 2. Variación del Proceso 1.

Time (Week)	Proceso 1
0	Runs: 240
0.25	Modelo 1 237.5
0.5	Current 235
0.75	232.5
1	230
1.25	227.5
1.5	225
1.75	222.5
2	220
2.25	217.5
2.5	215
2.75	212.5
3	210
3.25	207.5
3.5	205

El proceso 1 disminuye su valor en 2,5 en cada periodo, debido a que 1 día expresado en semanas sería $1/7 = 0,14$, luego cada 2 días sería 0,28, y como se reparan 10 módulos por semana, en cada periodo de dos días se realizarán 2,8 acciones de mantenimiento. Al tomar un TIME STEP de 0,25, se divide cada semana en $1/0,25 = 4$ partes, de tal forma que en cada periodo se realizarán $10/4 = 2,5$ tareas de mantenimiento. El proceso 1 varía en función de ("-Tasa de reparación") por ese motivo en cada periodo de 2 días disminuyen 2,5.

3.2.2 Modelo 2. Control de tareas de Taller.

Es necesario introducir en el modelo un mecanismo que nos detenga el proceso cuando las tareas de mantenimiento finalicen.

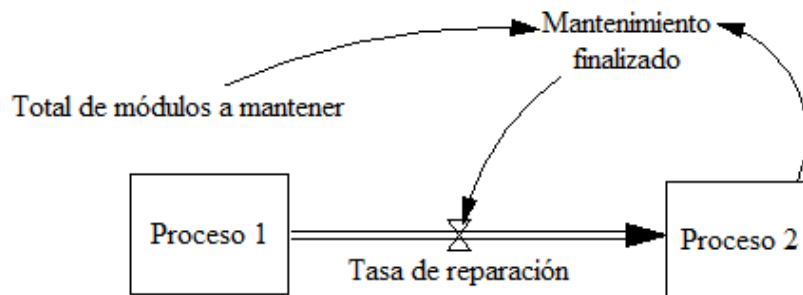


Fig. 3. Diagrama del Modelo 2.

Añadimos en el modelo la variable Mantenimiento finalizado con la siguiente lógica:

Si el Proceso 2 \geq Total de módulos a mantener (240 módulos),
Entonces devuelve 1,
Si no devuelve 0.

Es decir, cuando el Proceso 2 llega a 240 devuelve un 1 y mientras es menor al total de módulos a reparar devuelve 0.

Y en relación a la variable de flujo "Tasa de reparación" la lógica de la función indica cuando el valor de la acción de mantenimiento esté finalizada será 1 (está acabado) se harán 0 tareas.

Las ecuaciones de las variables auxiliares incluidas en el modelo son:

(1) Mantenimiento finalizado=IF THEN ELSE (Proceso 2 \geq Total de módulos a mantener,1,0)
Units: Módulos

(2) Tasa de reparación=IF THEN ELSE(Mantenimiento finalizado=1, 0, 10)
Units: Módulos/Semana

Como se plantea en las hipótesis, en la gráfica de salida del proceso de mantenimiento (Proceso 2) observamos que a las 24 semanas se finaliza el mantenimiento de los 240 módulos esperados, equivalente a 20 motores.

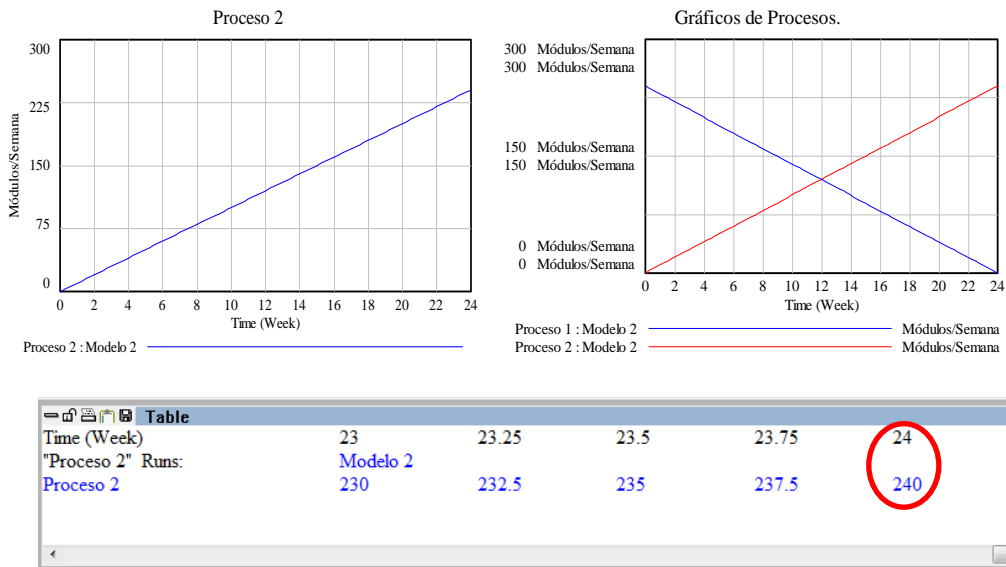


Fig. 4. Gráficas del Proceso 2 y Proceso 1 del Modelo 2.

El comportamiento que se había definido en el Modelo 1, dónde las ecuaciones diferenciales del modelo son las siguientes:

$$\text{Proceso 1} = \text{Total de módulos a mantener}(t_0) - \int_0^{24} (\text{Tasa de reparación}) dt$$

$$\text{Proceso 2} = \int_0^{24} (\text{Tasa de reparación}) dt$$

Observación 3: Si rodamos este modelo con una “Tasa de reparación” de 24 módulos/semana observamos obviamente que a las 10 semanas se tendría los 240 módulos reparados.

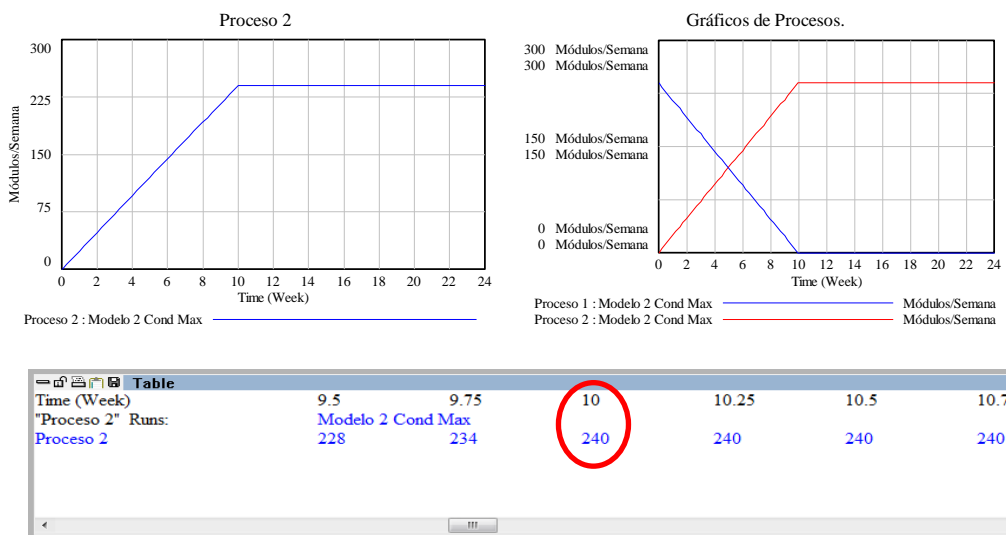


Fig. 5. Gráficas del Proceso 2 y Proceso 1 del Modelo 2, con una tasa de reparación de 24 Mód/sem.

En el siguiente modelo haremos la comparativa en función de la capacidad de mantener 10 módulos/semana, frente a una capacidad de 24 módulos/semana y su influencia sobre uno de los parámetros característicos del modelo.

3.2.3 Modelo 3. Aseguramiento de la calidad.

Este modelo comprueba si ha habido errores durante el proceso del mantenimiento o si debe repetirse alguna de las tareas de taller que tuviera fallo. Para ello incluiremos el Proceso 3 como variable de nivel acumulativa de las acciones de calidad, denominada NFF "No Fault Found", y viene dada por la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{d(\text{Proceso 3})}{dt} = \text{Fallos}(t) - \text{Fallo detectados}(t)$$
$$\text{Proceso 3} = \int_0^{24} (\text{Fallos} - \text{Fallos detectados})dt$$

El número de "Fallos" es función del coeficiente de "Inspección de calidad", dicho coeficiente puede variar entre 0 y 1. La ecuación de "Fallos" viene dada por,

$$\text{Fallos} = \text{Tasa de reparación} * (1 - \text{Inspección de calidad})$$

- Si el coeficiente de "Inspección de calidad" = 0, todos las tareas de mantenimiento presentarían fallos, es decir "Fallos" = "Tasa de reparación".
- Si el coeficiente de "Inspección de calidad" = 1, el número de fallos sería 0.

Vamos a trabajar con un rango del coeficiente de "Inspección de Calidad" entre 0,9 y 1. En este Modelo 3 utilizaremos 0,9.

Otro de los parámetros de interés en el modelo es el TAT (Time Around Time), nos da el tiempo medio de reparación y entrega. En las hipótesis iniciales hemos considerado una media de reparación de 10 módulos por semana. Es decir, para un total de 240 módulos, que componen el mantenimiento de 20 motores, se tendría un TAT de 24 semanas. Ahora bien, si se necesita disminuir el TAT a 10 semanas, la capacidad de reparación debe ser 24 módulos por semana.

En base a estas premisas vamos a trabajar con dos escenarios de reparación; uno de mínimos (capacidad de reparación de 10 módulos/semana) y otro de máximos (capacidad de reparación de 24 módulos/semana). Éstos son:

- a) TAT de 24 semanas, lo denominamos escenario de mínimos, pues consideramos que se reparan 10 módulos por semana, así la ecuación de "Tasa de reparación" = MIN (10, Proceso 1), pues el número de módulos a reparar por semana son 10. Al aplicar el coeficiente de Inspección de calidad de 0,9, el número de "Fallos" = $10 \times (1 - 0,9) = 1$, que es el número de módulos mal reparados por semana (Ver detalle en observación 4).
- b) TAT de 10 semanas, lo denominamos escenario de máximos consideramos que se reparan 24 módulos por semana, la "Tasa de reparación" = MIN (24, Proceso1), pues el número de módulos a reparar por semana son 24. Al aplicar un coeficiente de "Inspección de calidad" = 0,9, el número de "Fallos" = $24 \times (1 - 0,9) = 2,4$, que es el número de módulos mal reparados por semana (Ver detalle en observación 5).

