



ANÁLISIS AUTOMÁTICO DE MODELOS COMPLEJOS
UTILIZANDO HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA
ARTIFICIAL PARTIENDO DEL EJEMPLO DEL WORLD3



UNIVERSIDAD de VALLADOLID



ESCUELA de INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

INGENIERO TÉCNICO INDUSTRIAL, ESPECIALIDAD EN MECÁNICA

PROYECTO FIN DE CARRERA

**ANÁLISIS AUTOMÁTICO DE MODELOS
COMPLEJOS UTILIZANDO HERRAMIENTAS
DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARTIENDO
DEL EJEMPLO DEL WORLD3**

Autor:

Retortillo Atienza, Pedro Manuel

Tutora:

Mediavilla Pascual, Margarita

Ingeniería de Sistemas y Automática

SEPTIEMBRE — 2013



ANÁLISIS AUTOMÁTICO DE MODELOS COMPLEJOS
UTILIZANDO HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA
ARTIFICIAL PARTIENDO DEL EJEMPLO DEL WORLD3



UNIVERSIDAD de VALLADOLID



ESCUELA de INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

PROYECTO FIN DE CARRERA

**ANÁLISIS AUTOMÁTICO DE MODELOS
COMPLEJOS UTILIZANDO HERRAMIENTAS
DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARTIENDO
DEL EJEMPLO DEL WORLD3**

Autor:

Retortillo Atienza, Pedro Manuel

SEPTIEMBRE — 2013

DEDICATORIAS

A mi padre que me introdujo en el mundo de la ingeniería.

A toda mi familia que ha soportado conmigo la carga de este proyecto.

A mis amig@s, por estar ahí.

A Margarita Mediavilla que me enseñó la magia de la dinámica de sistemas y la potencia de Simulink.

A Fernando Frechosos que me introdujo en el mundo de las Energías Renovables.

A Yvan Dutil profesor asociado en la Universidad de Quebec en Rimonsky, que ha presentado nuestro trabajo a Dennis Meadows y Graham Turner.

A mis socios del BAH! Valladolid, del Solar Decathlon Europe 2010 y del Área de Cooperación Internacional de la Uva, excelentes compañeros y compañeras con quienes he trabajado y trabajo en proyectos coherentes con los principios defendidos en este Proyecto Fin de Carrera.

A TOD@S VOSOTR@S MUCHAS GRACIAS

Resumen Proyecto Fin de Carrera

ANÁLISIS AUTOMÁTICO DE MODELOS COMPLEJOS
UTILIZANDO HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA
ARTIFICIAL PARTIENDO DEL EJEMPLO DEL WORLD3

Septiembre 2013

Pedro Manuel Retortillo Atienza

Resumen

1 INTRODUCCIÓN

Este proyecto fin de carrera trata del análisis por computador utilizando herramientas de Inteligencia Artificial orientado a modelos socioeconómicos complejos basados en dinámica de sistemas. Estas herramientas las vamos a probar en un modelo ampliamente conocido y muy complejo como es el World3.

El modelo World3 es una simulación por ordenador de las interacciones entre la población, el crecimiento industrial, la producción de alimentos y los límites de los ecosistemas de la Tierra (Donella Meadows, 1972).

La dinámica de sistemas, situada en el área de conocimiento de la Teoría General de Sistemas y la Automática, nació en los años '50 a partir de la aplicación de la teoría de los sistemas dotados de estructura de realimentación a un caso concreto de gestión industrial. (Aracil, 1986). Esta metodología, cuyo objetivo es construir modelos dinámicos de sistemas sociales basados en la opinión de expertos y el uso de la simulación mediante técnicas de computación, es una herramienta que cubre hoy un amplio campo de aplicaciones, desde la gestión de empresas a la construcción de modelos urbanos, sociológicos y ecológicos.

El hecho de que las herramientas de dinámica de sistemas no estén pensadas para estos análisis con Inteligencia Artificial, requiere otras herramientas sacadas de la ingeniería como Matlab y Simulink. Simulink es una herramienta interactiva para modelar, simular y analizar sistemas dinámicos. Simulink nos permite construir diagramas de bloque gráficos, evaluar el rendimiento del sistema y refinar sus diseños. Una vez construido un modelo en Simulink podemos usar sus herramientas incorporadas de Inteligencia Artificial como el análisis de sensibilidad, el clustering o la lógica difusa.

2 JUSTIFICACIÓN

Incluso la ejecución simple de un modelo de tamaño medio basado en sistemas dinámicos puede ser un proceso engorroso, ya que la incertidumbre de los parámetros obliga al modelista a considerar muchas simulaciones antes de estar seguro de cómo se comporta el modelo. Los paquetes estándar para simulaciones dinámicas incluyen algunas herramientas de análisis, pero en muchas ocasiones sería deseable poder personalizar estas herramientas. Por ejemplo, a otro le gustaría ser capaz de programar de forma iterativa distintas simulaciones y realizar operaciones matemáticas con los resultados, extraer información estadística de los datos. O también utilizar técnicas más sofisticadas, por ejemplo, las que provienen de la Inteligencia Artificial, tales como la lógica difusa (fuzzy logic), o las agrupaciones (clustering), y automatizar la revisión de los resultados.

La lógica difusa ("fuzzy logic" en inglés) se adapta al mundo real en el que vivimos, e incluso puede comprender y funcionar con nuestras expresiones, del tipo "hace mucho calor", "no es muy alto", "el ritmo del corazón está un poco acelerado", etc.

La agrupación de datos numéricos (clustering) constituye la base de clasificación y modelado de muchos sistemas de algoritmos.

Fuzzy c-medios (FCM) es una técnica de agrupación de datos en donde cada punto de datos se caracteriza por un grado de pertenencia a cada grupo. Esta técnica es una mejora sobre métodos de agrupación anteriores.

El uso de estas técnicas es interesante para nuestros propósitos ya que nos permite trabajar con el modelo de atrás hacia adelante, es decir buscando qué simulaciones son interesantes (para evaluar esto utilizamos la lógica difusa sobre curvas seleccionadas como huella ecológica e índice de desarrollo humano) y vemos qué grupos de valores iniciales han generado esas curvas. Esos valores iniciales, los agrupamos en clústers y buscamos sus centros.

Veremos casos de más de tres dimensiones, donde los análisis gráficos son imposibles y los análisis parciales son enormemente complicados de llevar a cabo. Las técnicas de clustering nos dan informaciones válidas y muy interesantes que condensan muchas características y mucha información en unos pocos parámetros y ejecuciones ejemplares o significativas.

Este trabajo explora las posibilidades que un lenguaje de programación (Matlab-Simulink) nos da para el análisis de modelos basados en dinámica de sistemas. Asimismo, muestra las posibilidades de algunas de las herramientas tomadas de la oferta de la Inteligencia Artificial para el análisis de estos modelos. Hemos aplicado varias técnicas para el análisis de un modelo conocido y muy complejo: el World3. Estas herramientas han sido: el trazado de varias simulaciones, la agrupación en clústers, la lógica difusa, análisis de correlación, etc. Todas ellas permiten al programador automatizar el control de los resultados y dar más información sobre la relación entre los parámetros de entrada cambiantes y los resultados.

Pretendemos mostrar que usando estas plataformas de ingeniería es fácil programar simulaciones automáticamente, extraer características estadísticas y analizar los resultados con mejores herramientas y ver la dependencia de los parámetros entre sí con los resultados. El coste de programación una vez que se conoce esta plataforma es muy bajo. Se ha visto que la lógica difusa aporta ideas interesantes a la hora de automatizar análisis de curvas.

3 ESTRUCTURA DEL PROYECTO

Veamos cómo hemos organizado este proyecto:

En el **capítulo 2** introduciremos la dinámica de sistemas estudiando sus orígenes.

En el **capítulo 3** haremos un estudio a fondo del World 3 partiendo de los tres libros publicados por los autores hasta ahora.. Para ello hemos estudiado los escenarios descritos que podríamos agrupar en 3 tipos:

- Por un lado el escenario 1 Bussinees as usual, el actual en el cual todo sigue como hasta ahora,
- Por otro lado los escenarios de las soluciones tecnológicas que atacan a mejoras en la eficiencia energética, mejoras en la limitación de los impactos de la contaminación y mejoras en la productividad de la tierra. Estas medidas sólo tecnológicas parecen insuficientes para conseguir la sostenibilidad en el largo plazo.

- Otro conjunto de escenarios que podríamos llamar “escenarios del mundo estabilizado” donde aparte de medidas tecnológicas, se nos presentan medidas de limitación voluntaria de la población y el consumo y limitar el crecimiento económico hasta hacerlo compatible con los límites biofísicos del planeta.
- El World3 en su última versión (Meadows, Meadows, & Randers, 2004) contiene más lazos o subsistemas que no son contemplados en ninguno de los 13 escenarios descritos en los libros, pero que nosotros si hemos utilizado para ver cómo se modificaba el mundo al modificarlos. Estos lazos permiten ya políticas conducentes a la conservación del suelo, medidas tendentes a ampliar el periodo de vida de las instalaciones y productos industriales y de servicios y políticas de población más restrictivas.

Una vez comprendido el alcance del modelo se nos ocurrieron ciertos experimentos como los antes mencionados que ya no se podían hacer con el Stella. Y otra cuestión muy recursiva en dinámica de sistemas: al hacer sistemas tan grandes, estos se convierten ya en cajas negras que sólo el modelador y no siempre comprende. ¿Cómo varían unas variables al variar otras? ¿Cómo de sensibles son con respecto a los resultados? Bien, si en los paquetes estándar de dinámica de sistemas no se pueden hacer estas cosas, pasémoslo a Simulink y hagamos esos estudios. Con Simulink podemos plantear de forma sencilla, gráfica e intuitiva ecuaciones diferenciales en el tiempo y utilizar sistemas de retroalimentación.

En el **capítulo 4** empezamos describiendo todo lo que necesitamos de Simulink para hacer modelos basados en dinámica de sistemas. Vimos como traducir todos los diagramas de Forrester utilizados en el World3 así como configurar los pasos de integración y los solvers para que fuesen idénticos en Stella y en Simulink. Una vez descritas las posibilidades y explicado el funcionamiento de Simulink nos pusimos a reconstruir una a una todas las estructuras de dinámica de sistemas descritas en el capítulo 2, tanto las simples como las más complejas, incluyendo retrasos, bloque condicionales y subsistemas.

En el **capítulo 5** se presenta cómo construimos el modelo completo, subsistema a subsistema, calibrando por separado cada uno de ellos, y una vez construidos y calibrados todos, procedimos a su ensamblaje.

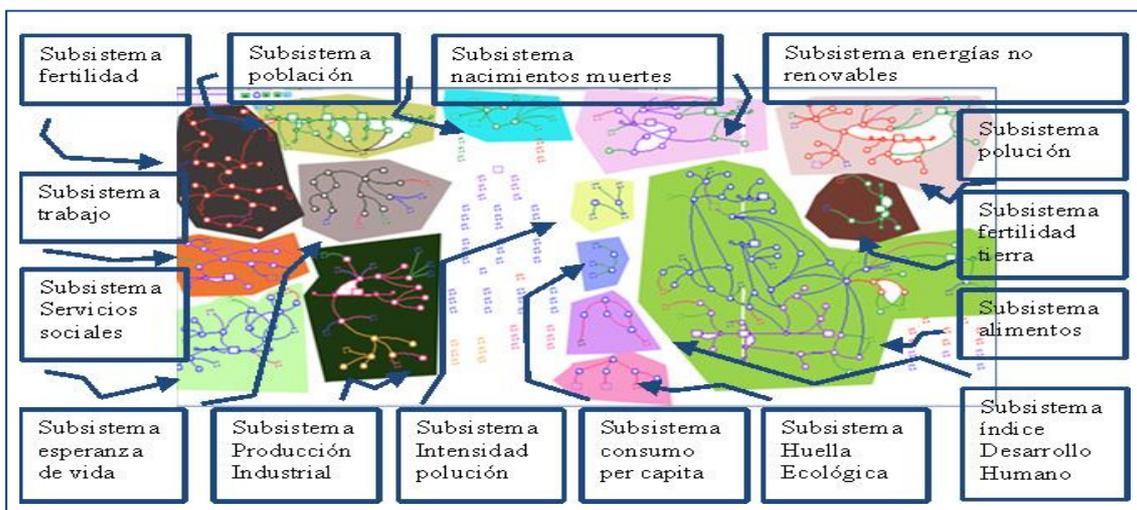


Figura1. El World3 en Stella dividido en 15 subsistemas.

Lógica difusa. La utilizamos para evaluar determinadas curvas y valorar si se corresponden con escenarios de mundos equilibrados y sustentables

Clustering. Mediante la técnica de fuzzy hemos seleccionado las curvas de HWI y HEF que de forma simultánea tienen un grado de bondad superior a 0.6. Ahora con las técnicas de clustering vamos a agrupar y a buscar los centros de las nubes de puntos que dan valores positivos.

Veamos un pequeño ejemplo de lógica difusa, analizando la curva población.

En la teoría de conjuntos difusos se definen también las operaciones de unión, intersección, diferencia, negación o complemento, y otras operaciones sobre conjuntos, en los que se basa esta lógica.

La lógica difusa nos permite definir si el resultado de una simulación ha sido bueno, muy bueno o por el contrario, ha sido catastrófico y cómo de catastrófico ha sido. Veamos cómo analizaríamos una curva de población.

SI

la población final es baja

O

0,5 * año del pico de la población es bajo

O

0.7 * la pendiente final de la curva población es bajo

ENTONCES → EL resultado es una catástrofe

Figura 3.- Criterios para valorar el carácter catastrófico de una simulación atendiendo a la curva de población.

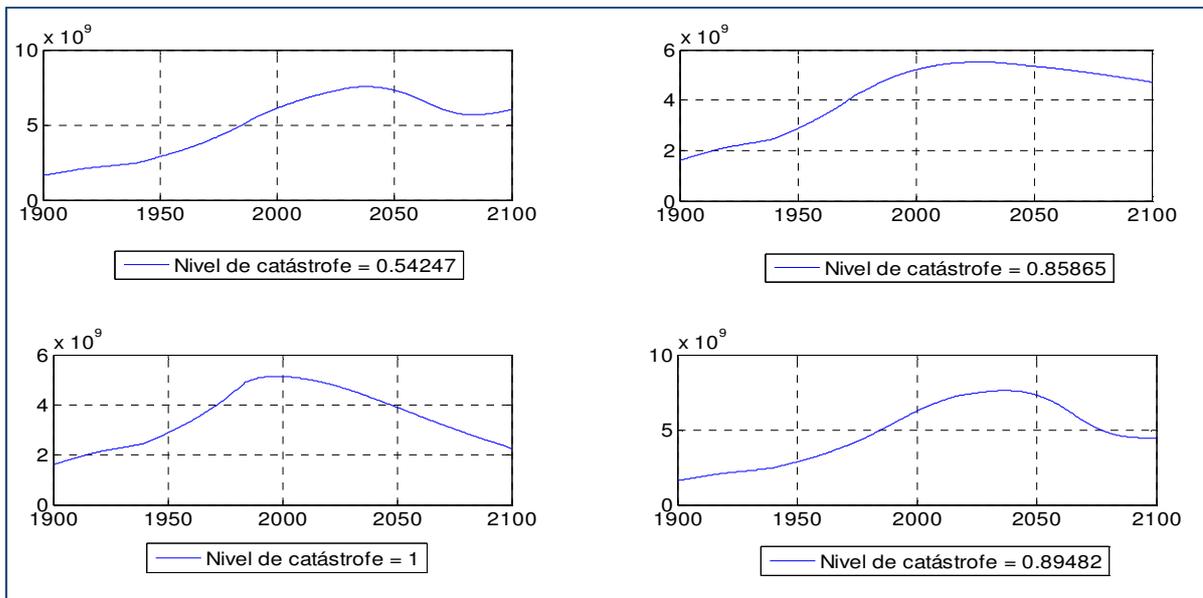


Figura 4.- Distintos ejemplos de evaluación del nivel de catástrofe de una simulación partiendo de la curva de población.

Para decir si la población final es alta o baja, la comparamos con un valor alto y un valor bajo de referencia. Las leyes de unión, intersección y negación han sido explicadas en el punto 7.3. Podemos utilizar más reglas como por ejemplo que la diferencia entre el máximo y el mínimo sea grande o pequeña, podemos utilizar los valores de una variable en un punto, por ejemplo la población en el 2050. Las pendientes de la población acusadas son síntoma de desequilibrio en una variable, al contrario que pendientes pequeñas o planas, que son ofrecen imagen de estabilidad.

5 CONCLUSIONES

¿Qué nubes de puntos nos dieron resultados óptimos? ¿Se podrían agrupar esos puntos de alguna forma? ¿Se les puede localizar un centro a cada grupo? ¿En qué medida están bien agrupados en torno a un centro? ¿Se puede hacer un histograma con los resultados más frecuentes? ¿A partir de qué años ya no hay soluciones atractivas? ¿En torno a qué valores de recursos iniciales no renovables se dieron estas soluciones que garantizaron la sostenibilidad y la satisfacción de las necesidades materiales de las personas?

En cada experimento realizado se ha explicado el código utilizado para que el usuario pueda modificarlo a voluntad y sacarle todo el jugo a este gran modelo mundial aún hoy vigente.

Finalmente añadir que el modelo `simuworld3.mdl` así como todos sus experimentos está protegido con una patente Creative Common y que está accesible en la página de Energía y Dinámica de Sistemas de la Universidad de Valladolid.

6 BIBLIOGRAFÍA

Aracil, J. (1986). *Introducción a la dinámica de sistemas*.

Donella Meadows, D. M. (1972). *Los límites del crecimiento*. New York.

Meadows, D., Meadows, D., & Randers, J. (2004). *Limits to Growth. The 30 Year Update*. Chelsea Green Publishing Co.



ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	7
1.1	INTRODUCCIÓN.....	9
1.2	JUSTIFICACIÓN.....	10
1.3	OBJETIVOS.....	11
1.4	PLAN DE DESARROLLO DEL PROYECTO.....	12
2.	DINÁMICA DE SISTEMAS.....	15
2.1	DEFINICIÓN.....	17
2.2	DESARROLLO DE DIAGRAMAS CAUSALES.....	20
2.3	DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA DE DESARROLLO DE MODELOS.....	22
2.4	UN LENGUAJE ELEMENTAL PARA LA DESCRIPCIÓN DE SISTEMAS. DIAGRAMAS DE FORRESTER.....	24
2.5	BUCLE DE REALIMENTACIÓN NEGATIVA.....	27
2.6	BUCLE REALIMENTACIÓN POSITIVA.....	30
2.7	RETRASOS.....	32
2.8	SISTEMAS GENÉRICOS Y ESTRUCTURAS COMPLEJAS.....	33
2.9	DIAGRAMAS DE FORRESTER EN STELLA.....	35
2.9.1	Elementos característicos simples.....	35
2.9.2	Elementos característicos complejos.....	37
3.	EL WORLD3.....	41
3.1	DESCRIPCIÓN DEL MODELO.....	43
3.2	EI CAPITAL Y LA PRODUCCIÓN EN EL WORLD3.....	47
3.3	LOS ESCENARIOS DEL WORLD 3.....	48
3.3.1	Escenario1: “El ensayo estándar de los límites del crecimiento”.....	48
3.3.2	Escenario2: “Se duplican los recursos del escenario1”.....	50
3.3.3	Escenario3: “Duplicación de recursos y empleo de tecnología para el control de la contaminación”.....	52
3.3.4	Escenario4: “Duplicación de recursos y tecnología para el control de la contaminación e incremento el rendimiento de la tierra”.....	56
3.3.5	Escenario5: “Duplicación de recursos y tecnología para el control de la contaminación, incremento del rendimiento de la tierra y protección de la erosión del suelo”.....	60



3.3.6	Escenario6: “Duplicación de recursos y tecnologías para el control de la contaminación, incremento del rendimiento de la tierra, protección de la erosión del suelo y tecnología eficiente en recursos”	62
3.3.7	Escenario7: “Aplicación de todas las tecnologías con menor retraso”	65
3.3.8	Escenario8: “El mundo adapta objetivos estables de población en 1995”	67
3.3.9	Escenario9 “El mundo adopta objetivos estables de población y producción industrial en 1995”	68
3.3.10	Escenario10 “Población e industria estabilizadas con tecnologías para reducir las emisiones, la erosión y el uso de recursos adoptadas en 1995”	71
3.3.11	Escenario11 “Población e industrias estabilizadas con tecnologías para reducir las emisiones, la erosión y el uso de los recursos, adoptadas en 1975”	72
3.3.12	Escenario12 “Población e industrias estabilizadas con tecnologías para reducir las emisiones, la erosión y el uso de recursos, adoptadas en el 2015”	73
3.3.13	Escenario13 “Políticas de equilibrio pero con objetivos más altos de producción industrial y de alimentos”	74
3.3.14	Algunas posibilidades más del World3 no recogidas en los escenarios descritos	75
3.4	CONCLUSIONES DE LOS ESCENARIOS	82
4.	SIMULINK COMO POSIBILIDAD DE REPRESENTAR SISTEMAS DINÁMICOS. EL WORLD3 EN SIMULINK	85
4.1	¿QUÉ ES SIMULINK?	87
4.2	CONSTRUIR UN MODELO EN SIMULINK	88
4.2.1	Ventanas y Menús en Simulink	88
4.2.2	Construcción de un modelo	88
4.2.3	Seleccionar objetos	89
4.2.4	Manipulación de bloques	90
4.2.5	Manipulación de líneas	94
4.2.6	Resumen de las acciones del ratón y del teclado	98
4.2.7	Añadir anotaciones de texto al diagrama del modelo	99
4.3	CREAR SUBSISTEMAS	100
4.4	MODELAR ECUACIONES	102
4.5	PRIMEROS PASOS EN LA TRADUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE DINÁMICA DE SISTEMAS	122
4.5.1	El stock, nivel	122
4.5.2	Flujos, Flows	122
4.5.3	Funciones	123
4.5.4	Constantes	124
4.6	ELEMENTOS CARACTERÍSTICOS COMPLEJOS	126
4.6.1	Construcción de una tabla en Simulink	126
4.6.2	Construcción de un bloque smooth1 en Simulink	127
4.6.3	Construcción de un bloque smooth3 en Simulink	128
4.6.4	Construcción de un bloque condicional	131



5	CONSTRUCCIÓN DEL WORLD3 EN SIMULINK.....	133
5.1	PREPARAR LOS PARÁMETROS DE SIMULACIÓN	136
5.2	ESTUDIO DE LAS JERARQUÍAS DEL WORLD3-2003 EN ESTELLA. ..	138
5.3	DEFINICIÓN Y SEGMENTADO DE SUBSISTEMAS	139
5.3.1	Nivel 1	139
5.3.2	Nivel 2	140
5.4	CONSTRUCCIÓN DEL SUBSISTEMA EMPLEO	143
5.4.1	Definición de entradas y salidas	143
5.4.2	Subsistema Empleo en Simulink	144
5.4.3	Calibrado del subsistema	145
5.5	CONSTRUCCIÓN DEL SUBSISTEMA INDUSTRIAL	149
5.5.1	Definición de entradas y salidas	153
5.5.2	Subsistema Industrial en Simulink	154
5.5.3	Calibrado del subsistema con entradas constantes	156
5.5.4	Calibrado del subsistema con entradas variables	157
5.6	SIMULACIÓN DE POLÍTICAS USANDO M-FILES.....	159
5.6.1	Introducción a las correlaciones y al análisis de sensibilidad con el subsistema industrial.....	159
5.6.2	Avanzando un poco más las correlaciones. Uso de la función corrcoef. 161	
5.6.3	Conclusiones al experimento.....	163
5.7	ANÁLISIS ENERGÍA - PRODUCCIÓN INDUSTRIAL.....	165
5.7.1	Correlaciones entre las políticas energéticas y de limitación del consumo con la producción industrial per cápita.....	167
5.7.2	Conclusiones al experimento.....	168
6.	MONTAJE COMPLETO DE LA APLICACIÓN. CÓMO USAR SIMUWORLD3. 170	
6.1	SELECCIÓN DE ENTRADAS Y SALIDAS.....	172
6.2	PRESENTACIÓN DEL MODELO TOTALMENTE CONSTRUÍDO Y DEL FICHERO BÁSICO PARA EJECUTARLO	179
6.3	CALIBRANDO EL ESCENARIO 1 CON LOS VALORES DE HWI y HEF 181	
6.4	CALIBRANDO EL ESCENARIO 10	182
6.4.1	Descripción del escenario	182
6.4.2	Datos a modificar en smw3_basico.m.....	183
6.4.3	Comparativa de gráficas del escenario 10.	184
6.5	CONCLUSIONES AL MONTAJE COMPLETO DE LA APLICACIÓN	187



7.	USO DE HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL SOBRE EL WORLD3 USANDO SIMULINK.....	188
7.1	TRAZADO DE VARIAS SIMULACIONES.....	193
7.1.1	Estudio de los rangos de variación	193
7.1.2	Conclusiones del trazado de varias simulaciones.....	197
7.2	CORRELACIONES	199
7.2.1	Correlaciones entre políticas y huella ecológica	199
7.2.2	Comparando ploteados y parámetros	201
7.2.3	Comparando ploteados y salidas	203
7.3	LÓGICA DIFUSA	205
7.3.1	Introducción a la lógica difusa.....	205
7.3.2	El uso de la lógica difusa en el World 3	207
7.4	FUZZY CLUSTERING	213
7.4.1	Aplicaciones del Fuzzy Clustering en el World3.	214
7.4.2	Agrupando parámetros y resultados en clústers 3D	216
7.4.3	Valorando los índices de agrupamiento.....	218
7.4.4	Clústers en espacios de dimensión - n.....	220
8.	CONCLUSIONES.....	224
8.1	RESUMEN DEL TRABAJO REALIZADO	226
8.1.1	Cómo usar simuworld3.mdl	230
8.1.2	Experimentos con lógica difusa y clústers	232
8.2	CONCLUSIONES FINALES	236
8.3	LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO	237
9.	ANEXO1. LISTADO DE CÓDIGOS	240
9.1	CÓDIGO1. Trazado simple de varias simulaciones sobre el subsistema industrial	242
9.2	CÓDIGO2. Simulación de un subsistema con una gráfica 3D	243
9.3	CÓDIGO3. Correlaciones en un subsistema.....	244
9.4	CÓDIGO4. Trazado de un escenario	246
9.5	CÓDIGO5. Varias simulaciones	248
9.6	CÓDIGO6. Estudio de correlaciones	252
9.7	CÓDIGO7. Comparando ploteados y parámetros.....	256
9.8	CÓDIGO8 Análisis Fuzzy sobre la curva de población.....	258
9.9	CÓDIGO9 Análisis Fuzzy sobre la curva de HEF y HWI. Selección de parámetros de entrada que generan salidas óptimas	260
9.10	CÓDIGO10 Fuzzy clustering seleccionado 2 entradas y una salida.....	264



9.11	CÓDIGO11. Fuzzy clustering con 18 entradas y una salida.....	268
10.	BIBLIOGRAFÍA.....	272



ANÁLISIS AUTOMÁTICO DE MODELOS COMPLEJOS
UTILIZANDO HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA
ARTIFICIAL PARTIENDO DEL EJEMPLO DEL WORLD3





1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DEL PROYECTO



ANÁLISIS AUTOMÁTICO DE MODELOS COMPLEJOS
UTILIZANDO HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA
ARTIFICIAL PARTIENDO DEL EJEMPLO DEL WORLD3





1.1 INTRODUCCIÓN

Este proyecto fin de carrera trata del análisis por computador utilizando herramientas de Inteligencia Artificial orientado a modelos socioeconómicos complejos basados en dinámica de sistemas.

Estas herramientas las vamos a probar en un modelo ampliamente conocido y muy complejo como es el World3. Aprovechando estas herramientas vamos a intentar profundizar más en él. Debido a la complejidad de este modelo este análisis nos va permitir conocerlo mejor. El hecho de que las herramientas de dinámica de sistemas no estén pensadas para estos análisis con inteligencia artificial, requiere un análisis con otras herramientas sacadas de la ingeniería como Matlab y Simulink. Simulink es una herramienta interactiva para modelar, simular y analizar sistemas dinámicos. Simulink nos permite construir diagramas de bloque gráficos, evaluar el rendimiento del sistema y refinar sus diseños. Una vez construido un modelo en Simulink podemos usar sus herramientas incorporadas de inteligencia artificial como el análisis de sensibilidad, el clustering o la lógica difusa.

Estas herramientas fueron desarrolladas en el departamento de Ingeniería de sistemas y automática de la EUP de Valladolid y sirvieron de base a un artículo “An attempt to automate the analysis of complex system dynamics models: an example of WORLD 3” (Mediavilla, Retortillo, de Miguel, & de Castro, 2008)

La dinámica de sistemas, situada en el área de conocimiento de la Teoría General de Sistemas y la Automática, nació en los años '50 a partir de la aplicación de la teoría de los sistemas dotados de estructura de realimentación a un caso concreto de gestión industrial. (Aracil, 1986). Este desarrollo, denominado Dinámica Industrial, y realizado por Jay W. Forrester, Ingeniero Electrónico del MIT (Instituto de Tecnología de Massachusetts) y sus discípulos, como Donella y Dennis Meadows, dio paso en los años 70 a una ampliación fundamental para el estudio del mundo como sistema dinámico. Esta metodología, cuyo objetivo es construir modelos dinámicos de sistemas sociales basados en la opinión de expertos y el uso de la simulación mediante técnicas de computación, es una herramienta que cubre hoy un amplio campo de aplicaciones, desde la gestión de empresas a la construcción de modelos urbanos, sociológicos y ecológicos.

La dinámica de sistemas implica una reflexión acerca de cómo la estructura de un sistema determina su comportamiento, es decir, como van evolucionando en el tiempo las variables del sistema y las relaciones que las ligan.

El modelo World3 es una simulación por ordenador de las interacciones entre la población, el crecimiento industrial, la producción de alimentos y los límites de los ecosistemas de la Tierra. Aunque inicialmente no fue ideado como herramienta predictiva, algunos estudios más recientes como los realizados por Graham Turner de la **Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO)** y publicados en el artículo “A comparison of the limits to growth with thirty years of reality” (Turner, A comparison of the limits to growth with thirty years of reality, 2008) han demostrado que las dinámicas internas de este modelo siguen teniendo vigencia hoy en día.



1.2 JUSTIFICACIÓN

La imposibilidad de asumir dinámicas de crecimiento exponencial ilimitado en un entorno de recursos finitos es una realidad cada vez más asumida no sólo en círculos ecologistas, también en organizaciones sociales de carácter sindical vecinal etc. Muchas Escuelas de Ingeniería de todo el mundo tienen alguna cátedra, algún área o departamento dedicados a tal fin. Sin embargo esta percepción de que es imposible que 7000 millones de personas puedan vivir como vive un alemán o un estadounidense medio que es compartida cada vez por más gente, no es tan comúnmente percibida por la clase política de ninguno de los países de los que habitualmente se tienen noticias, quizá con la salvedad de Cuba y Buthan.

En el Club de Roma también tuvieron constancia de estas limitaciones y por eso encargaron al MIT un estudio al respecto. El resultado de este estudio fue el modelo basado en dinámica de sistemas World 3. La comprensión de este modelo es muy útil, a juicio de los autores, para comprender las relaciones existentes entre población, nivel de vida material de las personas, servicios elementales como sanidad y educación, recursos limitados del planeta, contaminación persistente y producción de alimentos. Su comprensión, como decimos, puede ayudarnos a diseñar el mundo en que queremos vivir sin comprometer el futuro de la vida en el Planeta. Y pensamos además que se le puede extraer más jugo si se analiza más en profundidad. Por ejemplo, en vez de estudiar los 14 escenarios que plantean los autores, uno puede querer ver qué políticas obtienen los Índices de desarrollo humano más altos con huellas ecológicas más bajas y además, en función de en qué año se puedan poner en marcha determinadas políticas correctoras, con qué intensidad se deben aplicar estas medidas.