Observación 4: Tasa de reparación = MIN (10, Proceso 1), pues el número de módulos a reparar por semana son 10, pero al aplicar en el Modelo 3 un coeficiente de "Inspección de calidad" de 0,9, el número de Fallos = $10 * (1 - 0,9) = 1$, representa la cantidad de módulos mal reparados por semana.

Por otra parte los fallos detectados generan un retraso en la tareas de mantenimiento, a dicha variable se denomina "Retraso por fallos" y le asignamos una valor constante de 2 semanas, que significa el tiempo de re-trabajo, en otras palabras, el tiempo que lleva la detección y recuperación de un módulo mal reparado. Para los "Fallos detectados" tomaremos una fracción constante del Proceso 3, representa una fracción de los errores pendientes de detectar.

$$\text{Fallos detectados} = \frac{\text{Proceso 3}}{\text{Retraso por fallos}}$$

El Proceso 1 ahora tendrá como variable de entrada el de fallos detectados, luego su ecuación es,

$$\text{Proceso 1} = \text{Total de módulos a mantener} + \int_0^{24} (\text{Fallos detectados} - \text{Tasa de reparación}) dt$$

Y el Proceso 2 mantiene la misma ecuación diferencial descrita en el Modelo 2.

$$\text{Proceso 2} = \int_0^{24} (\text{Tasa de reparación}) dt$$

El diagrama de Forrester del Modelo 3 es el siguiente:

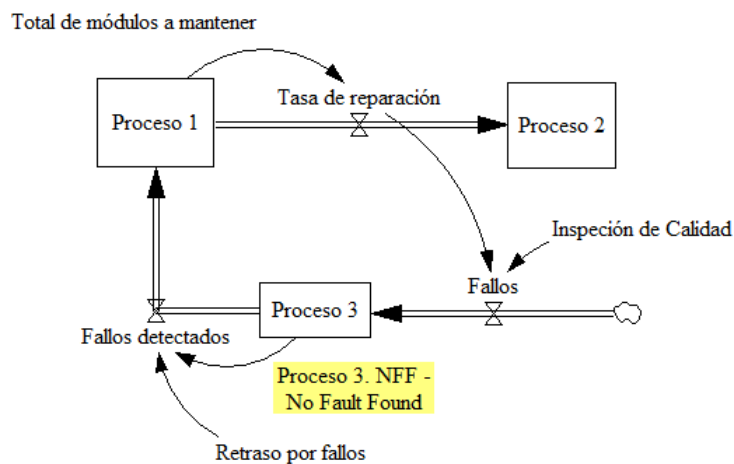


Fig. 6. Modelo 3. Aseguramiento de Calidad.

En la Figura 7 observamos que el comportamiento que ahora presentan los Proceso 1 y Proceso 2, tomando como referencia la reparación de 10 módulos/semana,

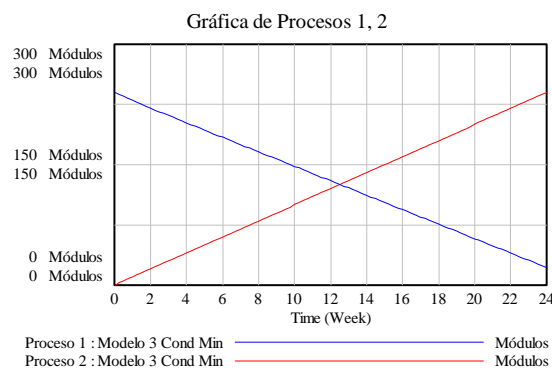


Fig. 7. Gráfica de procesos 1 y 2 del Modelo 3.

Las ecuaciones del modelo son las siguientes:

- (01) Fallos = Tasa de reparación * (1 - Inspección de Calidad)
Units: Módulos/semana
Los fallos serán función de la cantidad de trabajo hecho por el porcentaje de trabajo que no pasa los controles de calidad.
- (02) Fallos detectados = Proceso 3 / Retraso por fallos

Units: Módulos/semana

Tomaremos una fracción constante de los errores pendientes de detectar.

- (03) FINAL TIME = 24
Units: Week
The final time for the simulation.
- (04) INITIAL TIME = 0
Units: Week
The initial time for the simulation.
- (05) Inspección de Calidad=0.9
Units: Dmnl
Calidad de los trabajos dados como finalizados.
- (06) Proceso 1= INTEG (-Tasa de reparación + Fallos detectados, Total de módulos a mantener)
Units: Módulos
- (07) Proceso 2= INTEG (Tasa de reparación, 0)
Units: Módulos
- (08) Proceso 3= INTEG (Fallos-Fallos detectados, 0)
Units: Módulos
Proceso 3 NFF - No Fault Found.
- (09) Retraso por fallos = 2
Units: Week
Retraso en el mantenimiento por fallos encontrados, es decir, tiempo perdido por fallos en la reparación de módulos.
- (10) SAVEPER = TIME STEP
Units: Week
The frequency with which output is stored.
- (11) Tasa de reparación=MIN(10,Proceso 1)
Units: Módulos/semana
 - a) Escenario de número mínimo de módulos reparados por semana MIN(10,Proceso 1)
 - b) Escenario de número máximo de módulos reparados por semana MIN(24,Proceso 1)
- (12) TIME STEP = 0.25
Units: Week
The time step for the simulation.
- (13) Total de módulos a mantener= 240
Units: Módulos
Total de módulos previstos para el mantenimiento. Vamos a considerar todos iguales, ya que el propósito del modelo es trabajar con parámetros no previsibles como son los errores en el mantenimiento.

Para ver la evolución de dos variables en una misma gráfica, se selecciona en la barra de herramientas de Vensim, Windows – Control Panel – Graph – New y seleccionar las variables que se desee. Colocar una señal a la izquierda para verlas en la misma escala, y después dar Ok y Display.

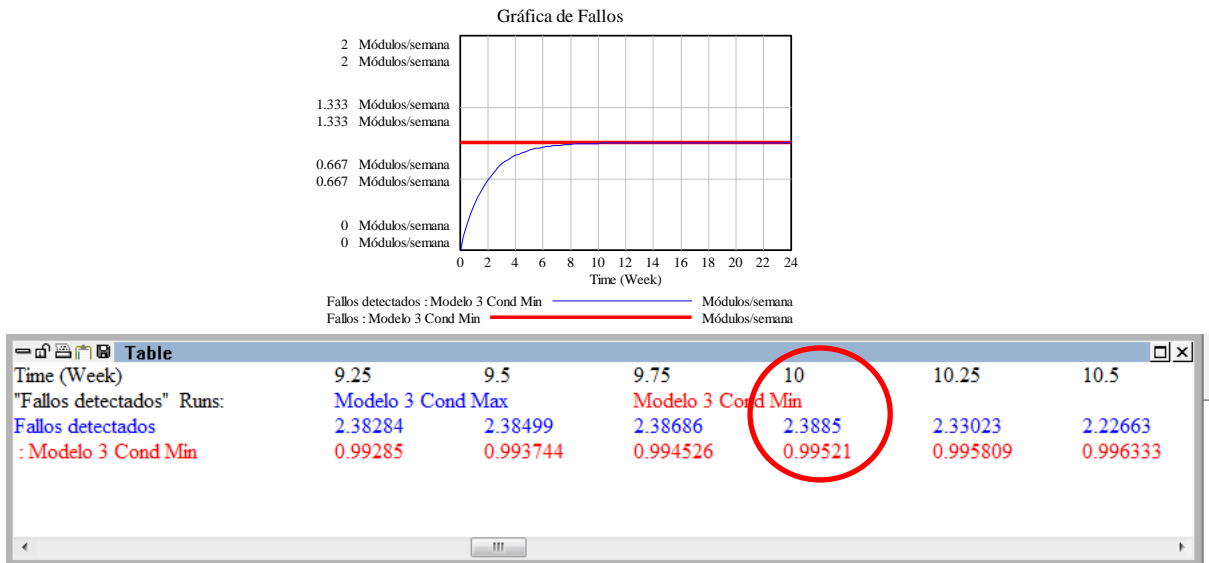


Fig. 8. Gráfica de fallos del Modelo 3.

En esta figura 8 observamos que el número de posibles fallos podría llegar a darse sobre el volumen de módulos a reparar, con un máximo de 10 módulos a reparar por semana, es de 1 (módulo). Pero sobre un acumulado de 100 módulos reparados, que es el trabajo equivalente a 10 semanas, el número de fallos sería un total de 10 módulos.

Observación 5: Si hacemos que la Tasa de reparación = MIN (24, Proceso 1), pues el número de módulos a reparar por semana ahora serían 24. Es decir, en 10 semanas se habrían reparado el total de 240, comprobamos que con un coeficiente de "Inspección de calidad" de 0,9, el número de Fallos = $24 * (1 - 0,9) = 2,4$. En la gráfica siguiente (Fig. 9), observamos que el total de módulos mal reparados sería de 5.

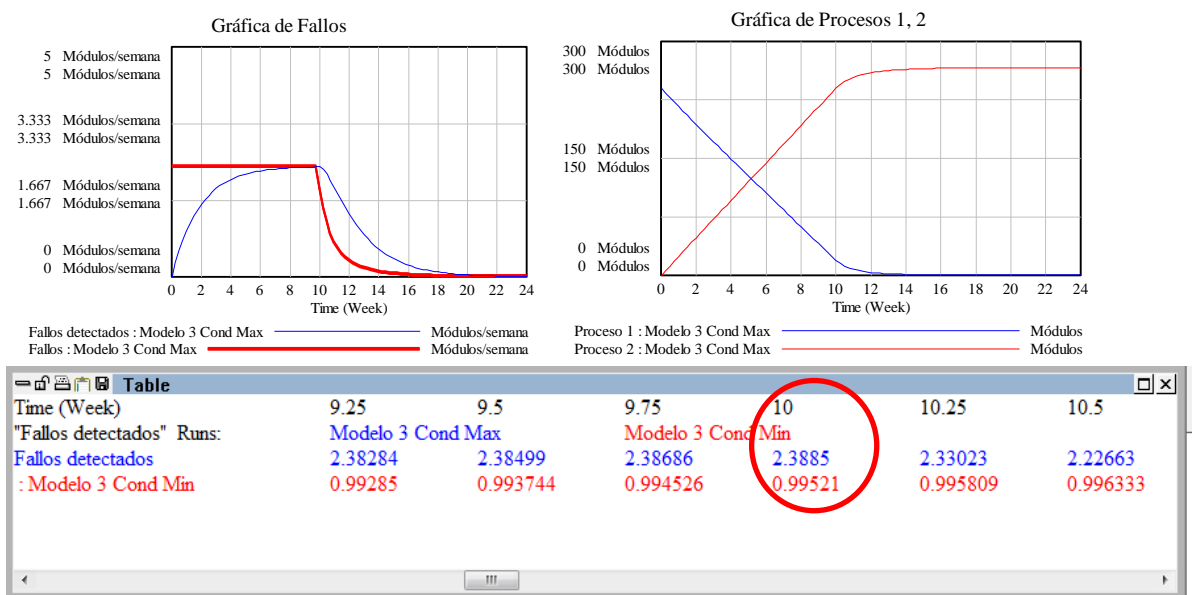


Fig. 9. Gráfica de fallos del Modelo 3, aumentando a 24 módulos/semana.

En resumen, vemos en la siguiente gráfica la tendencia de fallos detectados con las condiciones mínimas descritas en (a) en cuanto al número de módulos a reparar por semana 10 módulos/semana, (línea azul). Y las condiciones que hemos denominado máximas (b), considerando que el total de módulos reparados por semana sea de 24 módulos/semana (línea roja).

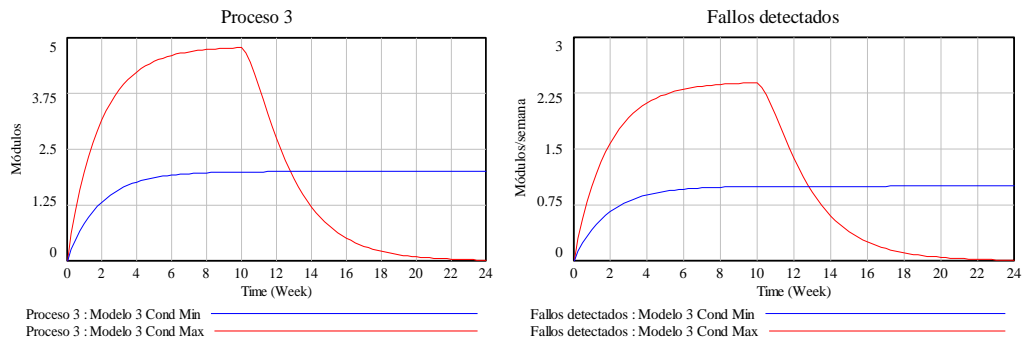


Fig. 10. Gráficas del Proceso 3 y fallos detectados.

Siendo el Proceso 3

$$\frac{d(\text{Proceso 3})}{dt} = \text{Fallos}(t) - \text{Fallo detectados}(t),$$

$$\text{Fallos} = \text{Tasa de reparación} * (1 - \text{Inspección de Calidad}),$$

$$\text{Fallos detectados} = \text{Proceso 3} / \text{Retraso por fallos}$$

Nota 3: Si hacemos Model – Units Check en esta versión del modelo y la siguiente nos dice que hay un error, lo dejamos así por simplicidad. En la última versión del modelo se soluciona.

Por otra parte, del modelo 2 al modelo 3 hay un cambio, de forma que dejamos de utilizar la variable "Proceso 2" que indica la finalización de las tareas de mantenimiento, para controlar que no se hagan más tareas de la previstas. La razón es que observamos que en realidad hay algunas tareas que han de repetirse por fallos en el mantenimiento. Por lo tanto, esta variable no puede ser un límite para la cantidad de trabajo realizado.

3.2.4 Modelo 4. Comprobación de parámetros de motor en banco de pruebas.

Una vez revisada la reparación se envía a banco de pruebas para comprobar que el motor ofrece las prestaciones necesarias. Si se comprueba durante las pruebas que el motor no alcanza el empuje necesario, o la temperatura de alguno de los módulos excede el umbral, etc. Demuestra que se ha cometido un error en el mantenimiento. En ese caso el motor vuelve al taller para desmontarlo y volver a revisar cada uno de los módulos.

Se reconsidera la constante de "Retraso por fallos" que habíamos puesto en el Modelo 3, y se hace que sea función de la cantidad de tareas del Proceso 1 y del total que hay previstas realizar (240).

$$\text{Retraso por fallos} = \frac{\text{Proceso 1}}{\text{Total de tareas previstas}}$$

Observación 6: En la tabla look up recogemos la idea de que cuando se está al principio de las tareas de mantenimiento, se tarda más tiempo en detectar fallos que cuando ya se está en las últimas tareas del proceso de mantenimiento, donde cualquier fallo se detecta con más rapidez. El punto (0,0.5) indica que cuando las tareas del Proceso 1 son 0 los errores se detectan en 0.5 semana. El punto (1,12) indica que cuando las actividades del proceso 1 y las tareas pendientes de realizar, son iguales. Es decir, el cociente

$$\text{Retraso por fallos} = \frac{\text{Proceso 1}}{\text{Total de tareas previstas}} = 1$$

Se tardan 12 semanas, que es tiempo aproximado de montar el motor y llevarlo al banco de pruebas, que es exactamente lo que se mostró en la Fig. 2 (Gráfica de Procesos) y también se observó en la Fig. 7. Procesos 1 y 2 del Modelo 3.

En el modelo este tipo de fallo lo vamos a simular en la variable auxiliar “Retraso por fallos”, de la forma siguiente (Fig. 11):

Retraso en detectar errores = WITH LOOKUP (Proceso1/Total de módulos a mantener)(0,0.5),(0.2,1),(0.4,3),(0.6,6),(0.8,9),(1,12)

Units: Semana

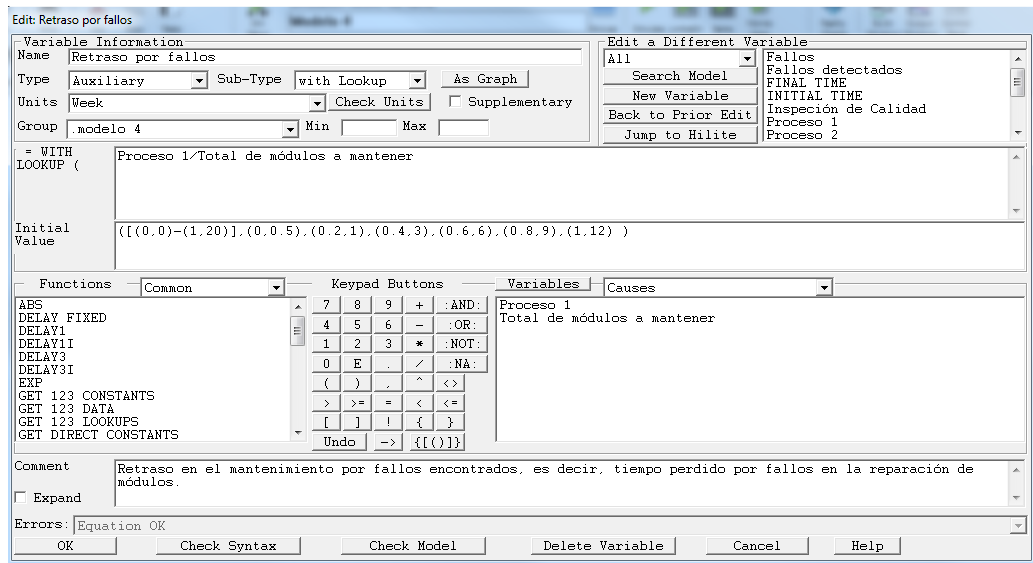


Fig. 11. Detalle de la variable auxiliar “Retraso por fallos”.

Las ecuaciones diferenciales son las mismas que hemos detallado en el Modelo 3.

$$\text{Proceso 1} = \text{Total de módulos a mantener}(t_0) - \int_0^{24} (\text{Tasa de reparación}) dt$$

$$\text{Proceso 2} = \int_0^{24} (\text{Tasa de reparación}) dt$$

$$\text{Proceso 3} = \int_0^{24} (\text{Fallos} - \text{Fallos detectados}) dt$$

El diagrama de Forrester del modelo 3 es el siguiente:

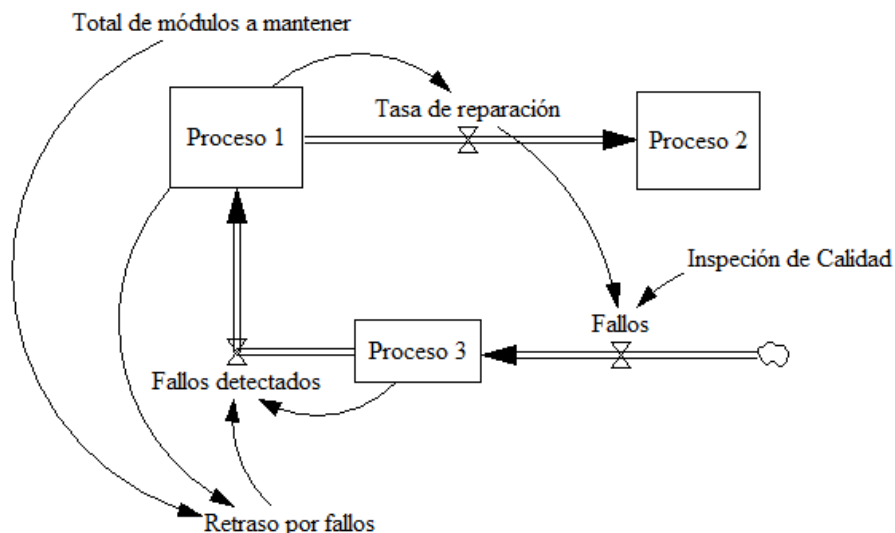


Fig. 12. Diagrama del Modelo 4.