Incluso la ejecución simple de un modelo de tamaño medio basado en sistemas dinámicos puede ser un proceso engorroso, ya que la incertidumbre de los parámetros obliga al modelista a considerar muchas simulaciones antes de estar seguro de cómo se comporta el modelo. Los paquetes estándar para simulaciones dinámicas incluyen algunas herramientas de análisis, pero en muchas ocasiones sería deseable poder personalizar estas herramientas. Por ejemplo, a otro le gustaría ser capaz de programar de forma iterativa distintas simulaciones y realizar operaciones matemáticas con los resultados, extraer información estadística de los datos, o utilice las técnicas sofisticadas, por ejemplo, los que provienen de la inteligencia artificial, tales como la lógica difusa (fuzzy logic), o las agrupaciones (clústering), y automatizar la revisión de los resultados.

En este trabajo exploramos las posibilidades de un lenguaje de programación Matlab, y su herramienta de simulación, Simulink, para aquellas posibilidades mencionadas. Estos lenguajes que provienen del campo de la ingeniería ofrecen muchas posibilidades interesantes debido a su capacidad de programación. Permiten el desarrollo de herramientas de análisis personalizados a un costo muy bajo de programación. El modelo World3 es un ejemplo típico de un modelo grande, cuyo análisis se convierte en una tarea difícil. Hemos programado este modelo en Simulink para realizar un análisis de este modelo con las herramientas indicadas anteriormente.



1.3 OBJETIVOS

El objetivo del proyecto es traducir a Matlab el World 3 (W3) en su versión 2003 y analizarlo con herramientas de inteligencia artificial. Para ello en primer lugar expondremos los fundamentos de la dinámica de sistemas (DS), explicando sus estructuras fundamentales, a través de los diagramas de Forrester. Utilizaremos varios subsistemas del W3 investigando las dinámicas que hay dentro, y después reconstruiremos todos los subsistemas, los acoplaremos y calibraremos los resultados del modelo original W3 2003 con los obtenidos al utilizar Matlab.

Una vez traducido, utilizaremos las herramientas ingenieriles. Se puede utilizar la potencia de Matlab, para usando análisis de sensibilidad, clústers, fuzzy-logic, indagar las complejas relaciones económico-energéticas del modelo a escala mundial. Los pasos a dar para llevar este estudio son los siguientes:

1. Estudiar la dinámica de sistemas y sus características fundamentales: empleo de ecuaciones diferenciales, ciclos de realimentación y retrasos en la transferencia de información.
2. Representación de las estructuras típicas de DS en el programa Stella. El programa Stella es el soporte informático para construir las versiones 93 y 03 del W3. El W3 contiene todas las estructuras utilizadas en DS, así que utilizamos fragmentos del W3 para explicar todas las estructuras de la DS.
3. Estudiar el W3 y su alcance como modelo interpretativo, así como la validez de sus estimaciones.
4. Descripción de los escenarios presentados en el libro “Más allá de los límites del crecimiento” para entender cómo simular políticas e interpretar sus resultados.
5. Descripción de las herramientas de Simulink necesarias para hacer este proyecto.
6. Fragmentar el W3 en subsistemas y traducir cada subsistema a Simulink.
7. Calibrar cada subsistema y emplear algunas herramientas de Inteligencia Artificial como el análisis de sensibilidad para determinar qué variables de entrada tienen más incidencia sobre las variables de salida en el subsistema. Analizar las interacciones entre los bloques más significativos y repetir los análisis de sensibilidad.
8. Acoplar todos los subsistemas y calibrar el montaje global con respecto a algunos escenarios del W3 descritos en los libros de los límites del crecimiento.
9. Demostrar la potencia de Simulink para generar escenarios continuos utilizando rangos de valores en las variables de entrada.
10. Usar herramientas de inteligencia artificial sobre todo el modelo para evaluar qué políticas se pueden establecer a partir de ahora para lograr un alto nivel de desarrollo humano compatible con los recursos limitados del Planeta.
11. Elaborar unas conclusiones al trabajo realizado



1.4 PLAN DE DESARROLLO DEL PROYECTO

1. En la Introducción del capítulo hemos presentado la descripción de los sistemas complejos, enumerando sus aspectos más básicos para presentar la dinámica de sistemas como uno de los métodos del enfoque sistémico. Cuando usamos los ordenadores para ayudarnos en el estudio de los sistemas dinámicos entramos en el mundo de los sistemas computerizados basados en dinámica de sistemas.
2. Como ejemplo de sistemas dinámicos informatizados hemos elegido el World3 por las siguientes razones:
 - 2.1 Es uno de los más conocidos.
 - 2.2 Es suficientemente complejo como para poder explicar todas las estructuras que utiliza la dinámica de sistemas.
 - 2.3 El tema que estudia: Las posibilidades de crecimiento continuo en un entorno de recursos finitos.
 - 2.4 Nos ofrece la posibilidad de avanzar en sus implicaciones, de sacarle más jugo al poder utilizar las herramientas de inteligencia artificial que posee Simulink de Matlab.
3. Hacemos un estudio más pormenorizado de la dinámica de sistemas presentando sus elementos y estructuras características.
 - 3.1 Los diagramas causales.
 - 3.2 Metodología del desarrollo de modelos.
 - 3.3 Diagramas de Forrester.
 - 3.4 Bucles de realimentación.
 - 3.5 Retrasos
 - 3.6 Sistemas genéricos y estructuras complejas.
4. A continuación analizamos estas estructuras propias de los diagramas de Forrester en el programa para dinámica de sistemas Stella con el que se construyeron la versión 91 y 03 del World3.
5. Antes de comenzar la traducción del modelo subsistema a subsistema hacemos una presentación de las distintas ediciones del World3: quiénes son sus autores, en cuántos subsistemas se descompone, con cuántos escenarios trabaja, a qué conclusiones llega.
6. Ya en el capítulo 5 empezamos a trabajar con Simulink, la aplicación de Matlab con la que desarrollaremos este proyecto. **MATLAB** (abreviatura de *MATrixLABoratory*, "laboratorio de matrices") es un software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Está disponible para las plataformas Unix, Windows y Mac OS **Simulink** es un entorno de programación visual, que funciona sobre el entorno de programación Matlab. Simulink viene a ser una herramienta de simulación de modelos o sistemas, con cierto grado de abstracción de los fenómenos físicos involucrados en los mismos. En este capítulo desarrollaremos más extensamente las posibilidades de Simulink. También desarrollamos en este capítulo como representar las estructuras propias de la dinámica de sistemas: Así pues la estructura de este capítulo sería:
 - 6.1 Presentación de las herramientas de Simulink.
 - 6.2 Representación de estructuras simples: Niveles, flujos y funciones.



- 6.3 Representación de estructuras complejas: Búsqueda en tablas, bloques condicionales y retrasos.
- 6.4 Subsistemas.
7. Una vez explicado cómo montar todas las estructuras de Forrester utilizadas en el World3 pasamos a construir el World3 completo.
 - 7.1 Primero fragmentamos el modelo en 15 subsistemas.
 - 7.2 Creamos 15 ficheros en Stella sustituyendo las entradas al subsistema por valores constantes o por funciones o tablas.
 - 7.3 Empezamos construyendo un subsistema simple. Elegimos para este menester el subsistema empleo.
 - 7.4 Una vez construido el subsistema lo calibramos, comparando sus resultados con el mismo subsistema creado en Stella.
 - 7.5 Pasamos a construir un subsistema más complejo: el subsistema industrial.
 - 7.6 Calibramos el subsistema industrial, de dos formas, con entradas constantes y con entradas variables. Explicaremos las dos técnicas de calibrado en el capítulo 6.
 - 7.7 Vinculamos dos subsistemas para ver si su comportamiento como par sigue siendo igual de fidedigno que con un único subsistema. Elegimos Energía con Producción Industrial.
 - 7.8 Hacemos una introducción al uso de `m_files` utilizando estos dos subsistemas enlazados para ir valorando la potencia de Simulink para el análisis de sistemas complejos.
8. Una vez construido el World 3 en Simulink lo calibramos con la versión 2003 de Stella y también con los resultados reales desde 1970 apoyándonos en otro paper: *Updated Comparison of The Limits to Growth with Historical Data*
9. Con el modelo totalmente traducido a Simulink, utilizamos herramientas de Inteligencia Artificial como la lógica difusa, el análisis de sensibilidad y el clústering para conocer mejor el modelo e indagar en las complejas relaciones que hay dentro.
10. Finalmente presentamos un capítulo de conclusiones y futuras líneas de trabajo. También hay un anexo con todos los códigos empleados en la simulación.



ANÁLISIS AUTOMÁTICO DE MODELOS COMPLEJOS
UTILIZANDO HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA
ARTIFICIAL PARTIENDO DEL EJEMPLO DEL WORLD3





2. DINÁMICA DE SISTEMAS



ANÁLISIS AUTOMÁTICO DE MODELOS COMPLEJOS
UTILIZANDO HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA
ARTIFICIAL PARTIENDO DEL EJEMPLO DEL WORLD3





2.1 DEFINICIÓN

Podríamos definir sistema (del latín *systema*, proveniente del griego *σύστημα*) como conjunto de partes interrelacionadas que persiguen un mismo fin. La dinámica de sistemas podría intuirse como el estudio de estos sistemas en un entorno cambiante. Existe también el concepto de Ingeniería de Sistemas, que sería una técnica para resolver problemas complejos relativos a sistemas, no solo ingenieriles, también económicos, sociales, psicológicos... (Bertalanfly, 1968) (Aracil, 1986) (García, 2006)

La conceptualización de sistemas como método de resolución de problemas empezó cuando se hizo aparente que el potencial social de las máquinas como herramientas es mucho menos complejo que las posibilidades creadas cuando se combinan máquinas de funciones algo distintas, aunque complementarias (Drew, 1995).

La mayor parte de las teorías y dispositivos desarrollados hasta la Segunda Guerra Mundial tenían la suficiente sencillez como para que fuera posible que una sola persona pudiera comprenderlos. Como ingeniero, Henry Ford conocía todas y cada una de las piezas de su Modelo Ford-T, en su calidad de ejecutivo, conocía todos los aspectos de la producción en serie. La tecnología moderna ya no puede ser comprendida totalmente de esta manera. Es una tecnología asociada con grandes sistemas, con un gran número de elementos constituyentes interdependientes, que sirven para llevar a cabo una función específica; constan también de elementos sociales y técnicos, comparten recursos, y están controlados por un conjunto de objetivos y limitaciones interrelacionados. (Aracil, 1986)

Definimos la ingeniería de sistemas como un método de resolución de problemas complejos donde figura la tecnología, sin estar limitado a ellas, en el contexto de los entornos físicos, sociales, económicos y culturales en los que estos problemas existen; para ello, se usan metodologías de utilidad actual y potencial en el proceso de toma de decisiones en los sectores públicos y privados. No podemos exagerar la importancia, en la creación de sistemas de ingeniería, de los aspectos sociales, económicos, culturales y del entorno. El reconocimiento de que estas consideraciones son esenciales es relativamente nuevo, y por tanto relativamente limitado. Esta nueva importancia es el resultado de la evolución que ha experimentado la ingeniería, desde el dimensionamiento detallado de dispositivos y componentes hasta el diseño de sistemas. Puesto que la ingeniería trata más explícitamente con los sistemas, debemos tratar las nuevas cuestiones y utilizar nuevos medios, apropiados para el desarrollo y análisis de modelos.

Un aspecto importante del enfoque sistémico es la construcción de modelos. Un modelo es una abstracción de la realidad que captura la esencia funcional del sistema, con el detalle suficiente como para que pueda utilizarse en la investigación y la experimentación en lugar del sistema real, con menos riesgo, tiempo y coste. En la medida en que un modelo particular es una representación apropiada del sistema, puede ser una ayuda muy valiosa para el análisis de políticas, la toma de decisiones y la resolución de problemas.

En la ingeniería de sistemas aplicada, se utilizan tres formas complementarias de construcción de modelos: verbal, gráfica y matemática. Los modelos verbales tienden a ser descripciones escritas o expresiones orales del fenómeno en cuestión. De forma explícita, reflejan las ideas implícitas de un modelo mental, y constituyen un medio esencial para mejorarlo, Los modelos gráficos están formados por diagramas que



proporcionan un nexo de unión entre los modelos matemáticos y verbales, por una parte, y el autor del modelo y su audiencia, por la otra.

Los modelos matemáticos son simbólicos ya que para describir un sistema emplean normalmente notaciones matemáticas en forma de ecuaciones. A menudo estas ecuaciones matemáticas tienen representaciones gráficas análogas. Hay tres características de los modelos matemáticos que los hacen particularmente útiles: son precisos, concisos y manejables. Idealmente, esta barrera en la comunicación entre los autores de los modelos y sus usuarios se salva gracias al uso de modelos verbales o gráficos. Con el advenimiento de la Era de los Sistemas han aparecido varias tendencias metodológicas basadas en procedimientos, herramientas y técnicas diferenciadas. Estas incluyen la **programación lineal, la econometría, el análisis de entradas y salidas (input-output), la simulación estocástica y la dinámica de sistemas.**

Todas estas tendencias existentes para el desarrollo de modelos tienen en común varios conceptos relativos a las propiedades de los sistemas del mundo real, el proceso de desarrollo de modelos, el uso del ordenador y el papel de los modelos en el proceso de toma de decisiones. Además de estos conceptos comunes y generales entre todos los modelos matemáticos, cada tendencia metodológica emplea sus propias y únicas hipótesis básicas, o paradigmas, las cuales proporcionan una perspectiva única del mundo, desde el punto de vista de una disciplina particular del desarrollo de modelos, influyendo, de este modo, en el contenido y la forma de sus modelos.

Las distintas metodologías de sistemas pueden diferenciarse por el modo en que las personas que los desarrollan consideran el concepto de modelos. Se ponen de manifiesto tres tendencias.

- En las primeras, se tiene una fe completa en un tipo de modelo matemático, dentro de cuyas limitaciones tiene que representarse. La programación lineal y los modelos de entradas y salidas (input-output) son ejemplos de esto.
- En la segunda, se mantiene que los datos lo son todo; en lugar de desarrollar modelos, los miembros de esta tendencia se limitan a obtener curvas que se ajusten a los datos. La econometría es una metodología de este tipo.
- En la tercera tendencia, se busca la realidad a través de un proceso interactivo entre la experiencia y la información, entre la mente y los datos. La dinámica de sistemas forma parte de esta última tendencia.

Estas tres tendencias del desarrollo de modelos se describen generalmente de la forma siguiente: (1) orientadas hacia la optimización; (2) casuales; y (3) causales. Se cree que los modelos causales tienen la máxima aplicación en la ingeniería de sistemas y reciben la atención central de esta monografía.

Con todo esto en mente, definimos un sistema como un conjunto interconectado de elementos cuya estructura determina todas las modalidades del comportamiento, dinámico, El comportamiento se refiere a los valores de las variables de sistema a lo largo del tiempo. La estructura puede describirse como el número, disposición, polaridad y orden de los bucles de realimentación en el modelo del sistema. (Drew, 1995)



ANÁLISIS AUTOMÁTICO DE MODELOS COMPLEJOS
UTILIZANDO HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA
ARTIFICIAL PARTIENDO DEL EJEMPLO DEL WORLD3





2.2 DESARROLLO DE DIAGRAMAS CAUSALES

La premisa de una metodología de sistemas, tal como la dinámica de sistemas, es que las tendencias dinámicas persistentes en cualquier sistema complejo surgen a partir de sus estructuras causales, y a partir de los objetivos sociales, progreso tecnológico, limitaciones económica, límites físicos y presiones políticas, que hacen que la gente se comporte de la manera que lo hace, y generan de forma acumulada las tendencias dinámicas del sistema total. Por consiguiente, un aspecto esencial del enfoque sistémico para desarrollar modelos es pensar en función de relaciones causa-efecto.

Una herramienta importante para mostrar interacciones causa-efecto entre las variables clave durante el desarrollo del modelo de un sistema dinámico es el diagrama causal.

El primer paso para desarrollar un diagrama causal es identificarla variable clave que describe la situación del problema, y registrar el modo de funcionamiento del sistema que está siendo analizado. Estas variables clave, deducidas de un modelo mental o de una descripción verbal de un sistema, se representan en una hoja de papel. Las relaciones causa-efecto entre pares de variables se representan en la segunda fase por medio de flechas. Por ejemplo, una fuerza aplicada a un objeto puede causar su aceleración, y la relación causal se representa como:

En donde la flecha entre las dos variables puede ser interpretada como <<causa>>. A veces estos diagramas con flecha son más claros si uno se imagina la palabra <<afecta>> o <<influye>> en vez de causa, como en el ejemplo:

En esta manifestación causal en donde se describe una relación entre dos cosas, está implícita la declaración: <<mientras que todas las otras cosas sigan siendo iguales>>. La tercera fase en el desarrollo de un diagrama causal es dar a cada enlace o flecha un signo direccional, mas (+) o menos (-), colocado normalmente cerca de la punta de la flecha. Se presentarán algunos ejemplos y se darán las reglas generales:

Ejemplo 1. Un aumento de la tierra cultivable resulta en un aumento de las cosechas.

TIERRA CULTIVABLE \rightarrow PRODUCCIÓN DE COSECHAS

Ejemplo 2. El aumento en el uso de los cinturones de seguridad disminuirá el número de muertos en la carretera.

USO DE CINTURONES DE SEGURIDAD \rightarrow MUERTOS

Ejemplo 3. La disminución de la mano de obra produce una disminución del desempleo.

MANO DE OBRA \rightarrow DESEMPLEO

Las relaciones causales entre las variables a veces se cierran sobre sí mismas y forman bucles de realimentación. Dentro de un bucle de realimentación, un cambio en una variable se transmite a través de la cadena entera de variables que forman el bucle,



hasta que la causa inicial produce un efecto indirecto sobre sí misma. Un aspecto clave del análisis de un sistema es centrar la atención sobre los bucles de realimentación.

Podemos hablar de cuatro niveles jerárquicamente distintos de la estructura del sistema de realimentación: variable, enlace, bucle de realimentación y sistema de realimentación. Una variable es una cantidad que puede cambiar en función del tiempo. Puede ser una variable de decisión o una cantidad que se ve afectada por dichas decisiones. Cuando la variable no es afectada por otras variables del sistema, se denomina como <<exógena>> o externa al sistema. Una variable que es afectada por las otras variables del sistema se denomina “endógena”.

Un enlace es la relación causa-efecto entre dos variables ilustrada mediante una flecha en el diagrama causal. Un bucle de realimentación consiste en dos o más enlaces conectados de tal modo que, a partir de cualquier variable, se puedan seguir las flechas y volverá la variable inicial. En toda ilustración causa-efecto de un bucle de realimentación están implícitos los retardos de tiempo desde cada decisión hasta cada una de sus consecuencias, y los retardos en la realimentación de la información de cada consecuencia hasta que influyen sobre la próxima decisión. Para lograr una mayor sencillez, las notaciones relativas a estos retardos de tiempo se omiten en los diagramas causales. Del mismo modo que los enlaces tienen dos direcciones posibles, los bucles de realimentación tienen también dos polaridades posibles, positiva o negativa. En la mitad de un bucle de realimentación se encuentra un símbolo que indica su polaridad, un signo positivo si el bucle actúa para reforzar los cambios de variables en la misma dirección que el cambio inicial, con lo que se contribuye al crecimiento o disminución sostenidos de las variables del bucle, y un signo menos si el bucle actúa para resistirse u oponerse a los cambios de variables, y de este modo produce una tendencia contraria al cambio inicial y contribuye a la fluctuación o al mantenimiento del equilibrio del bucle. Una manera sencilla de determinar la polaridad de un bucle de realimentación es contar el número de enlaces negativos: si es par, el bucle es positivo; si es impar, el bucle es negativo.

Para evitar ecuaciones simultáneas en el modelo matemático derivado del diagrama causal, dentro del procedimiento del desarrollo del modelo se requiere un tratamiento especial para un bucle de realimentación. Una técnica, empleada en dinámica de sistemas, consiste en introducir en todo bucle de realimentación dos tipos especiales de variables, niveles y tasas de cambio. Una variable de nivel indica el estado del sistema, y una variable de tasa de cambio produce cambios en las variables de nivel a lo largo del tiempo. En el contexto de los diagramas causales, la relación causal entre una variable de tasa de cambio, tal como el índice de producción (estufas/semana), y una variable de nivel, tal como el inventario (estufas), es un <<flujo físico>> que estará representado por una línea sólida. No obstante, la relación entre la variable de nivel (inventario) y la variable de tasa de cambio (índice de producción) constituye un <<flujo de información>>. Es la información relativa al estado del inventario la que influye en el índice de producción. El inventario no se transfiere físicamente al lugar de producción, es decir, a la fábrica. Pero la producción de la fábrica, medida en estufas por semana, se acumula como entidades físicas en inventario.



2.3 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA DE DESARROLLO DE MODELOS.

La metodología empleada en esta monografía utiliza todas las clases relevantes empleadas en la dinámica de sistemas: variables de nivel, variables de tasa de cambio, variables auxiliares, constantes retrasos y búsqueda en tablas.

El signo sobre una flecha continua nos indica si la tasa de cambio se añade o se sustrae del nivel de una variable de estado. Mientras que las flechas continuas indican flujos físicos, las flechas discontinuas en el diagrama causal definen flujos de información desde las variables de nivel hasta las tasas de cambio o variables de acción. Se llama variable auxiliar a cualquier variable intermedia en el camino desde una variable de nivel, o de una entrada exógena, hasta una variable de tasa de cambio. Los signos sobre las flechas discontinuas tienen la interpretación siguiente: un signo (+) significa que un aumento en el parámetro en el origen de la flecha causará un aumento en la variable de la punta de la flecha; un signo – significa que un aumento en el parámetro en el origen de la flecha causará una disminución en el parámetro de la punta de la flecha. Las entradas exógenas en un diagrama causal se identifican fácilmente porque no tienen flechas que terminen en las mismas, pero tienen una o más flechas cortadas que salen de ellas. En contraste, las variables auxiliares no forman parte del mismo sistema, sino que indican solamente su rendimiento y, por consiguiente, se identifican siempre porque están al final de una flecha discontinua, y no tienen flechas que emanen de ellas. Resumamos la convención de los diagramas causales: (1) las flechas describen la dirección de la causalidad entre pares de variables; (2) las líneas (continuas o discontinuas) denotan flujos (físicos o de información); y (3) los signos nos indican la naturaleza de la relación (directa o inversa) entre un par de variables dependientes-independientes.

La metodología utiliza el lenguaje de ordenador STELLA asociado con la dinámica de sistemas. En terminología de las ecuaciones de diferencias, cualquier variable de nivel L_i se expresa como función de las variables de tasa de cambio R_i y el valor previo del nivel:

$$L_i(t + dt) = L_i(t) + (dt) \sum_{i=1}^n R_i(t) \quad (Ec. 2.1)$$

en donde las R_i s se suponen constantes en el intervalo desde t a $t+dt$. Las variables de tasa de cambio tienen la forma:

$$R_i(t) = F[L_i(t), E_h(t), A_{ij}(t), A_{kj}(t)] \quad (Ec. 2.2)$$

en donde E_k son los impactos de las variables auxiliares en los flujos causales desde la variable i y la entrada exógena k , respectivamente.



Puesto que las entradas exógenas son funciones conocidas del tiempo, o constantes, si se conocen los valores iniciales de las variables de nivel, todas las otras variables pueden calcularse a partir de ellas y para dicho intervalo de tiempo. Entonces, a partir de la ecuación Ec. 3.1 se pueden encontrar los nuevos valores de las variables de nivel para el próximo instante de tiempo.

En vez de subíndices, S utiliza una notación especial en la que .K significa el tiempo actual, .J indica el tiempo pasado $t-dt$, y L significa el instante futuro de tiempo $t+dt$; dt se llama al intervalo de la solución, el tiempo transcurrido entre dos cálculos sucesivos de la simulación. Puesto que se supone que las variables de tasas de cambio son constantes en el intervalo dt , se usa la notación .jk para tasas de cambio a la derecha de una ecuación y .kl para tasas de cambio a la izquierda.



2.4 UN LENGUAJE ELEMENTAL PARA LA DESCRIPCIÓN DE SISTEMAS. DIAGRAMAS DE FORRESTER

La descripción mínima de un sistema viene dada por la especificación de las distintas partes que lo forman, mediante el conjunto **C** de su composición, y por la relación **R** que establece cómo se produce la influencia entre esas partes. Veamos mediante un sencillo ejemplo cómo podemos analizar la estructura sistémica de un proceso. Supongamos el hecho elemental de llenar un vaso de agua. En la Figura 2 se muestra una ilustración gráfica de ese proceso. Su descripción, en lenguaje ordinario, es muy simple: el que llena el vaso de agua, mediante la observación del nivel alcanzado en el vaso, actúa sobre el grifo, de modo que lo va cerrando según se alcanza el nivel que estima oportuno. El proceso que tiene lugar lo describiríamos como sigue: el agente (el que llena el vaso) compara el nivel alcanzado en el vaso con el nivel deseado, si existe discrepancia actúa sobre el grifo, con lo que se influye sobre el nivel alcanzado, que es de nuevo comparado (en realidad se trata de un proceso continuo) con el nivel deseado; según disminuya la discrepancia, se irá cerrando el grifo, hasta que al anularse esta, se cierre definitivamente.

El proceso así descrito se puede representar de forma más sintética mediante un diagrama como el que se superpone en la Figura 3a. En este diagrama se indican los hitos más importantes que intervienen en el proceso, de acuerdo con la descripción anterior, y que son el nivel alcanzado en el vaso, la discrepancia entre ese nivel y el deseado, y el flujo de agua que modifica aquel nivel. Estos elementos básicos del proceso están unidos entre sí mediante flechas que indican las influencias que se establecen entre ellos. Por ejemplo, el nivel alcanzado depende del flujo de agua o, lo que es lo mismo, el flujo de agua influye sobre el nivel alcanzado, lo que se indica, en el diagrama, mediante una flecha que va desde «flujo de agua» a «nivel» alcanzado.

Esta relación de influencia se escribe:

Flujo de agua de nivel

De forma análoga, la «discrepancia» se determina a partir del «nivel deseado» y del «nivel» alcanzado (en realidad es la diferencia entre ambas). Por último, la «discrepancia» determina el «flujo de agua». Articulando todas las relaciones de influencia se tiene el diagrama de la Figura 3a.

En esta figura se observa que las flechas que unen la discrepancia con el flujo de agua, éste con el nivel alcanzado, para acabar de nuevo en la discrepancia, forman una cadena circular o cerrada de influencias.

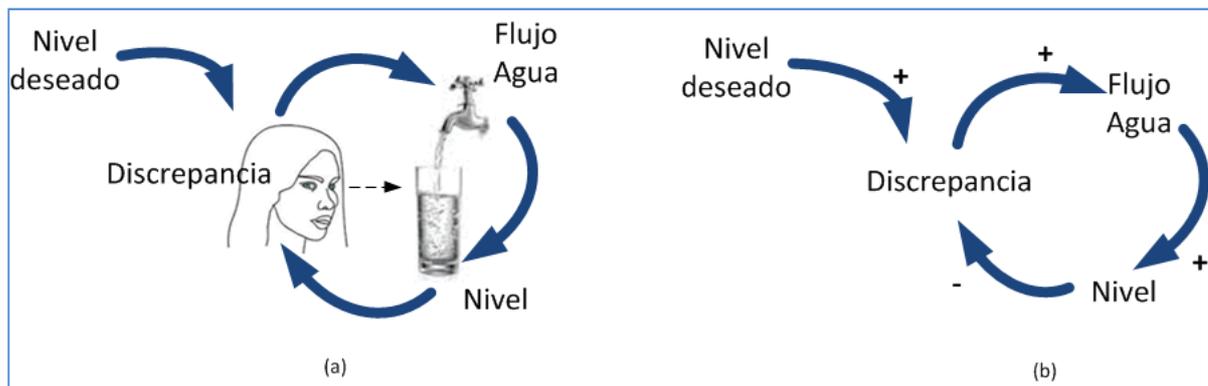


Figura 2.1 - Diagrama básico de llenar un vaso de agua:
(a) con un grafo orientado; (b) con un grafo signado.

Es lo que se conoce como un bucle de realimentación, que es un elemento básico en la estructura del sistema y que trataremos con detalle en la Sección siguiente.

Este ejemplo constituye una muestra de cómo se puede analizar un sistema, descomponerlo en sus elementos esenciales, y relacionar estos elementos mediante un bosquejo de cómo se producen las influencias entre ellos. De este modo se tiene la descripción más elemental que podemos tener de ese sistema, que se limita a establecer qué partes lo forman y cuáles de ellas se influyen entre sí. La influencia, en esta descripción, se mantiene a un nivel cualitativo, en el sentido de que únicamente se dice si se produce o no influencia, pero no la forma o magnitud que tenga. En general, si **A** y **B** son dos partes de un sistema, el hecho de que **A** influya sobre **B** se representa mediante un flecha de la forma **A** **B** e indica que **B** es una función de **A**, es decir $B = f(A)$, aunque no conozcamos la forma matemática exacta de la función.

El conjunto de las relaciones entre los elementos de un sistema recibe la denominación de estructura del sistema y se representa mediante el diagrama de influencias o causal. Emplearemos preferentemente la denominación diagrama de influencias para lo que en literatura clásica de dinámica de sistemas se conoce también como diagrama causal. Esta última denominación tiene connotaciones más fuertes y se considera menos apropiada. El diagrama de influencias de la Figura 3^a constituye un ejemplo de la estructura de un sistema. La estructura juega un papel esencial en la determinación de las propiedades sistémicas.

En su forma más simple el diagrama de influencias está formado por lo que se conoce como un grafo orientado. A las flechas que representan las aristas se puede asociar un signo. Este signo indica si las variaciones del antecedente y del consecuente son, o no, del mismo signo. Supongamos que entre **A** y **B** existe una relación de influencia positiva

$$A + B$$

Ello quiere decir que si **A** se incrementa, lo mismo sucederá con **B**; y, por el contrario, si **A** disminuye, así mismo lo hará **B**. Por otra parte, si la influencia fuese



negativa a un incremento de **A** seguiría una disminución de **B**, y viceversa. De este modo, asociando un signo a las relaciones de influencia, se tiene un diagrama que suministra una información más rica sobre la estructura del sistema, aunque continúe conservando su carácter cualitativo. El grafo correspondiente se dice que está signado. En la Figura 2.1 se muestra el diagrama del proceso de llenar un vaso, con un grafo de este tipo.

2.5 BUCLE DE REALIMENTACIÓN NEGATIVA

El proceso considerado en la Figura 2, al que se ha asociado el diagrama de influencias de la Figura 3, es un caso particular de la situación general que se considera en la Figura 4. En esta figura se tiene que el estado alcanzado por una cierta magnitud (el nivel de agua en el ejemplo anterior) viene determinado por una acción (el flujo de agua) que a su vez es consecuencia de la discrepancia entre el estado alcanzado por esa magnitud y el valor que se pretende que tenga, que en la Figura 4 se denomina objetivo. Es decir, la discrepancia entre el estado y objetivo determina la acción que modifica el estado en el sentido de que alcance el objetivo deseado (que la discrepancia se anule).

El diagrama de la Figura 4 recibe la denominación de bucle de realimentación negativa, y representa un tipo de situación muy frecuente en el que se trata de decidir acciones para modificar el comportamiento con el fin de alcanzar un determinado objetivo. Un diagrama de esta naturaleza se puede aplicar tanto al sencillo acto de coger un lápiz, detectando mediante la vista la discrepancia entre las posiciones de la mano y del lápiz; al proceso de regulación de la temperatura en una habitación, en el que la discrepancia entre la temperatura deseada y la considerada confortable determina la actuación de un calefactor (si estamos en invierno) para corregir esa discrepancia (ver Figura 5); y tantos otros procesos de naturaleza semejante. El diagrama de un bucle de realimentación negativa aporta el esquema básico de todo comportamiento orientado a un objetivo. Su ubicuidad fue puesta de manifiesto por Norbert Wiener cuando, en el decenio de los años 40, sentó las bases de la cibernética.