Con la condición de 10 módulos reparados por semana, es decir “Tasa de reparación” =MIN(10,Proceso 1), si ejecutamos el modelo observamos que ahora el número de “Fallos detectados” supera el umbral de 2 módulos/semana, entre la semana 10 y 12, llegando próximo a 3

módulos/semana de la semana 17 a 24, con las condiciones definidas en el Lookup del “Retraso por fallos” descrita en la observación 6. (Ver Figura 11).

En las siguientes gráficas comprobaremos el comportamiento de “Fallos detectados” al input de dos tipos distribuciones de Look up. La gráfica de la derecha se obtiene con el Lookup ((0,0.5),(0.2,1),(0.4,3),(0.6,6),(0.8,9),(1,12)) se obtiene una función discreta. Y la gráfica de la izquierda con el Look up con los datos (0,0.5),(0.5,5),(1,10) se comporta como función logarítmica.

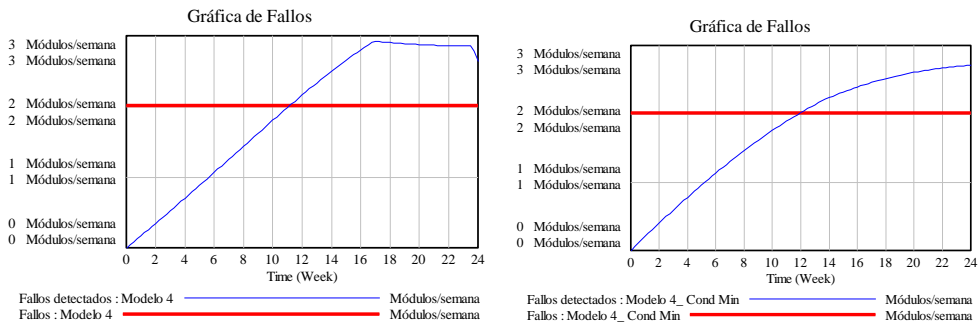
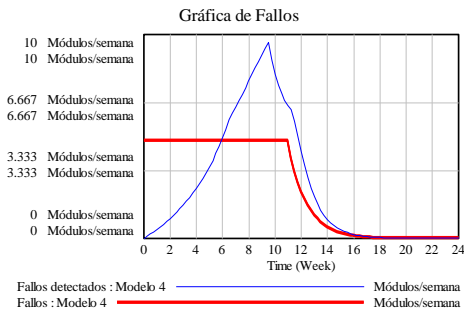


Fig. 13 Comportamiento del Fallo detectado en función de las distribuciones de look up.

Sin embargo, si el número de reparaciones por semana es de 24 módulos. Es decir, “Tasa de reparación” =MIN(24,Proceso 1), vemos como el total de fallos detectados llega a 8.



En la tabla inferior se muestra la variación del número de fallos encontrados con las condiciones mínimas, con tasa de reparación es 10 módulos/semana y condiciones máximas de 24 módulos/semana.

Time (Week)	9	9.25	9.5	9.75	10	10.25
"Fallos detectados" Runs:	Modelo 4_ Cond Max		Modelo 4_ Cond Min			
Fallos detectados	8.99799	9.30732	9.60393	8.73021	8.04159	7.50116
:Modelo 4_ Cond Min	1.6194	1.66539	1.71128	1.75704	1.80267	1.84813

Fig. 14. Gráfica de fallos del Modelo 4.

En cuanto a la gráfica de procesos presenta el mismo comportamiento que se mostró en el Módulo 3.

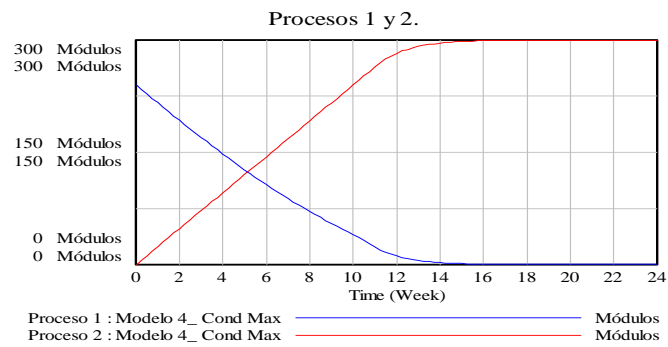


Fig. 15. Gráfica de Procesos 1 y 2 del Modelo 4.

En resumen, vemos en la siguiente gráfica la tendencia de fallos detectados con las condiciones mínimas descritas en (a) en cuanto al número de módulos a reparar por semana 10 módulos/semana, (línea azul). Y las condiciones máximas (b), considerando que el total de módulos reparados por semana sea de 24 módulos/semana (línea roja).

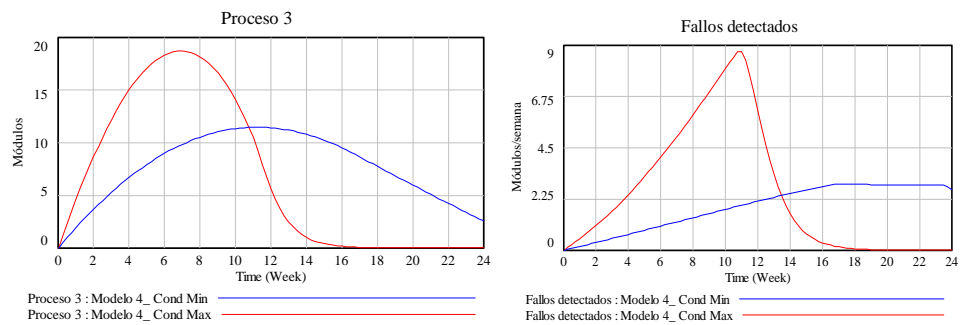


Fig. 16. Comportamiento del Proceso 3 y Fallos detectados para 10 mód/sem, y 24 mód/sem.

Siendo el Proceso 3

$$\frac{d(\text{Proceso 3})}{dt} = \text{Fallos}(t) - \text{Fallo detectados}(t),$$

Fallos = Tasa de reparación*(1-Inspección de Calidad),
 Fallos detectados = Proceso 3/Retraso por fallos

3.2.5 Modelo 5. Proceso de preparación y entrega de motor reparado.

Este modelo permitirá trabajar con la duración de la reparación (TAT) de 10 semanas y evaluar la capacidad de trabajo del Taller.

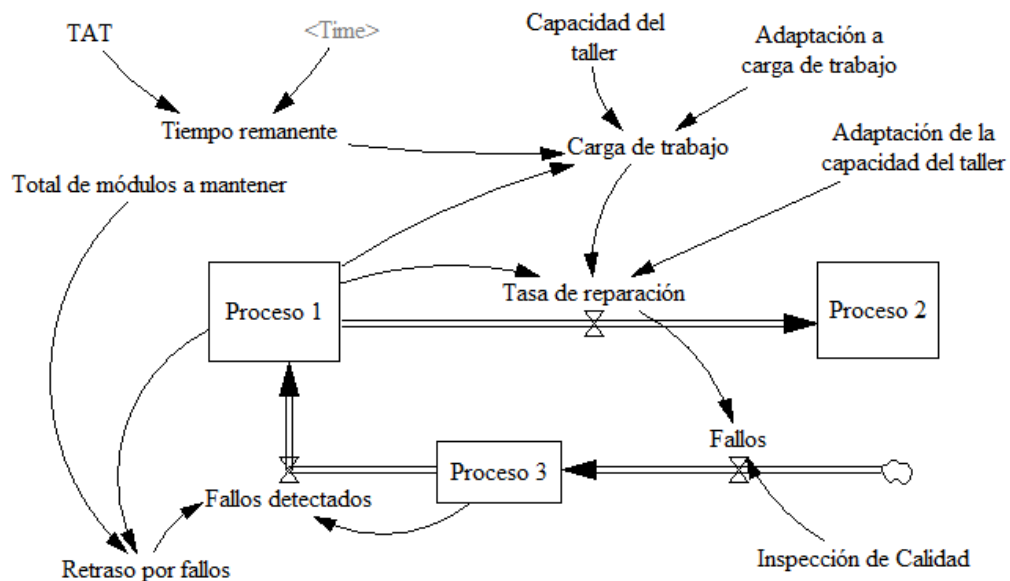


Fig. 17. Diagrama del Modelo 5.

En este modelo se han corregido los errores de unidades, podemos comprobar que las unidades empleadas en el modelo son correctas cuando hacemos (Model -> Units Check).

Con frecuencia lograr que el modelo se halle correcto desde el punto de vista de las unidades obliga a añadir un gran número de variables auxiliares, que en general solo añaden una complejidad innecesaria al modelo. Se debe valorar la conveniencia de añadir o no todas las variables auxiliares necesarias para tener un modelo correcto, desde el punto de vista de las unidades. En este caso se han empleado las constantes "Adaptación a carga de trabajo" y "Adaptación de la capacidad de taller". La unidad de medidas de ambas es en semanas, y se definen de la forma siguiente:

- Adaptación a carga de trabajo= Constante que indica la velocidad de adaptación entre la carga de trabajo y el realmente empleado.
- Adaptación de la capacidad del taller=Constante que indica la velocidad de adaptación entre la capacidad del taller disponible y la carga de trabajo.

En cuanto a las ecuaciones diferenciales son las mismas que hemos detallado en el Modelo 3.

$$\begin{aligned}
 \text{Proceso 1} &= \text{Total de módulos a mantener}(t_0) - \int_0^{24} (\text{Tasa de reparación}) dt \\
 \text{Proceso 2} &= \int_0^{24} (\text{Tasa de reparación}) dt \\
 \text{Proceso 3} &= \int_0^{24} (\text{Fallos} - \text{Fallos detectados}) dt
 \end{aligned}$$

En este modelo utilizaremos variables características que permitan evaluar el tiempo medio de reparación (TAT) y la capacidad necesaria del Taller o Centro de Mantenimiento.

- Capacidad de taller, indica la capacidad de mantenimiento máxima semanal, incluyendo los módulos que deben re-trabajarse. (ej. 40 módulos/semana, es equivalente a decir que hay

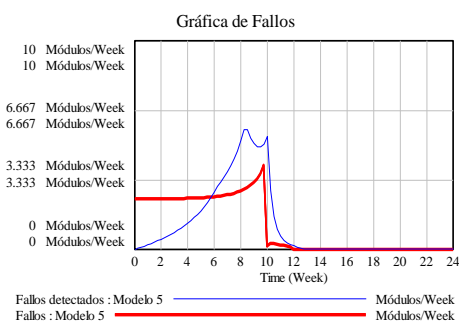
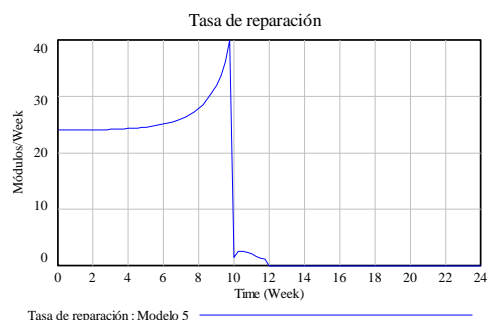
16 de fallos en reparación sobre 24 módulos/semana, en porcentaje sería un 66% = 16/24 presenta algún tipo de fallo en el mantenimiento).

- Carga de trabajo, este parámetro será como máximo la “Capacidad de taller”, es decir, 240 módulos a reparar en 24 meses.
- TAT=Tiempo medio de la reparación de un motor, hemos considerado como hipótesis 10 semanas.
- Tiempo remanente, cuenta el plazo remanente en cada momento empezando por el TAT (10 semanas) hasta llegar a 0.

Las ecuaciones de este modelo son las siguientes:

- (01) Adaptación a carga de trabajo= 1
Units: Week
Constante que indica la velocidad de adaptación entre la carga de trabajo y el realmente empleado.
- (02) Adaptación de la capacidad del taller=1
Units: Week
Constante que indica la velocidad de adaptación entre la capacidad del taller disponible y la carga de trabajo.
- (03) Capacidad del taller=40
Units: Módulos/Week
Corresponde a la capacidad de mantenimiento máxima.
- (04) Carga de trabajo=MIN(Capacidad del taller, $XIDZ(\text{Proceso 1}, \text{Tiempo remanente}, \text{Proceso 1}/\text{Adaptación a carga de trabajo})$)
Units: Módulos/Week
La cantidad necesaria de mecánicos será el máximo de carga de trabajo disponible. Se calcula como la fracción de las tareas del Proceso 1 y el tiempo remanente (semanas). La función $XIDZ$ nos ofrece este cociente excepto cuando el Tiempo remanente es 0, en cuyo supuesto el resultado son las tareas del Proceso1/ Adaptación a carga de trabajo.
- (05) Fallos=(Tasa de reparación)*(1-Inspección de Calidad)
Units: Módulos/Week
Los errores serán función de la cantidad de trabajo hecho por el porcentaje de trabajo que no pasa los controles de calidad.
- (06) Fallos detectados=Proceso 3/Retraso por fallos
Units: Módulos/Week
Tomaremos una fracción constante de los errores pendientes de detectar
- (07) FINAL TIME = 24
Units: Week
The final time for the simulation.
- (08) INITIAL TIME = 0
Units: Week
The initial time for the simulation.
- (09) Inspección de Calidad=0.9
Units: Dmnl
Calidad de los trabajos dados como finalizados.

- (10) Proceso 1= INTEG (-Tasa de reparación + Fallos detectados, Total de módulos a mantener)
Units: Módulos
Este proceso indica las tareas pendientes que se deben realizar.
- (11) Proceso 2= INTEG (Tasa de reparación,0)
Units: Módulos
- (12) Proceso 3= INTEG (Fallos-Fallos detectados, 0)
Units: Módulos
Proceso 3 NFF - No Fault Found.
- (13) Retraso por fallos = WITH LOOKUP (Proceso 1/Total de módulos a mantener,
((0,0.5),(0.2,1),(0.4,3),(0.6,6),(0.8,9),(1,12)))
Units: Week
Retraso en el mantenimiento por fallos encontrados, es decir, tiempo perdido por fallos en la reparación de módulos.
- (14) SAVEPER = TIME STEP
Units: Week
The frequency with which output is stored.
- (15) Tasa de reparación=IF THEN ELSE(Proceso 1/Adaptación de la capacidad del taller<1,0,Carga de trabajo)
Units: Módulos/Week
Si las tareas del Proceso 1 es menor que 1 (son = 0) no se hace ninguna, en caso contrario se hace el trabajo requerido.
- (16) TAT=10
Units: Week
Tiempo medio de la reparación de un motor.
- (17) Tiempo remanente=MAX(TAT-Time,0)
Units: Week
Cuenta el plazo remanente en cada momento, empezando por 10 semanas hasta llegar a 0.
- (18) TIME STEP = 0.25
Units: Week
The time step for the simulation.
- (19) Total de módulos a mantener=240
Units: Módulos
Total de módulos previstos mantener 240.



Time (Week)	8.75	9	9.25	9.5	9.75	10
"Tasa de reparación" Runs:	Modelo 5					
Tasa de reparación	30.6482	31.985	33.6801	36.147	40	1.51939

Fig. 18. Gráfica de la Tasa de reparación del Modelo 5.

La gráfica de la Figura 15 representa el volumen de módulos que se deben reparar teniendo en cuenta que el total es de 240 módulos y que el TAT esperado es de 10 semanas. Así observamos una acumulación de fallos en las fases finales, que se van incrementando progresivamente. Es decir, habría un volumen de reparaciones de 24 módulos semana y llegaría hasta 40 módulos a re-trabajar próximos a la semana 10.

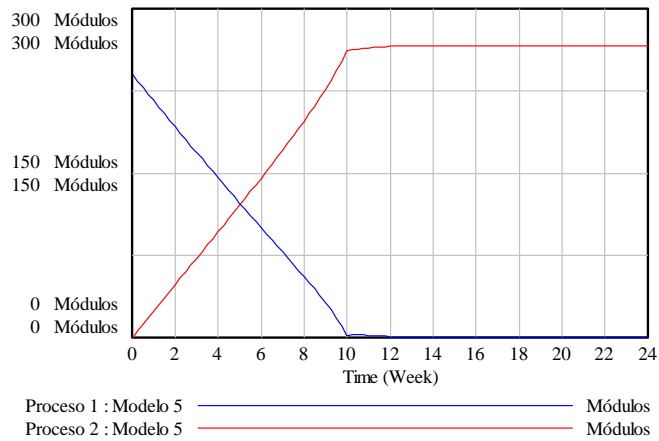


Fig. 19. Comportamiento de los Procesos 1 y 2 en el Modelo 5.

CAPÍTULO 3. SIMULACIONES Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.

4 Análisis de sensibilidad.

Una vez que tenemos el modelo podemos realizar análisis de sensibilidad variando diferentes parámetros característicos del modelo, con el fin de comprobar el comportamiento del sistema.

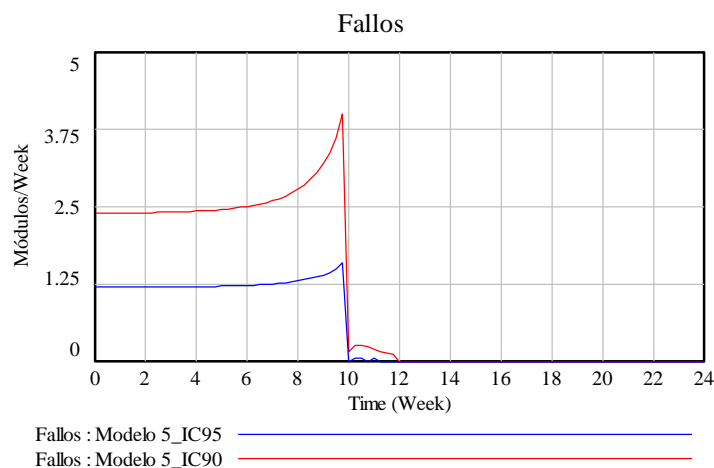
Vamos a realizar los siguientes análisis:

- 1) Un aumento de la calidad a 0,95.
- 2) Disponer de una capacidad del taller de 20 a 60.
- 3) Un menor retraso en la detección de fallos, modificando la tabla.
- 4) Un cambio en la duración de TAT prevista de 10 a 15 semanas.

4.1 Simulación 1. Variación de la calidad.

Un coeficiente del 90% en la constante “Inspección de Calidad” presenta una tasa de fallos de 3,5 módulos por semana como media en las primeras 9 semanas de trabajo. Hay que considerar que pueden encontrarse fallos durante el rodaje de motor en banco de pruebas, lo que puede elevar número de fallos encontrados.

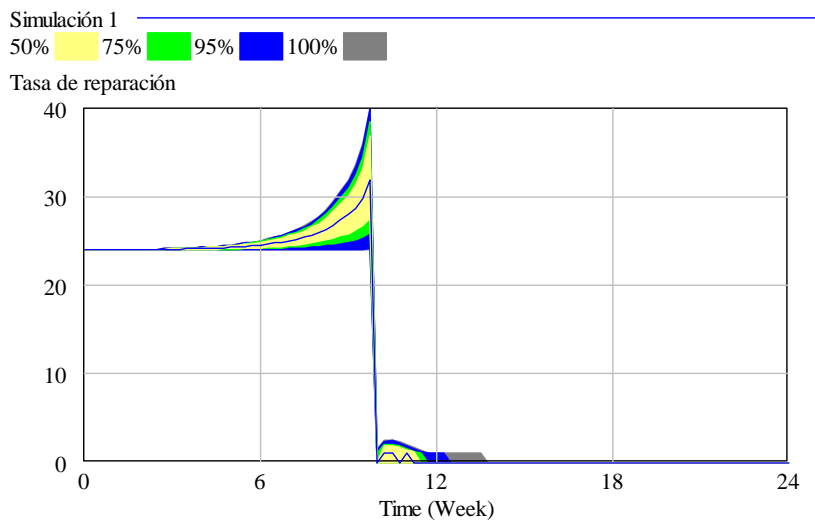
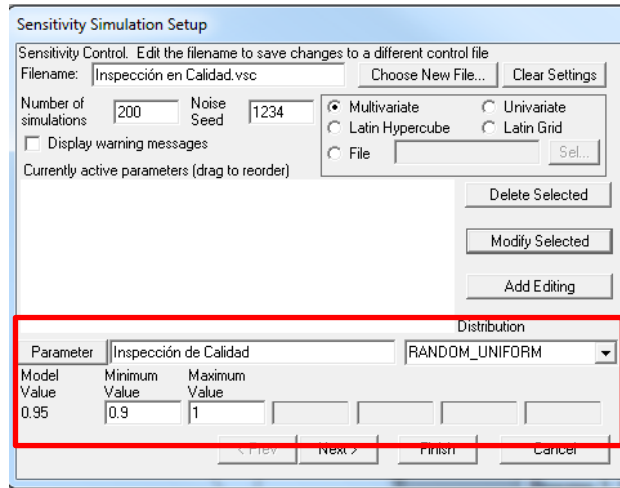
En la simulación 1 variamos el coeficiente de “Inspección de calidad” a 95%. En este caso la tasa de fallos es 1,5 módulos/semana. Sin embargo,



Time (Week)	9	9.25	9.5	9.75	10	10.2
"Fallos" Runs:	Modelo 5_IC95	Modelo 5_IC90				
Fallos	1.39742	1.43585	1.49096	1.59813	0	0.05
: Modelo 5_IC90	3.1985	3.36801	3.6147	4	0.151939	0.24

Fig. 20. Gráfica y tabla de variación de fallos en función del coeficiente de calidad.