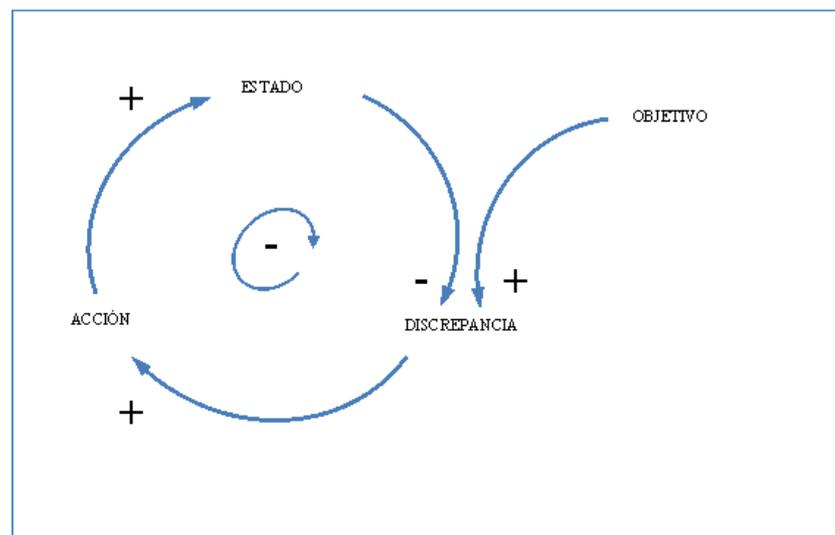


Figura 2.2. - Diagrama básico de un bucle de realimentación negativa

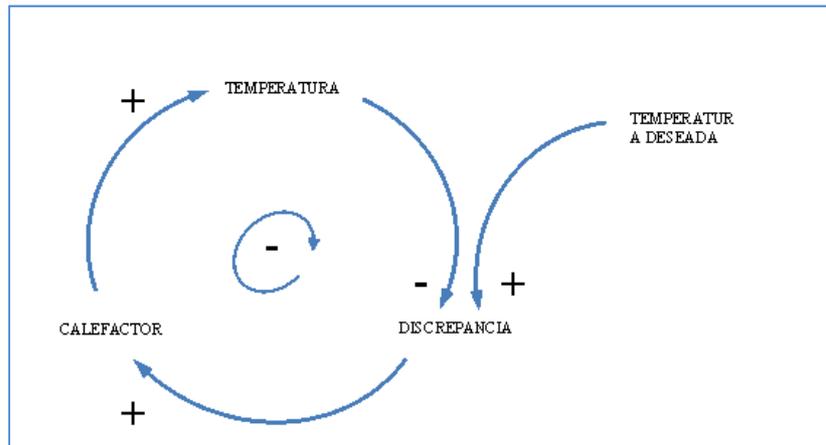


Figura 2.3. - Estructura de realimentación negativa del proceso de regulación de temperatura

Un bucle de realimentación negativa tiene la notable propiedad de que si, por una acción exterior, se perturba alguno de sus elementos, el sistema, en virtud de su estructura, reacciona tendiendo a anular esa perturbación. En efecto, consideremos el bucle de la Figura 6a, en el que los elementos se han representado, de forma general, mediante las letras **A**, **B** y **C**. Supongamos que uno cualquiera de ellos, por ejemplo el **B**, se incrementa. En virtud de las relaciones de influencia, el incremento de **B** determinará el de **C**, ya que la relación de influencia correspondiente es positiva. A su vez, el incremento de **C** determinará el decrecimiento de **A**, ya que así lo determina el carácter negativo de la influencia. El decrecimiento de **A** dará lugar al de **B**, pues la relación es positiva. Por tanto, el incremento inicial de **B** le «vuelve», a lo largo de la cadena de realimentación, como un decremento; es decir, la propia estructura de realimentación tiende a anular la perturbación inicial, que era un incremento, generando un decremento. De este modo se comprende que los bucles de realimentación negativa son bucles estabilizadores, que tienden a anular las perturbaciones exteriores. Por ello, los ingenieros que diseñan sistemas de regulación automática los incorporan en sus proyectos como elementos básicos para conseguir la acción reguladora (lo que logran mediante la adición de bucles de realimentación negativa a los procesos que diseñan). El efecto de un bucle de realimentación negativa es, por tanto, el tratar de conseguir que las cosas continúen como están, que no varíen. Son bucles que estabilizan los sistemas.

Es conveniente observar que en un bucle de realimentación negativa lo que se realimenta es información. El agente necesita información sobre los resultados de sus decisiones para adaptarlas a los resultados que esas acciones van produciendo. Más adelante, en la Sección 3.3, volveremos sobre este punto.

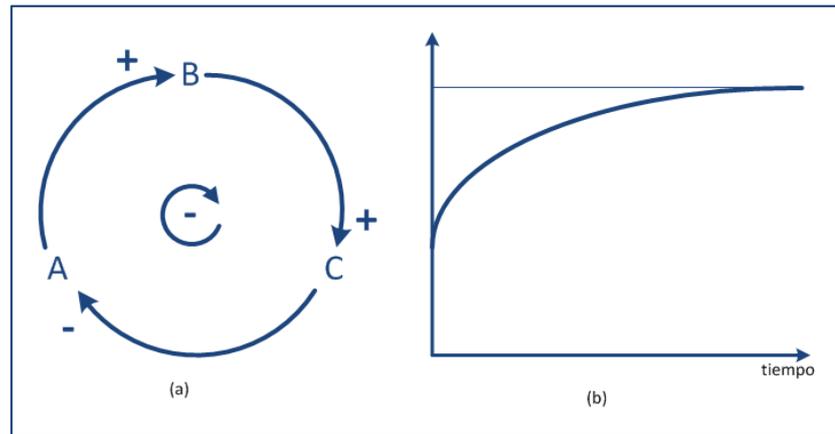


Figura 2.4. - Estructura de realimentación negativa en (a)
y comportamiento correspondiente en (b)

2.6 BUCLE REALIMENTACIÓN POSITIVA

La otra forma que puede adoptar un bucle de realimentación es la que se muestra en la Figura 7, en la que se tiene un bucle de realimentación positiva. Se trata de un bucle en el que todas las influencias son positivas (o si las hubiese negativas, tendrían que compensarse por pares). En general la Figura 7 representa un proceso en el que un estado determina una acción, que a su vez refuerza este estado, y así indefinidamente. En este caso el estado es una población, y la acción su crecimiento neto. En tal caso, cuanto mayor sea la población, mayor es su crecimiento, por lo que a su vez mayor es la población, y así sucesivamente. Se tiene, por tanto, un crecimiento explosivo de la población.

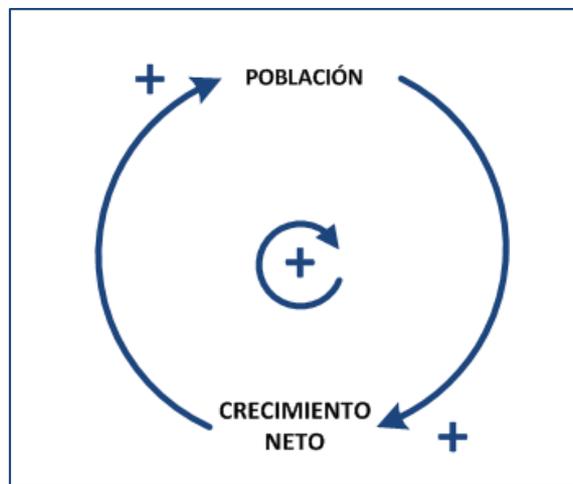


Figura 2.5. – El crecimiento de una población como proceso de realimentación positiva

En la Figura 8a se representa de forma esquemática, mediante las letras **A**, **B** y **C**, un bucle de esta naturaleza. Con ayuda de este diagrama se puede analizar, de forma general, el comportamiento que genera este bucle. Si cualquiera de sus elementos sufre una perturbación, ésta se propaga, reforzándose, a lo largo del bucle. En efecto, si **A** crece, entonces, en virtud del signo de la influencia, lo hará **B**, lo que a su vez determinará el crecimiento de **C** y, de nuevo, el de **A**. Por lo tanto, la propia estructura del sistema determina que el crecimiento inicial de **A** «vuelva» reforzado a **A**, iniciándose de este modo un proceso sin fin que determinará el crecimiento de **A** (Figura 8b). Este efecto se conoce popularmente como “círculo vicioso”, “efecto bola de nieve” o “pescadilla que se muerde la cola”. El cambio se amplifica produciendo más cambio.

Se trata, por tanto, de una realimentación que amplifica las perturbaciones y que, por tanto, inestabiliza al sistema. En este sentido se puede decir que su efecto es contrario al de la realimentación negativa. Si aquella estabilizaba, esta desestabiliza.

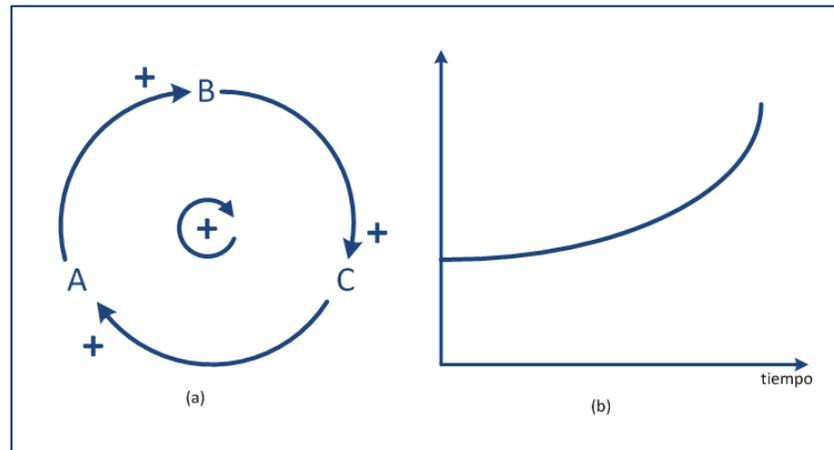


Figura 2.6. - Estructura de realimentación positiva en (a)
y comportamiento correspondiente en (b)

Antes de terminar con esta presentación elemental de los bucles de realimentación positiva y negativa debe quedar bien claro que el comportamiento asociado a estos bucles, sea el comportamiento autorregulador del bucle de realimentación negativa o el comportamiento explosivo del positivo, son modos de comportamiento que cabe imputar a la estructura del sistema, y no a las partes que lo forman. Recuérdense las Figuras 6 y 8 que nos han suministrado el esquema básico de estos bucles de realimentación. Con estas Figuras hemos podido entender el comportamiento correspondiente, prescindiendo de los elementos concretos que representasen **A**, **B** y **C**. En este sentido decimos que los bucles de realimentación son elementos básicos para la generación endógena (desde dentro del propio sistema) del comportamiento.

2.7 RETRASOS

Hemos visto como la información sobre las relaciones de influencia podía enriquecerse con la adición de un signo. En algunos casos interesa, además, distinguir entre influencias que se producen de forma más o menos instantánea e influencias que tardan un cierto tiempo en manifestarse. En este último caso, se tienen influencias a las que se asocian retrasos. En el diagrama de influencias, si **A** influye sobre **B**, y esta influencia tarda un cierto tiempo en manifestarse, entonces se añaden dos trazos sobre la flecha correspondiente. En la Figura 9a se muestra un bucle de realimentación negativa en el que la influencia entre **C** y **A** se produce con un retraso, por lo que la flecha correspondiente presenta dos trazos.

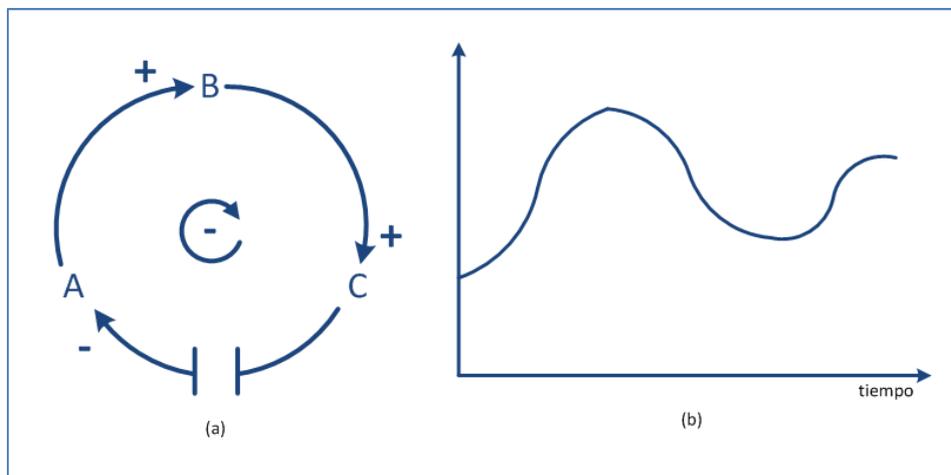


Figura 2.7.- Bucle de realimentación negativa con retraso en (a) y comportamiento correspondiente en (b)

Los retrasos pueden tener una enorme influencia en el comportamiento de un sistema. En los bucles de realimentación positiva determinan que el crecimiento no se produzca de forma tan rápida como cabría esperar. En los de realimentación negativa su efecto es más patente. Su presencia puede determinar que ante la lentitud de los resultados se tomen decisiones drásticas que conduzcan a una oscilación del sistema. Así en la Figura 9b se muestra el posible comportamiento del sistema de la Figura 9a, en el que se produce una oscilación en torno a la meta perseguida. Precisamente, el análisis de estas oscilaciones en una empresa con retrasos en la transmisión de información se encuentra en los orígenes de la dinámica de sistemas.



2.8 SISTEMAS GENÉRICOS Y ESTRUCTURAS COMPLEJAS

Los bucles de realimentación positiva y negativa constituyen los ejemplos más simples de estructura de un sistema capaces de generar comportamiento de forma autónoma. Sin embargo, los sistemas con los que habitualmente nos encontramos no es frecuente que admitan una descripción en la que aparezca exclusivamente una de esas estructuras. Por el contrario, lo habitual es que nos encontremos con sistemas complejos en los que coexistan múltiples bucles de realimentación, tanto positivos como negativos. En tal caso el comportamiento resultante dependerá de cuáles de los bucles sean dominantes en cada momento.

El ejemplo más simple de un sistema con varios bucles de realimentación es el que se muestra en la Figura 10, en el que se tiene una estructura en la que coexisten un bucle de realimentación positiva con uno negativo. Existen muchos procesos en la realidad a los que es aplicable este diagrama. Se trata de procesos en los que inicialmente se produce un crecimiento; es decir, al principio el bucle de realimentación positiva es el dominante. Sin embargo, sabemos que todo proceso de crecimiento tarde o temprano debe cesar. No hay un crecimiento indefinido. Este efecto limitador del crecimiento se incorpora mediante un bucle de realimentación negativa, como el que se muestra a la derecha de la Figura 10. Cuando el estado ha alcanzado un considerable nivel de crecimiento, como consecuencia de que el bucle de realimentación positiva es dominante, se invierte la dominancia de los bucles, de modo que el nuevo bucle dominante es el negativo y se produce la limitación del crecimiento.