Pero lo que interesa conocer es como afecta esta variación porcentual del 5% en la inspección de calidad, sobre la “Tasa de reparación”. Para ello vamos a realizar un análisis de sensibilidad, asignaremos una distribución uniforme al parámetro “Inspección de calidad”, con un valor mínimo de 0.9 y un valor máximo de 1. (Inspección de Calidad=RANDOM_UNIFORM(0.9, 1))



Time (Week)	9.25	9.5	9.75	10	10.25	10.5
"Tasa de reparación" Runs:	Modelo 5	Simulación 1				
Tasa de reparación	33.6801	36.147	40	1.51939	2.49405	2.57
: Simulación 1	28.7169	29.8191	31.9626	0	1.08052	1.08

Fig. 21. Análisis de sensibilidad de la mejora porcentual de calidad (5%) sobre la Tasa de reparación.

Se observa en la Fig. 18 que la tasa de reparación con un coeficiente de "Inspección de calidad" del 90% requería un re-trabajo de mantenimiento de 40 módulos. Sin embargo, con un coeficiente de "Inspección de calidad" del 95% este baja a 32 módulos.

Al realizar el análisis de sensibilidad de una distribución uniforme del "Inspección de Calidad" entre 0.9 y 1, se obtiene un intervalo de confianza del 95% entre 24 y 40 módulos y del 75% de confianza en el intervalo de 26 a 38 módulos.

4.2 Simulación 2. Variación de la capacidad de taller.

Vamos a considerar que la capacidad de trabajo del taller varía y de poder reparar 20 pasa a 60 Módulos. ¿Cómo afectaría a la tasa de reparación?

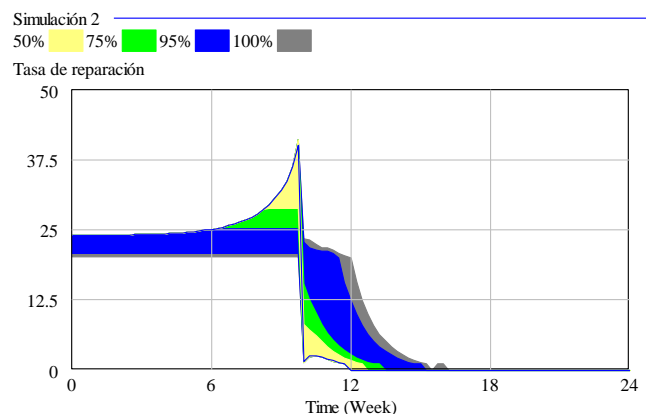
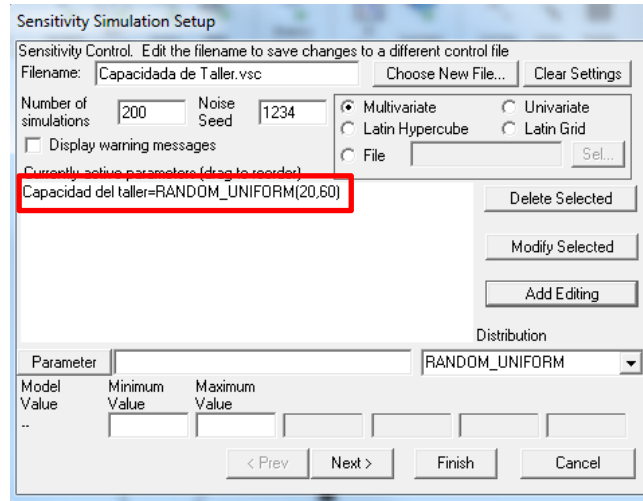


Fig. 22. Simulación 2. Variación de Capacidad de taller.

Comprobamos que al realizar una distribución uniforme de la capacidad del taller= $\text{RANDOM_UNIFORM}(20, 60)$ el análisis de sensibilidad muestra el 100% en el valor de 20 módulos/semana y del 95% entre 20 – 25 módulos/semana.

Vamos a realizar analizar el efecto conocer el efecto de variar la “Capacidad del taller” aplicando los siguientes valores:

- Una capacidad de 80 módulos/semana.
- Una capacidad de 60 módulos/semana.
- Una capacidad de 40 módulos/semana.
- Una capacidad de 20 módulos/semana.

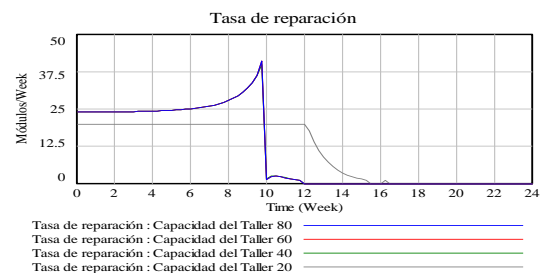
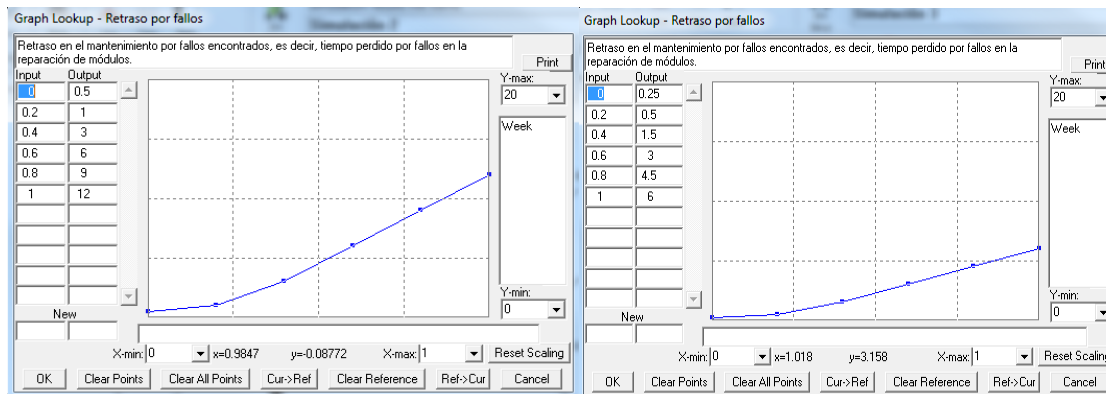


Fig. 23. Tasa de reparación para diferentes capacidades.

Se observa que los incrementos de capacidad de taller en 60 y 80 tienen el mismo resultado que tener una capacidad de 40. Sin embargo, al disminuir la capacidad del taller a 20 módulos/semana, para poder dar servicio a 240 módulos, el comportamiento de la tasa de reparación es diferente, pues deberá llegar a las 12 semanas para reparar los 240 módulos. Y en caso de fallo en alguna de las reparaciones se extiende hasta la semana 16.

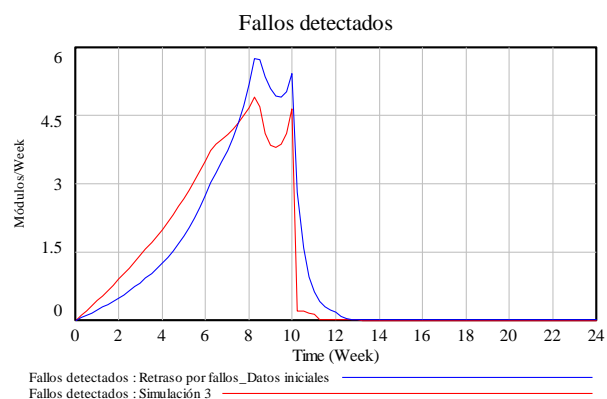
4.3 Simulación 3. Un menor retraso en la detección de fallos.

En el modelo 5 hemos utilizado una tabla Look up para definir la variable auxiliar "Retraso por fallos". En la simulación 3 se realizará un análisis de sensibilidad disminuyendo la detección de fallos. Para ello, los valores de la tabla se disminuirán, tal como muestra las gráficas siguientes.



Datos iniciales del Modelo 5

Datos de la Simulación 3.



Time (Week)	8	8.25	8.5	8.75	9	9.25	9.5	9.75	10
"Fallos detectados" Runs:	Retraso por fallos_Datos iniciales	5.18514	5.7589	5.72426	5.34719	5.08521	4.93392	4.90177	5.02878
Fallos detectados : Simulación 3	4.67998	4.90315	4.70131	4.10602	3.84679	3.79365	3.88085	4.10654	4.64405

Fig. 24. Simulación 3, disminución retrasos por fallos.

Se observa una disminución en los fallos detectados disminuyendo a la mitad los datos iniciales del Lookup, tal como muestra la Fig. 20, donde con los datos iniciales alcanza los 5 módulos en la semana 10. No obstante, aunque el número de fallos detectados sea menor, comprobamos que la diferencia es sólo de 1,2 módulos/semana.

4.4 Simulación 4. Cambio en la duración de TAT.

En esta simulación aumentaremos la duración del tiempo de reparación (TAT) de 10 a 15 y 20 semanas.

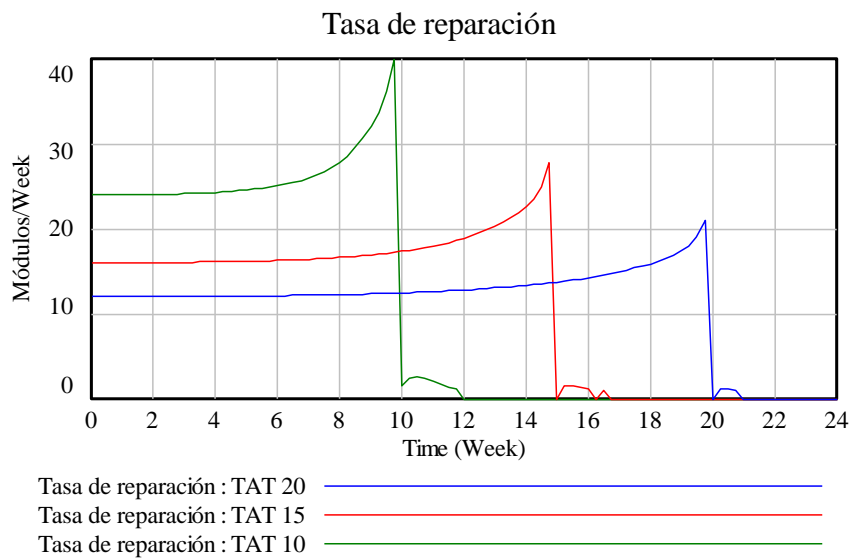


Fig. 25. Simulación 4. Aumento del TAT, efecto en la Tasa de reparación.

Así podemos observar como en la simulación 4 un cambio en el TAT previsto no modifica el comportamiento observado del Tasa de reparación o trabajo que se ha de realizar, únicamente aproxima o aleja el fenómeno de acumulación de tareas y disminuye el volumen de módulos semanales que deben ser reparados.

La interpretación de estas gráficas se explica que cuanto más tiempo se tenga para realizar una entrega las reparaciones que deben realizarse disminuirán, también se tendrían menos fallos de módulos mal reparados (Ver Fig. 22).

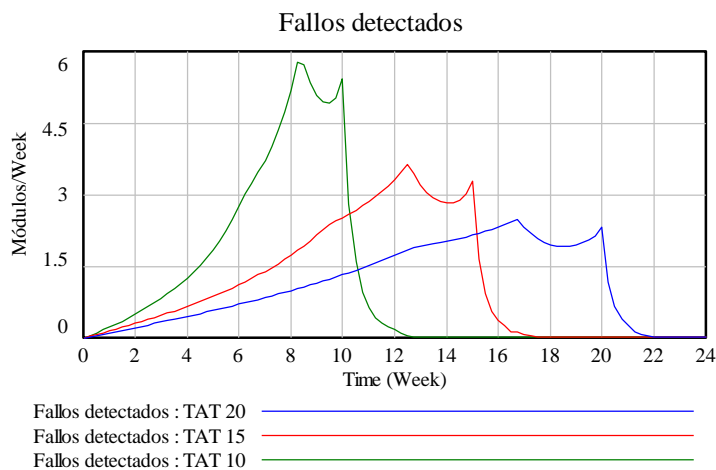


Fig. 26. Simulación 4. Aumento del TAT, efecto en los fallos detectados.

CAPÍTULO 5. VALIDACIÓN DEL MODELO.

5 Métodos de validación a emplear.

Vamos a emplear varias técnicas que permitan validar la estructura y el comportamiento del modelo [Morvin M. 11].

5.1 Validación de la estructura.

Se puede afirmar que la estructura de los procesos implícitos se ajusta a la realidad, aunque se trata de un prototipo y por tanto se han omitido ciertos procesos.

- **Prueba dimensional:** Se ha de comprobar la consistencia dimensional de todas las unidades que poseen las ecuaciones que se han formulado y que modelan el comportamiento del sistema. Para ello, en Vensim en la barra de herramientas, seleccionar "Model" -> "Units Checks".

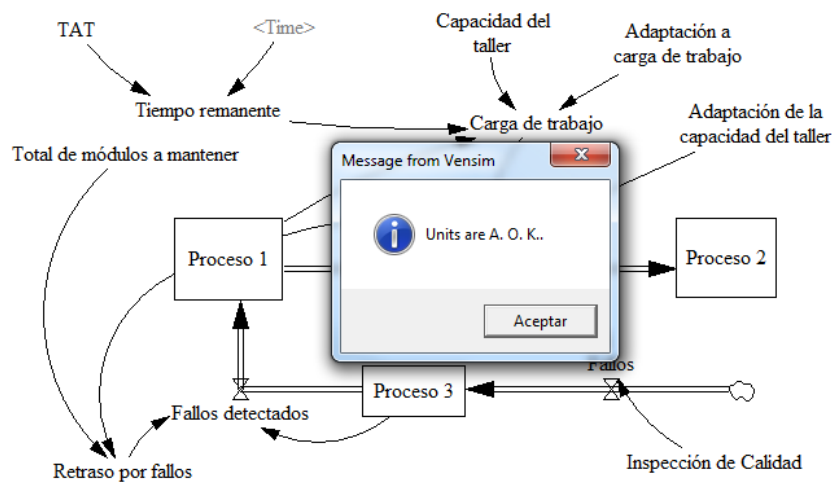
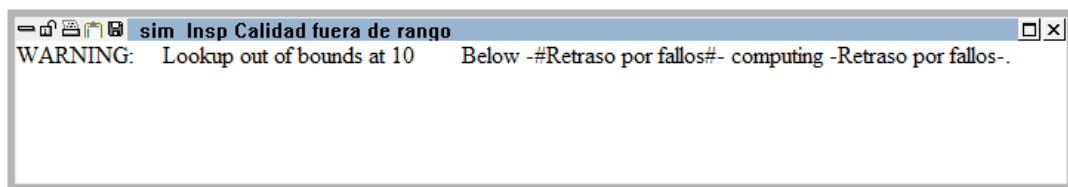


Fig. 27. Chequeo de las unidades del Modelo 5.

- **Prueba de condiciones extremas:** Se debe comprobar para cada estructura del modelo que si se aplican valores extremos, valores muy altos o incluso cero, las variables las ecuaciones siguen teniendo sentido ya que el modelo no devuelve valores incoherentes.

Observemos que ocurre en el modelo si utilizamos un parámetro de "Inspección de Calidad" fuera de rango, por ejemplo 1,10. Es decir, un 110% de aseguramiento de calidad. Al intentar ejecutar el modelo nos sale la advertencia en la variable "Retraso por fallos".



Y como observamos en la gráfica de "Tasa de reparación" presenta una situación de disminución de módulos a reparar. Y en cuanto a "Fallos detectados" aparece un rango negativo y a partir semana 10 va a cero.

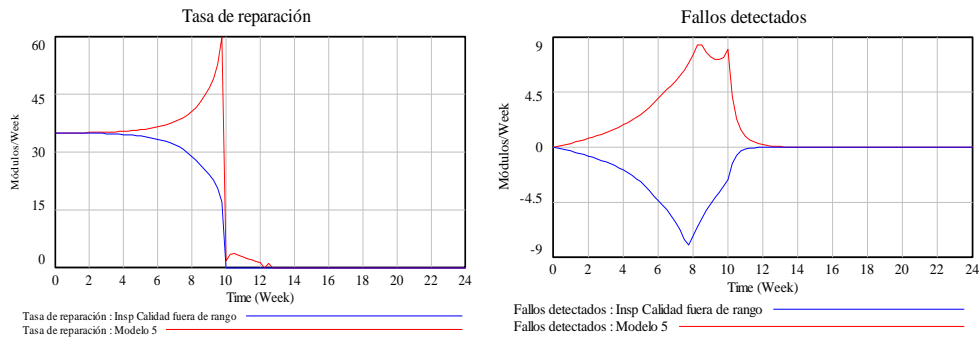


Fig. 28. Comparativa gráfica de datos iniciales (Modelo 5) vs. Inspección de calidad.

- **Prueba de validez facial:** Podemos decir que la estructura del modelo se parece al sistema real que hemos modelado pues es una representación reconocible del sistema. En este modelo de forma incremental se han ido incluyendo las variables características del modelo de mantenimiento.
- **Prueba en parámetros de verificación:** En este caso se trata de que existan equivalencias entre los parámetros, variables y sus valores numéricos con el sistema real. Para ello se han incluido valores reales en la hipótesis de un sistema real de un Proceso de Mantenimiento.

En este modelo los datos utilizados son datos reales:

- ✓ Un motor está compuesto de 12 módulos.
- ✓ La actividad de mantenimiento en el taller en 24 semanas es de 20 motores.
- ✓ El TAT de 10 semanas.

5.2 Validación del comportamiento del modelo.

Tiene como objetivo establecer la confianza en el comportamiento que se obtiene de las simulaciones realizadas con el modelo [Forrester y Senge, 9].

- **Prueba de sensibilidad en los parámetros:** Como se ha demostrado en el capítulo 4, simulaciones y análisis de sensibilidad, el modelo es sensible a las variaciones en valores de los parámetros característicos del sistema. Según se ha podido apreciar en las simulaciones, se confirma el hecho de que al cambiar los valores de los parámetros se obtienen comportamientos diferentes, pero a la vez con coherencia según los cambios que se han realizado.
- **Pruebas de consistencia.** Se basa en comparaciones con datos históricos de un sistema real, así como valores estadísticos de los cuales no se dispone. Por otra parte trata de evaluar la validez del modelo comparando sucesos que ocurren en el sistema real. No obstante, se trata de un prototipo teórico y no se ha probado en situaciones reales.
- **Pruebas utilidad y efectividad.** Comportamiento contra-intuitivo: ¿Es el modelo capaz de generar nuevos puntos de vista o al menos ofrece nuevos conocimientos acerca de la naturaleza del problema? En el modelo presentado se puede responder afirmativamente, dado que aunque el objetivo principal es comprobar el comportamiento del modelo en base a los principales parámetros del mantenimiento, se puede apreciar la influencia de éstos en el modelo. Por tanto, sí que se pueden extraer conocimientos del modelo.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES.

6 Conclusiones.

Este tercer trabajo ha seguido un esquema en el que de forma progresiva se ha ido elaborando un modelo que describe un proceso de mantenimiento, indicando las principales variables que intervienen, sus relaciones y detalle de formulación y unidades de medida.