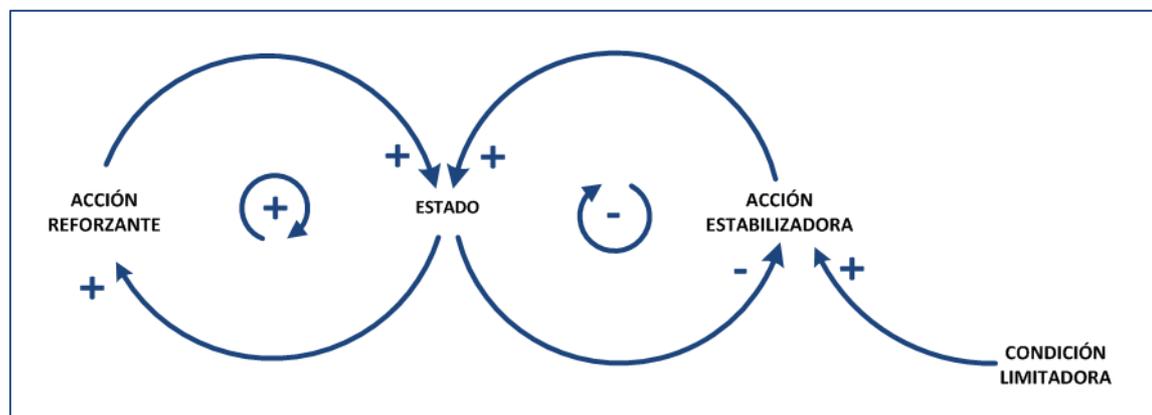


Figura 2.8. – Estructura formada por dos bucles de realimentación, uno positivo y uno negativo

Todo sucede como si se combinase el crecimiento asociado a un bucle de realimentación positiva (recuérdese la Figura 8b), en la fase inicial del proceso, con el comportamiento asintótico correspondiente a un bucle de realimentación negativa (Figura 6b), en la fase terminal. En la Figura 11 se muestra la combinación de estos dos modos de comportamiento, que da lugar a la conocida curva de crecimiento logístico o sigmoideal.



El número de procesos a los que se puede aplicar esta estructura de dos bucles es muy amplio y comprende desde la introducción de un nuevo producto en un mercado (con una fase inicial de implantación y gran crecimiento, y una fase final de saturación) hasta la introducción de una nueva población en un hábitat en el que inicialmente estaba ausente. La estructura de la Figura 10 permite dar una interpretación estructural del comportamiento que aparece en la Figura 11. De este modo vamos viendo cómo es posible asociar estructura y comportamiento, que ya hemos dicho que es el objetivo fundamental de la dinámica de sistemas. Sin embargo, por el momento, lo estamos haciendo de forma eminentemente cualitativa.

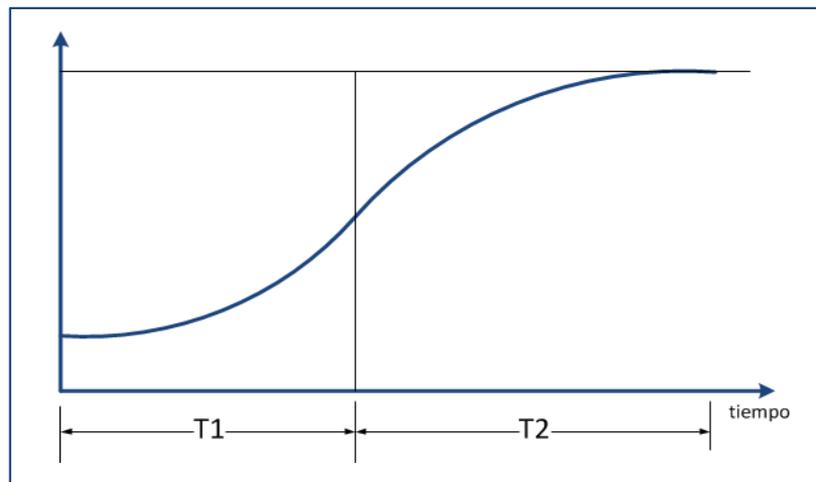


Figura 2.9. – Comportamiento sigmoideal de un proceso con dos bucles de realimentación, uno positivo y otro negativo

La estructura que se ha representado en la Figura 10 constituye un ejemplo de lo que se conoce como arquetipos sistémicos o estructuras genéricas. Se trata de situaciones típicas que aparecen en problemas muy variados, pero que admiten la misma descripción básica desde un punto de vista sistémico. Aquí hemos presentado una de las más sencillas, pero en la literatura se encuentra un gran número de ellas.

2.9 DIAGRAMAS DE FORRESTER EN STELLA

2.9.1 Elementos característicos simples

Los elementos característicos sencillos son: Constantes, Variables, búsquedas en tablas, flujos de entradas o de salida y niveles. Analicemos un sistema sencillo de evolución de la población.

2.9.1.1 Niveles, stocks

Los stocks representan acumulaciones en el sistema que está siendo modelado. Pueden representar acumulaciones físicas como un inventario o un depósito, y también pueden representar acumulaciones intangibles como la cognición, los cambios en la conducta. Los niveles son las variables de estado del sistema.

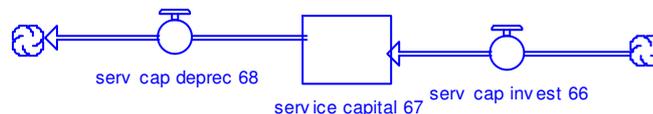


Figura 2.10.- El nivel `services_capital_67` representa el total de infraestructuras destinadas a servicios de una población

El Nivel debe tener definido un valor inicial que puede ser un número o puede venir definido por otra variable exterior ya sea auxiliar o constante. El programa Stella simula los niveles añadiéndole el valor de las entradas y sustrayéndole el valor de las salidas para cada tiempo, por lo tanto el valor del Nivel en cada instante será el valor del Nivel en el instante anterior más las entradas y menos las salidas en el instante actual. Según la figura 12, el valor en cada momento de `services_capital_67` será:

$$\text{service_capital_67}(t) = \text{service_capital_67}(t - dt) + (\text{serv_cap_invest_66} - \text{serv_cap_deprec_68}) * dt$$

$$\text{INIT service_capital_67} = 1.44\text{E}11$$

En Stella, haciendo doble-click sobre el icono del nivel, nos aparece el cuadro de diálogo de los niveles y una vez allí, introducimos el valor inicial del nivel.

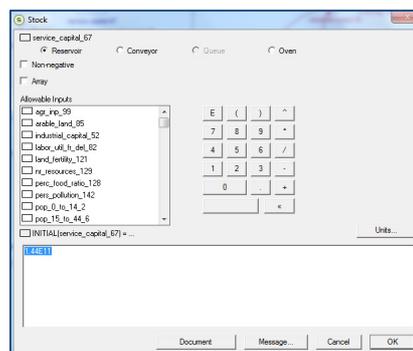


Figura 2.11.- Cuadro de diálogo de Stella para introducir el valor inicial de un nivel



2.9.1.2 Flujos, flows.

Los flujos en Stella representan el transporte de cantidades hacia un nivel, desde un nivel o entre niveles. Mientras los niveles representan los “estados” del sistema que se está modelando, los flujos son las “acciones”. los flujos son las únicas variables que pueden cambiar el estado de los niveles, añadiéndole una cantidad o restándosela según corresponda.

El control de la magnitud de flujo se lleva a cabo por una “ratio”, una variable que está unida a la válvula del flujo y la controla. Normalmente la ratio va a ser una variable auxiliar.

Stella nos va a dar la posibilidad de poder usar un flujo con ratio o un flujo sin ratio ya que tienen distinto icono para su inserción al modelo. Un flujo con ratio es lo mismo que un flujo sin ratio al que le unimos una variable auxiliar por medio de una unión de información.

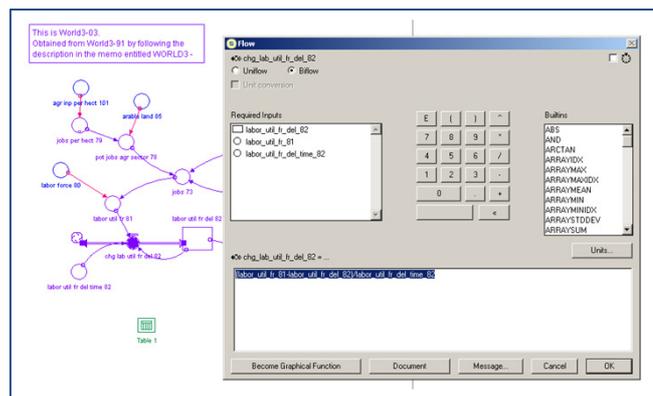


Figura 2.12.- Cuadro de diálogo de Stella para introducir ecuaciones en una variable de flujo

2.9.1.3 Converters, Functions,

Los convertidores o funciones operan valores de entrada y dan una salida. Estos valores de entrada pueden ser constantes, u otras funciones Para elaborar la salida se puede valor de una operación algebraica entre las entradas, consultar una tabla mediante interpolaciones o extrapolaciones lineales o ambas cosas a la vez.

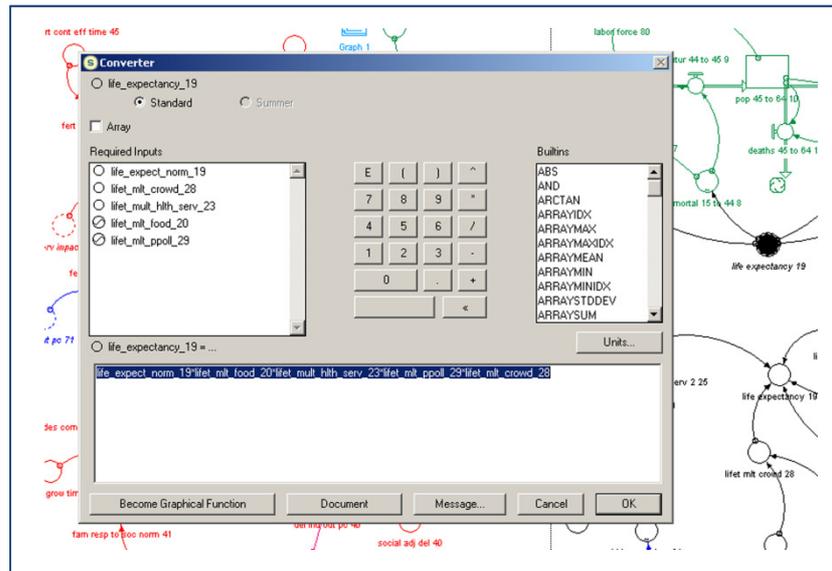


Figura 2.13.- Cuadro de diálogo de Stella para componer funciones

2.9.2 Elementos característicos complejos

Búsqueda en tablas, Bloques condicionales, Retrasos, Subsistemas

2.9.2.1 Búsqueda en tablas

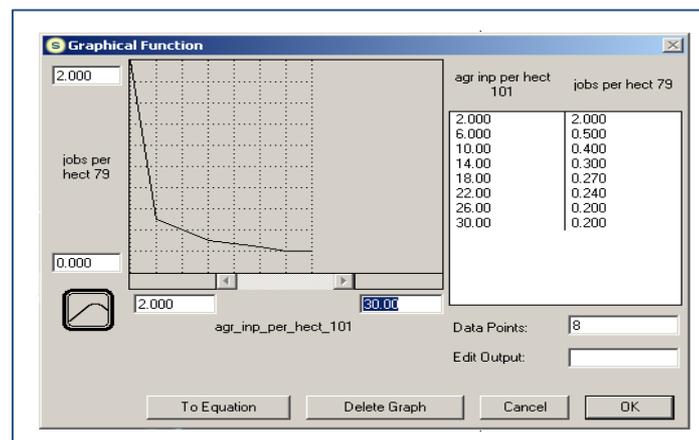


Figura 2.14.- Cuadro de diálogo de Stella para componer una función discontinua

2.9.2.2 Smooth1

Función de retraso de primer orden. Su sintaxis es: SMTH1(<input>,<averaging time>[,<initial>]). La función SMTH1 es equivalente a la estructura y ecuaciones mostradas en la figura inferior.

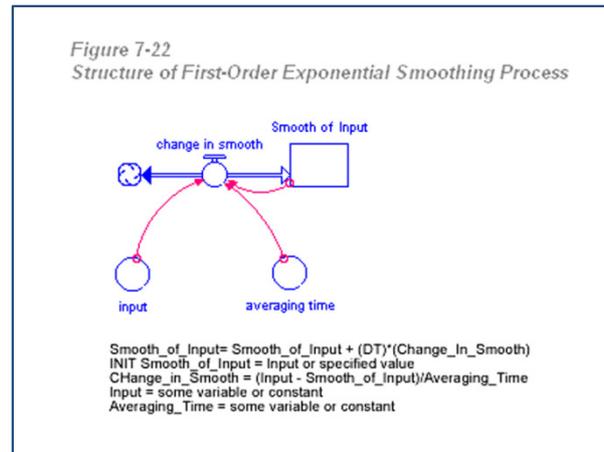


Figura 2.15.- Estructura de un Smooth1 en Stella

2.9.2.3 Smooth3

Función de retraso de tercer orden

SMTH3(<input>,<averaging time>[,<initial>])

El smooth3 lo que hace es suavizar una transición entre 2 valores en un tiempo determinado

The SMTH3 function will return the value of Stock 3 in the structure and equations shown in Figure 7-24.

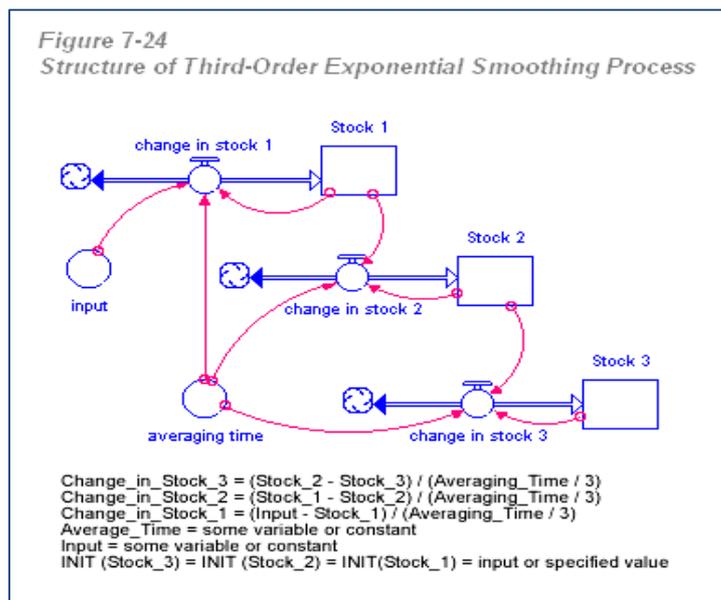


Figura 2.16.- Estructura de un Smooth3 en Stella

2.9.2.4 Bloques condicionales

Veamos cómo se organiza un bloque condicional siguiendo uno de los muchos ejemplos de este tipo de bloques que hay en el World3. En la figura 2.17 vemos una estructura condicional en el subsistema servicios. Se trata de cómo se degrada el capital servicios. Con esta estructura le podemos decir al modelo que hasta cierto año el capital en servicios se degradaba a un tanto por ciento anual y a partir de cierto año ese porcentaje se cambia por otro.

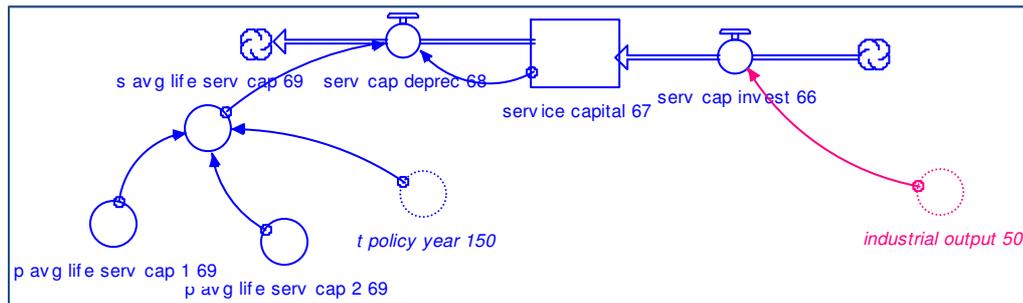


Figura 2.17.- Estructura de un bloque condicional en Stella. s_avg_life_serv_capital_69

En la figura 2.18 vemos cómo escribir la expresión adecuada para que el sistema actúe como esperamos. La expresión que hemos de introducir es la siguiente:

```
if (time > t_policy_year_150) then
p_avg_life_serv_cap_2_69
else
p_avg_life_serv_cap_1_69
```

Figura 2.18.- Estructura del bloque condicional en Stella. s_avg_life_serv_capital_69



2.9.2.5 Subsistemas

Los subsistemas son usados cuando nuestro modelo se hace complicado, ya que aumenta de tamaño y complejidad. El agrupamiento es útil por una serie de razones:

- Ayuda a reducir el número de bloques visualizados.
- Permite mantener juntos los bloques que están funcionalmente relacionados.