Los elementos que integran el sistema de este centro de mantenimiento son los siguientes:

- i. Total de módulos de motor que se pueden reparar en el taller.
- ii. Duración media de la reparación y entrega de motor (TAT).
- iii. Tiempo remanente, cuenta el plazo remanente en cada momento, empezando por 10 semanas (TAT) hasta llegar a 0.
- iv. Capacidad del taller en cuanto a los módulos que se pueden reparar.
- v. Carga de trabajo. La cantidad necesaria de mano de obra, medido como la carga máxima de trabajo disponible, utilizando como unidades módulos reparados por semana.
- vi. Adaptación a carga de trabajo, constante que indica la velocidad de adaptación entre la carga de trabajo y el realmente empleado.
- vii. Adaptación de la capacidad del taller, Constante que indica la velocidad de adaptación entre la capacidad del taller disponible y la carga de trabajo.
- viii. Proceso 1. Variable de nivel que trata las acciones pendientes de mantenimiento: recepción de motor, limpieza, inspección, desmontaje modular, reparación montaje y pruebas en banco.
- ix. Tasa de reparación, variable de flujo que controla el trabajo de mantenimiento identificadas en el proceso 1.
- x. Inspección de Calidad, una constante que mide calidad de los trabajos dados como finalizados.
- xi. Fallos medidos como el número de errores que se pueden producir en función de la cantidad de trabajo realizado por el porcentaje de trabajo que no pasa los controles de calidad.
- xii. Proceso 3, proceso identifica el número de fallos detectados menos el número de fallos reales que pueden darse en el sistema durante la reparación o pruebas en banco.
- xiii. Retraso por fallos, son los retrasos en el mantenimiento por fallos encontrados, es decir, tiempo perdido por fallos en la reparación de módulos.
- xiv. Proceso 2. Variable de nivel que gestiona la finalización de las actividades de mantenimiento como es la certificación del motor probado.

Una vez construido el modelo se han ejecutado una serie de simulaciones que ver como respondía el modelo a los cambios en las variables características. El análisis realizado permite conocer que sucede en el caso de disponer de un incremento en el aseguramiento de la calidad, de una capacidad de trabajo mayor, una variación del retraso en fallos y un aumento de TAT.

Los resultados obtenidos de las simulaciones, permiten confirmar que el modelo da una visión global del comportamiento de negocio, aportando visibilidad de los retrasos que pudieran darse en cada una de las estructuras.

Como conclusión sumaria, hemos visto que la Dinámica de Sistemas proporciona la teoría y metodología de propósito general, que en este trabajo se ha adaptado al caso del mantenimiento aeronáutico y sus principales variables características. Permittiéndonos cuantificar la influencia de variaciones en ciertos parámetros característicos para mejorar el proceso. Y analizar los problemas que se puedan presentar en el sistema, actuando sobre las variables principales para conocer el comportamiento y facilitar la toma de decisiones.

CAPÍTULO 7. ANEXOS

7 Bibliografía.

- [1] Aracil J. Dinámica de Sistemas. Isdefe - Universidad de Sevilla. – Material de referencia para el TFM Modelo de Mantenimiento Aeronáutico I, II y III.
- [2] Beamon, B. (1998) Supply chain design and analysis: Models and methods. International Journal of Production Economics, Vol. 55, No. 3, pp. 281-294. – Material de referencia para el TFM Modelo de Mantenimiento Aeronáutico II.
- [3] Bloch H. P. Improving Machinery Reliability . Gulf Publishing Co. Houston, 1988.- Material de referencia para el TFM Modelo de Mantenimiento Aeronáutico I.
- [4] Chen, F., Drezner, Z., Ryan, J., Simchi-Levi, D. (2000a) Quantifying the bullwhip effect in a simple supply chain: The impact of forecasting, leadtimes and information. Management Sciences, March 2000, pp. 436-443. Material de referencia para el TFM Modelo de Mantenimiento Aeronáutico II.
- [5] Chen, F., Ryan, J., Simchi-Levi, D. (2000b) The impact of exponential smoothing forecasts on the bullwhip effect. Naval Research Logistics, No. 3, pp. 269-286. Material de referencia para el TFM Modelo de Mantenimiento Aeronáutico I.
- [6] Dhillon, B.S. Engineering maintenance. A modern approach. Boca Raton: CRC Press, 2002. ISBN: 1587161427. - Material de referencia para el TFM Modelo de Mantenimiento Aeronáutico I.
- [7]. Erkoyuncu, J. A., Roy, R., Shehab, E., Cheruvu, K. (2010) “Managing uncertainty in service cost estimation for Product-Service Systems”, International Journal of Institution of Mechanical Engineers – Part B, Submitted, January 2010. - Material de referencia para el TFM Modelo de Mantenimiento Aeronáutico I.
- [8] Forrester, J. (1961) Industrial dynamics. Portland, OR, USA, Productivity Press Inc. - Material de referencia para el TFM Modelo de Mantenimiento Aeronáutico I, II y III.
- [9] Forrester y Senge, Tests for building confidence in System Dynamics Model, TIMS Studies in the Mgt.t Sc., Vol 14, pp209-228. 1980.- Material de referencia para el TFM Modelo de Mantenimiento Aeronáutico I, II y III.
- [10] Martín García, J. Dinámica de Sistemas Avanzado y ejercicios. 2012. ISBN 978-84-612-2792-1. Material de referencia para el TFM Modelo de Mantenimiento Aeronáutico I y III.
- [11] M. Morvin; Validation of simulation based model. A theoretical outlook, Manipal Institute of Technology, India 2009. - Material de referencia para el TFM Modelo de Mantenimiento Aeronáutico I, II y III.
- [12] Sterman, J.D. Business Dynamics Systems Thinking and Modeling for a Complex Wolrd. 2000.- Material de referencia para el TFM Modelo de Mantenimiento Aeronáutico I.
- [13] Vesim 5 Modeling Guide, January 25, 2003. - Material de referencia para el TFM Modelo de Mantenimiento Aeronáutico III.
- [14] Vierhaus Ingmar, Armin Fügenschuh, Robert Gottwald, and Stefan Grösser, Modern Nonlinear Optimization Techniques for Optimal Control of System Dynamics Models. - Material de referencia para el TFM Modelo de Mantenimiento Aeronáutico II y III.
- [14] Xu, Y., Elgh, F., Erkoyuncu, J. A., Bankole, O., Arundachawat, P., Goh, M. Y, Cheung, W. M., Wahid, B. M., Wang, Q., Baguley, P., Newness L., Shehab, E., Roy, R., (2010) “Current and Future Research in Cost Engineering”. - Material de referencia para el TFM Modelo de Mantenimiento Aeronáutico I.

8 Ecuaciones del modelo.

- (01) Adaptación a carga de trabajo= 1
Units: Week
Constante que indica la velocidad de adaptación entre la carga de trabajo y el realmente empleado.
- (02) Adaptación de la capacidad del taller= 1
Units: Week
Constante que indica la velocidad de adaptación entre la capacidad del taller disponible y la carga de trabajo.
- (03) Capacidad del taller= 40
Units: Módulos/Week
Corresponde a la capacidad de mantenimiento máxima.
- (04) Carga de trabajo=MIN(Capacidad del taller/Adaptación a carga de trabajo, XIDZ(Proceso 1,Tiempo remanente, Proceso 1/Adaptación a carga de trabajo))
Units: Módulos/Week
La cantidad necesaria de mecánicos será como máximo de la carga de trabajo disponible. Se calcula como el cociente entre las tareas del Proceso 1y el tiempo remanente (semanas). La función XIDZ nos ofrece este cociente excepto cuando el Tiempo remanente es 0, en cuyo supuesto el resultado son las tareas del Proceso1/Adaptación a carga de trabajo.
- (05) Fallos=(Tasa de reparación)*(1-Inspección de Calidad)
Units: Módulos/Week
Los errores serán función de la cantidad de trabajo hecho por el porcentaje de trabajo que no pasa los controles de calidad.
- (06) Fallos detectados=(Proceso 3/Retraso por fallos)
Units: Módulos/Week
Tomaremos una fracción constante de los errores pendientes de detectar.
- (07) FINAL TIME = 24
Units: Week
The final time for the simulation.
- (08) INITIAL TIME = 0
Units: Week
The initial time for the simulation.
- (09) Inspección de Calidad=0.9
Units: Dmnl
Calidad de los trabajos dados como finalizados.
- (10) Proceso 1= INTEG (-Tasa de reparación + Fallos detectados, Total de módulos a mantener)
Units: Módulos
Este proceso indica las tareas pendientes que se deben realizar.
- (11) Proceso 2= INTEG (Tasa de reparación,0)
Units: Módulos
- (12) Proceso 3= INTEG (Fallos-Fallos detectados, 0)
Units: Módulos
Proceso 3 NFF - No Fault Found.

- (13) Retraso por fallos = WITH LOOKUP (Proceso 1/Total de módulos a mantener, ((0,0.5),(0.2,1),(0.4,3),(0.6,6),(0.8,9),(1,12)))
Units: Week
Retraso en el mantenimiento por fallos encontrados, es decir, tiempo perdido por fallos en la reparación de módulos. Tabla del modelo 5 ((0,0.5),(0.2,1),(0.4,3),(0.6,6),(0.8,9),(1,12))
Tabla de simulación 3 ((0,0.25),(0.2,0.5),(0.4,1.5),(0.6,3),(0.8,4.5),(1,6))
- (14) SAVEPER = TIME STEP
Units: Week
The frequency with which output is stored.
- (15) Tasa de reparación=IF THEN ELSE(Proceso 1/Adaptación de la capacidad del taller<1,0,Carga de trabajo)
Units: Módulos/Week
Si las tareas del Proceso 1 es menor que 1 (son = 0) no se hace ninguna, en caso contrario se hace el Trabajo requerido.
- (16) TAT=10
Units: Week
Tiempo medio de la reparación de un motor.
- (17) Tiempo remanente= MAX(TAT-Time,0)
Units: Week
Cuenta el plazo remanente en cada momento, empezando por 10 semanas hasta llegar a 0.
- (18) TIME STEP = 0.25
Units: Week
The time step for the simulation.
- (19) Total de módulos a mantener= 240
Units: Módulos
Total de módulos previstos mantener para una flota de 20 motores, con una media de 12 módulos por motor.