Una característica importante de los subsistemas es que recogen y ceden datos a otros subsistemas

Vamos a explicarlo con un ejemplo. Vamos a seleccionar el subsistema de la fertilidad de la tierra. Este subsistema depende del subsistema polución que afectará negativamente al valor de la fertilidad de la tierra y del subsistema producción de alimentos que recoge también las políticas tendentes a mejorar la fertilidad de la tierra o a limitar los impactos de la contaminación.

A su vez los valores cambiantes de las estructuras del subsistema pueden ser utilizados por otros subsistemas.

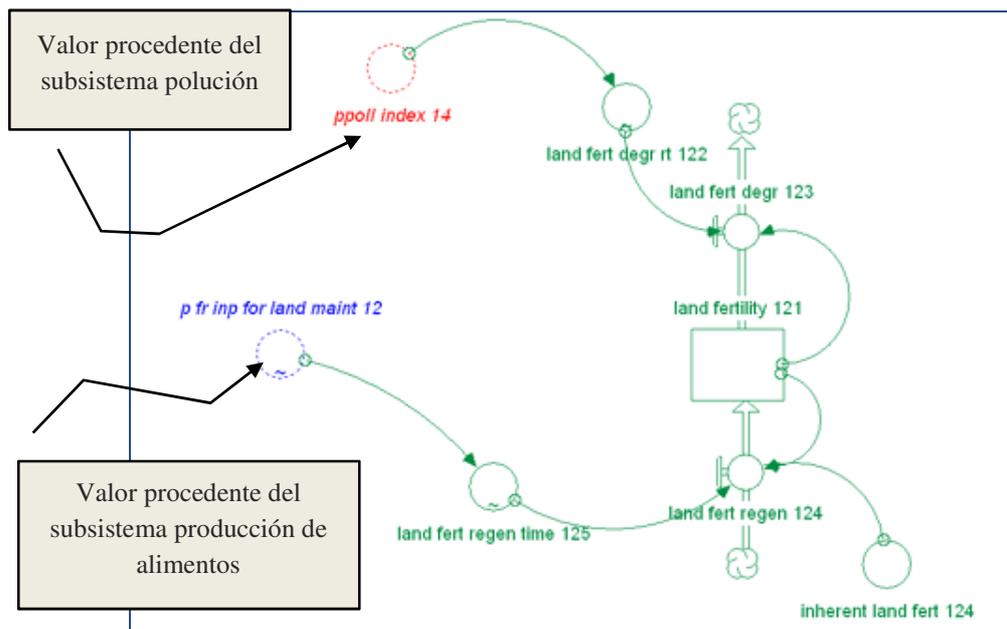


Figura 2.19.- Representación de un subsistema sencillo. En este caso el de la fertilidad de la tierra, que recoge datos de otros dos subsistemas.



3. EL WORLD3



ANÁLISIS AUTOMÁTICO DE MODELOS COMPLEJOS
UTILIZANDO HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA
ARTIFICIAL PARTIENDO DEL EJEMPLO DEL WORLD3





3.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El modelo World3 es una simulación por ordenador de las interacciones entre la población, el crecimiento industrial, la producción de alimentos y los límites de los ecosistemas de la Tierra. Fue encargado originalmente por el Club de Roma al MIT (Massachusetts Institute of Technology) quien produjo el citado modelo y el libro “Los límites del crecimiento” Los principales creadores del modelo fueron Donella Meadows, Dennis Meadows y Randers Jorgen. (Donella Meadows, 1972)

El modelo ha sido documentado en el libro “Dinámica de crecimiento en un mundo finito” (Dennis L. Meadows, 1974). Se añade nuevas características al modelo World2 Jay W. Forrester. (Forrester, 1971). Desde que el World 3 fue creado originalmente ha tenido ajustes menores para llegar al modelo de World3/91 utilizado en el libro Más allá de los límites, más tarde mejorado para obtener el modelo de World 3/2003 distribuido por el Instituto para la Política e Investigación de Ciencias Sociales y, finalmente, el World3 / modelo 2003 usado en el libro Límites al crecimiento: la actualización de 30 años.

A finales de los años 60 del siglo pasado la ONU encargó al Club de Roma un estudio sobre las posibilidades de un crecimiento ilimitado y exponencial que tiende hacia infinito en un entorno de recursos finitos como la Tierra. El estudio fue pilotado por los hermanos Dennis y Donella Meadows y Jorgen Randers todos ellos doctorados en el MIT.

El World3 es el modelo matemático basado en dinámica de sistemas con el que se basa el trabajo encargado por al Club de Roma en 1970. Este estudio pretendía estimar los límites del crecimiento económico en un entorno finito. Con el estudio se publicó un libro en 1970 titulado “Los límites del crecimiento”. En su día fue un bestseller del que se vendieron 9 millones de copias en 29 idiomas. Las conclusiones fueron demoledoras, pero tan pronto se superaron los efectos coyunturales de la crisis del petróleo de 1973, los países más industrializados volvieron a comportarse como ciudades alegres y confiadas que continuaron con la economía del derroche y la cultura consumista, teniendo como objetivo el máximo crecimiento anual del producto interior bruto, como si no existieran límites al crecimiento económico ni al proceso de acumulación de riquezas por unos pocos países industrializados, mientras se agiganta la brecha entre los países pobres y ricos.

20 años más tarde, en 1991 se hizo una revisión del modelo (Dennis Meadows, Meadows, & Randers, 1992), que no afectó en lo fundamental a las conclusiones del mismo, salvo en que quizás fue demasiado optimista. En el momento en que fue publicada la primera versión, no faltaron voces que se negaron a admitir las consecuencias, pero las evidencias científicas han ido poniendo de manifiesto que estaba en lo cierto. Un crecimiento exponencial demanda materias primas también a un ritmo exponencial y también emite contaminantes a un ritmo exponencial. La capacidad de la tierra para asumir contaminantes y para suministrar determinados recursos es limitada. En concreto son limitados los recursos energéticos fósiles y el uranio, la tierra cultivable y por tanto la producción de alimentos, la capacidad de la tierra para asimilar el CO₂ procedente de la quema de combustibles fósiles hace tiempo que fue superada, la disponibilidad de agua dulce también tiene unas limitaciones anuales, la masa boscosa



tiene una capacidad de producir madera que también ha sido superada, siendo así que ésta no para de descender año tras año, ya que año tras año se demanda más madera y se necesita más tierra cultivable para dar de comer a más personas, animales y coches. Las conclusiones del estudio serían las siguientes:

- El empleo de los recursos y la generación de contaminantes han rebasado las tasas sostenibles.
- Si no hay reducciones considerables en los flujos de energía y de material, el mundo está abocado a un declive rápido y fuera de control.
- Para evitar este declive, será necesario reducir el crecimiento del consumo material.
- Es técnica y económicamente realizable lograr una sociedad sostenible.
- El paso a una sociedad sostenible ha de obtenerse mediante el equilibrio entre nuestros objetivos a corto y largo plazo, poniendo especial énfasis en la calidad de vida.

El W3 es un modelo matemático complejo, pero su estructura básica no es difícil de entender. Está dividido en 15 subsistemas interconectados que se describirán de forma pormenorizada en esta obra. Tiene la intención de representar los flujos físicos derivados de la actividad humana interactuando dinámicamente con la Tierra. En tanto que sistema dinámico evoluciona con el tiempo. El W3 comienza representando el mundo físico en el año 1900 y tiene la pretensión de pronosticar el tamaño de estos flujos hasta el 2100. Es asimismo una aplicación abierta a cambios en las políticas en el empleo de los recursos no renovables, distribución de los recursos de la producción industrial, tamaño de familia deseado, mejoras en la tecnología de reducción de impactos derivados de la contaminación, periodos de amortización de la producción industrial, en general se pueden cambiar casi todos los parámetros y volver a correr la simulación para ver cuáles son las tendencias una vez variados esos parámetros.

Evidentemente es una simplificación de la realidad. El W3 sólo valora los flujos físicos: Recursos no renovables, Producción Industrial, Producción de Servicios (asistenciales), Producción de Alimentos, Generación de Contaminación y Población. También tiene en cuenta la generación de empleos, la huella ecológica, la fertilidad de la Tierra (cultivable), el nivel de bienestar o la diversidad y cantidad de bienes de uso y consumo derivados de la actividad industrial. Como soporte al subsistema población cuenta con otros dos subsistemas que estiman la esperanza de vida, y el tamaño de familia deseado. Los flujos producen acumulaciones, crecimientos o decrecimientos que se representan en dinámica de sistemas como niveles. Por ejemplo, la población del planeta en un momento dado es un nivel que aumenta con los nacimientos (flujo positivo) y disminuye con las defunciones (flujo negativo), la producción industrial es un flujo que depende del capital industrial, de la mano de obra disponible, de la intensidad energética. El capital industrial (fábricas, máquinas...) es un nivel que aumenta con la fracción de la producción industrial destinada a la reinversión y disminuye con la depreciación física de los medios de producción.

No tiene en cuenta este modelo diferentes áreas geográficas, desastres naturales, epidemias, el gasto de la administración ni los recursos consumidos por la corrupción



política, el gasto militar o las guerras ni conflictos regionales. En realidad todas no hacen más que empeorar las previsiones iniciales, y son posibles de reestimar sus consecuencias modificando en un momento dado de la simulación determinados niveles como población, capital industrial, capital servicios, aumentos repentinos de la contaminación provocando reducciones o aumentos bruscos de estos niveles.

Tampoco tiene un apartado para el mundo de las finanzas, no es un modelo econométrico. No contiene estos condicionantes en su interior, pero al igual que en las otras incidencias, se pueden acoplar subsistemas que modifiquen algunos comportamientos, sobre todo en lo que hace a la demanda de recursos no renovables.

En el campo de los indicadores de bienestar no evalúa los factores subjetivos productores de bienestar. Al estilo de la pirámide de Maslow, (Maslow, 1943) el W3 sólo valoraría los dos estamentos inferiores, es decir cobertura de necesidades materiales y ciertos aspectos relativos a la seguridad. Eso lo representaría en el bucle de producción de servicios.

En el W3 como vemos, se pueden modificar los supuestos iniciales y mostrar una gama de resultados posibles que van desde el colapso hasta al mundo sostenible. En el libro publicado en 1991 "*Más allá de los límites del crecimiento*" los autores presentan 13 escenarios modificando paulatinamente políticas globales que van desde el Business as usual que podrá provocar colapso entre el 2015 y el 2025 hasta modelos sostenibles, pasando por escenarios que retrasarían el colapso 10 ó 20 años. Se van modificando supuestos como las reservas probadas de combustibles fósiles, la inversión en renovables y eficiencia energética, la inversión en tecnologías que minimicen los impactos de la contaminación, la contención del crecimiento de la población, la contención de la producción industrial hasta igualarla a un nivel de producción industrial por persona deseado etc.

Los resultados obtenidos en el W3 en su versión 03 han sido comparados con datos reales recientemente en dos estudios de Graham Turner de la Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation y son citados repetidas veces en esta obra. (Turner, A comparison of the limits to growth with thirty years of reality, 2008) (Turner, Updated Comparison of The Limits to Growth with Historical Data, 2012)

En nuestro proyecto hacemos algo parecido, elegimos unos parámetros críticos a modificar y luego los modificamos aleatoriamente dentro de unos márgenes de confianza haciendo correr un gran número de simulaciones sucesivas e interpretando los resultados para ver correlaciones y análisis de sensibilidad de unos parámetros con otros para así poder valorar cuáles son los más sensibles a la hora de mejorar la sostenibilidad. Es decir, ¿mejora mucho la sostenibilidad un alargamiento de la vida útil del capital industrial? ¿Y un aumento de los descubrimientos de petróleo, gas natural o carbón? ¿En qué año deberían tomarse estas medidas? ¿Estamos aún a tiempo de cambiar?

Adelantamos algunas conclusiones para lograr la sostenibilidad:

- En general todas las medidas necesarias para evitar el colapso deberían haberse tomado mucho antes.
- Por lo demás, es necesario poner en marcha las siguientes medidas: transición rápida a energías renovables, grandes inversiones en la limitación



ANÁLISIS AUTOMÁTICO DE MODELOS COMPLEJOS
UTILIZANDO HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA
ARTIFICIAL PARTIENDO DEL EJEMPLO DEL WORLD3



de impactos derivados de la contaminación, limitación del crecimiento de la población, pero sobre todo, limitar el crecimiento de la producción industrial estableciendo un nivel óptimo por persona.



3.2 EL CAPITAL Y LA PRODUCCIÓN EN EL WORLD3

Volvemos a enfatizar en este punto que el W3 lo que trata son flujos de materia y energía, no flujos dinerarios. El capital industrial se entiende como conjunto de máquinas y edificios fabriles. La producción industrial son otras máquinas, electricidad, fertilizantes, hospitales, universidades y el consiguiente mantenimiento de estas instalaciones. Los destinos de la producción industrial son:

1. Bienes de consumo manufacturados que consume el total de la población.
2. Inversiones en capital para la obtención de recursos energéticos, es decir, maquinaria para la extracción de carbón, petróleo y gas natural.
3. Inversiones en capital para la obtención de maquinaria agrícola y fertilizantes.
4. Inversiones en capital destinado a la producción de servicios.
5. Una fracción de la producción industrial se vuelve a incorporar al capital industrial para hacer frente a su depreciación por envejecimiento y a aumentar la producción industrial

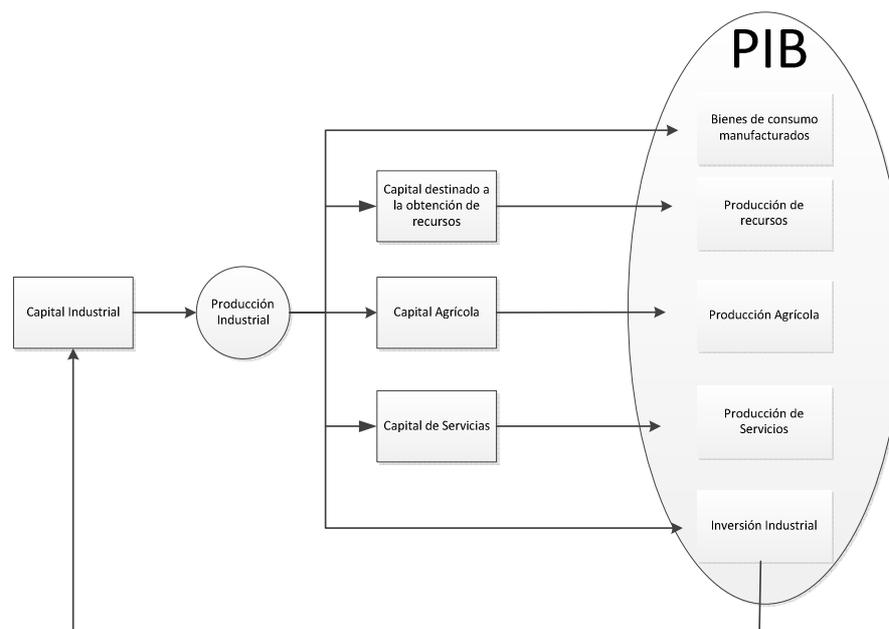


Figura 3.1.- Flujos de capital en el modelo económico World3 (Dennis Meadows, Meadows, & Randers, 1992, pág. 63)



3.3 LOS ESCENARIOS DEL WORLD 3

Según el libro Más allá de los límites del crecimiento (Dennis Meadows, Meadows, & Randers, 1992) los distintos experimentos se generan cambiando algunas cifras para probar distintas estimaciones del mundo real o para incorporar proyecciones más optimistas sobre el desarrollo de tecnologías, o para ver si el mundo elige nuevas políticas, éticas u objetivos.

Cuando se incorporan al modelo las nuevas cifras, se utiliza el World3 para calcular las interacciones entre sus 225 variables. El ordenador calcula un nuevo valor para cada variable cada seis meses en un tiempo simulado que va desde el año 1900 hasta el año 2100. De esta forma el modelo produce más de 90000 variantes de cada escenario. Los autores agruparon estas variables en 2 grupos, por un lado se agrupan en un gráfico denominado “Estado del mundo”. En él se muestran totales globales para: población, producción de alimentos, nivel relativo de contaminación (1970=1), fuentes no renovables restantes y producción industrial. El segundo gráfico se denomina “Nivel de vida material”, es indicativo del bienestar humano promedio. En él se muestran valores para: producción de alimentos por persona, expectativa media de vida, consumo de bienes por persona, producción de servicios por persona.

Pasamos a describir los 13 escenarios tal y como se describen en el libro Más allá de los límites del crecimiento.

Para conseguirlos, en cada escenario vamos a extraer los pasos a dar. Después sacaremos dos gráficas: Por un lado el estado del mundo contiene 5 salidas graficadas con respecto al tiempo que son:

- Recursos no renovables restantes.
- Producción Industrial.
- Contaminación persistente.
- Producción de alimentos.
- Contaminación.

Por otro lado, sacaremos la gráfica nivel de vida material, con otras 4 gráficas.

- Esperanza de vida.
- Bienes de consumo por persona.
- Servicios por persona.
- Alimentos por persona.

En estas gráficas, se ha cambiado la escala de cada variable para que puedan encajar en la misma ventana.

3.3.1 Escenario1: “El ensayo estándar de los límites del crecimiento”

“La sociedad mundial se mantiene en su senda histórica mientras le sea posible sin cambios de política fundamentales. Crecen la población industrial y la población hasta que una combinación de restricciones del medio ambiente y de los recursos naturales eliminan la capacidad del sector de capital para sostener la



inversión. El capital industrial comienza a depreciarse con mayor rapidez que la que la nueva inversión puede reconstruir. A medida que cae, los servicios sanitarios y los alimentos también caen, reduciendo las expectativas de vida y elevando la tasa de mortalidad.”

3.3.1.1 Cómo conseguir el escenario.

El escenario1 “Bussiness as usual” viene cargado por defecto y no necesitamos tocar nada. Simplemente lo ejecutamos desde el menú Run y luego visualizamos las gráficas. En la distribución estándar del fichero, las gráficas que vamos a visualizar ya viene configuradas. Veremos cómo construir gráficas con Stella cuando nos toque fragmentarlo y calibrarlo con respecto a la construcción que hagamos en Simulink.

Veamos el aspecto que tiene el fichero model.stm cuando lo abrimos y que pasos damos para reproducir cada escenario.

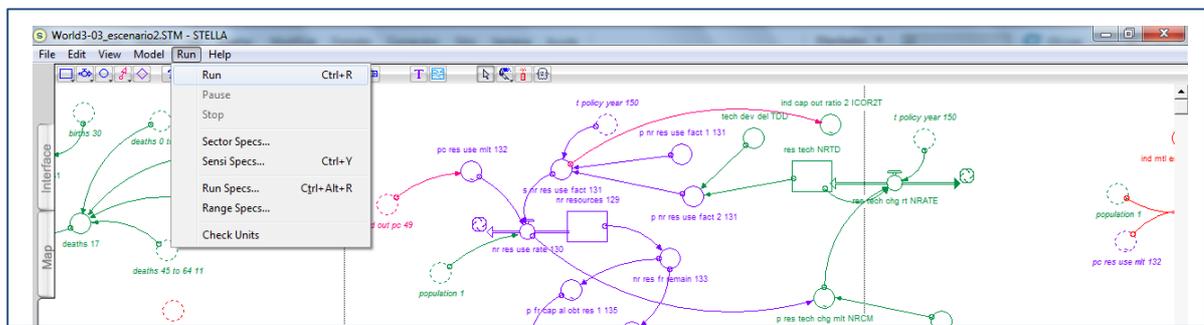


Figura 3.2.- para hacer correr cualquier escenario vamos al menú Run y ejecutamos la primera opción Run o Ctrl-R si queremos hacerlo desde el teclado.

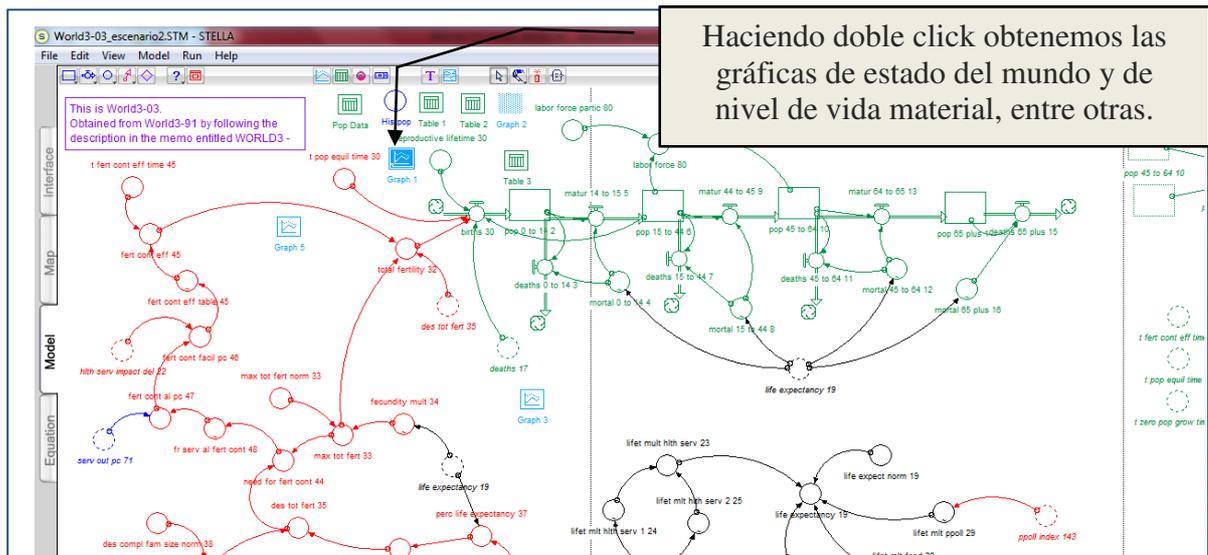


Figura 3.3.- Localización del icono que nos permite visualizar las gráficas almacenadas en el modelo model.stm

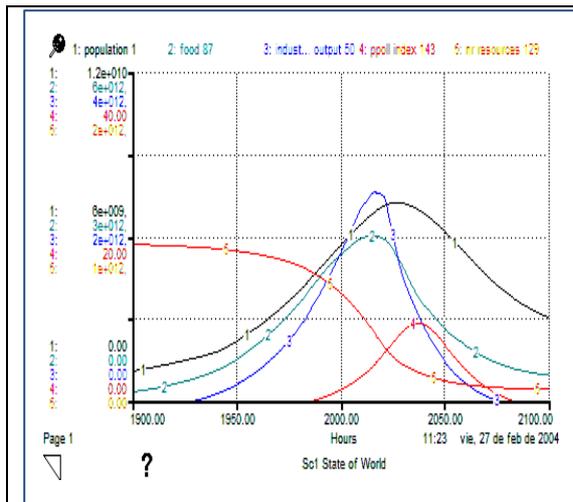


Figura 3.4.- Estado del mundo en el escenario 1

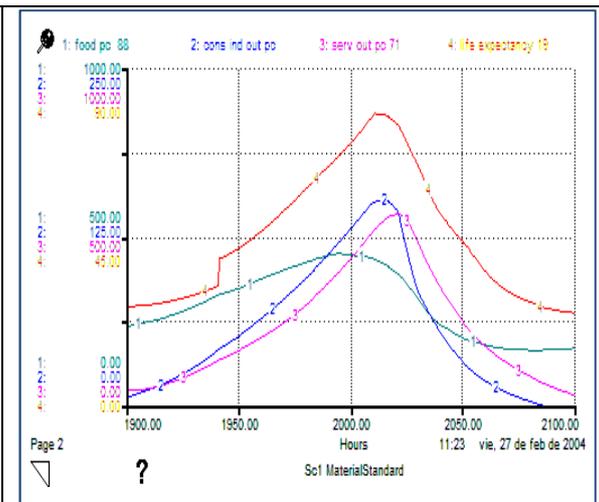


Figura 3.5.- Nivel material de vida en el escenario 1

3.3.2 Escenario2: “Se duplican los recursos del escenario1”

“Si se duplican los recursos potenciales que fueron estimados en el escenario1, la industria puede mantener su crecimiento otros 20 años más. La población alcanza los 9000 millones en el 2040. Estos niveles incrementados generan mucha más contaminación, que reduce el rendimiento de la y fuerza una mucha mayor inversión en agricultura. Eventualmente la cantidad declinante de alimentos eleva la tasa de mortalidad de la población.”



3.3.2.1 Cómo conseguir el escenario.

Para conseguir el escenario 2 tenemos que actuar sobre el nivel principal del subsistema nr_resources, localizar el stock nr_resources_129, abrirlo haciendo doble-click y cambiar su valor inicial 1e12 por 2e12

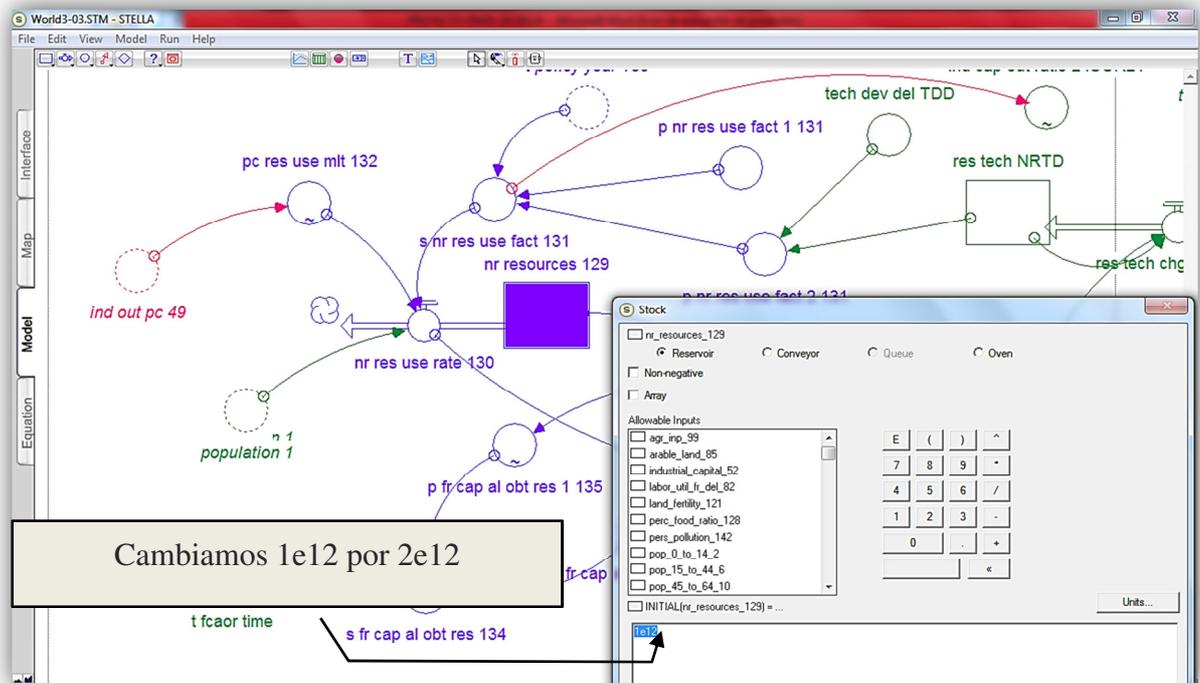


Figura 3.6.- Cómo modificar el nivel de recursos no renovables iniciales para conseguir el escenario2

Una vez cambiado el valor del nivel podemos dar al play y ver qué estimaciones nos produce. Elegimos las dos gráficas que hemos comentado: Estado del mundo y Nivel material de vida.



3.3.2.2 Qué resultados obtenemos

Veamos las gráficas del estado 2:

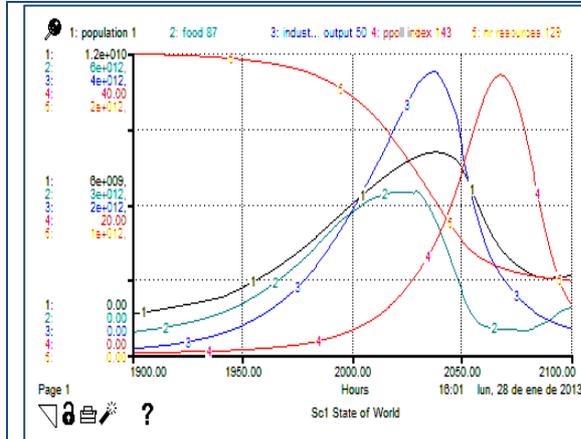


Figura 3.7.- Estado del mundo en el escenario 2:



Figura 3.8.- Nivel material de vida en el escenario 2:

3.3.3 Escenario3: “Duplicación de recursos y empleo de tecnología para el control de la contaminación”

En este escenario y en todos los siguientes, continuamos suponiendo el doble de recursos que en el escenario1. En el escenario 3 suponemos que además empleamos tecnología para reducir la contaminación a partir de 1995¹. Se intenta llegar a partir de este año a los niveles de contaminación de 1975 y se asigna capital de forma sistemática para este objetivo. Elige como modelo de aproximación el “final de la tubería”, reduciendo la contaminación en el punto de emisión, en lugar de hacerlo en la fuente.

Damos por supuesto que hacen falta veinte años para desarrollar cualquier tecnología de reducción de la contaminación e implantarla en todo el mundo. A medida que la tecnología entra en funcionamiento, reduce la cantidad de contaminación emitida con cada unidad de producto industrial a razón de un 3% anual.

3.3.3.1 Cómo conseguir el escenario

Como hemos dicho, actuamos sobre el final de la tubería, reduciendo la contaminación en el punto de emisión en vez de actuar de la fuente.

¹ Estamos siguiendo la descripción de los escenarios aparecida en la versión “Más allá de los límites del crecimiento” (Dennis Meadows, Meadows, & Randers, 1992). Aunque las simulaciones las estamos haciendo sobre la versión 03, los resultados son muy parecidos. De lo que se trata en este capítulo es de ver cómo se pueden generar escenarios en la versión de Stella, para luego ver cómo en Simulink se nos multiplican las posibilidades.



Ppoll_gen_rt_137 representa el caudal de contaminación y su valor es:

Ppoll_gen_rt_137 =

$$(ppoll_gen_ind_139+ppoll_gen_agr_140)*s_ppoll_gen_fact_138$$

Como de lo que se trata es de cerrar el grifo de contaminación que sale de la tubería en vez de actuar sobre las fuentes, vamos a actuar sobre s_ppoll_gen_fact_138

s_ppoll_gen_fact_138 = if (time > t_policy_year_150) then p_ppoll_gen_fact_2_138 else p_ppoll_gen_fact_1_138

p_ppoll_gen_fact_1_138 = 1

A partir de 1995 entra p_ppoll_gen_fact_2_138

p_ppoll_gen_fact_2_138 = SMTH3(ppoll_tech_PTD,tech_dev_del_TDD)

El SMT3 retrasa el tiempo de implantación de las políticas un tiempo igual a tech_dev_del_TDD, que en este escenario seguimos dejando en su valor inicial =

20

Y ppoll_tech_PTD es un nivel que vale:

$$ppoll_tech_PTD = \int_{1900}^t ppoll_tech_chg_rt_PTDR(dt)$$

y **ppoll_tech_chg_PTDR** = if (time > t_policy_year_150) then p_ppoll_tech_chg_mlt_POLGFM*ppoll_tech_PTD else 0

p_ppoll_tech_chg_mlt_POLGFM es una función manipulable por los usuarios para producir escenarios. Es aquí uno de los sitios donde tenemos que actuar para configurar el escenario 3 y siguientes. Veamos de forma gráfica las relaciones entre las variables y stocks y cómo hemos retocado algunos parámetros para llegar a este escenario.

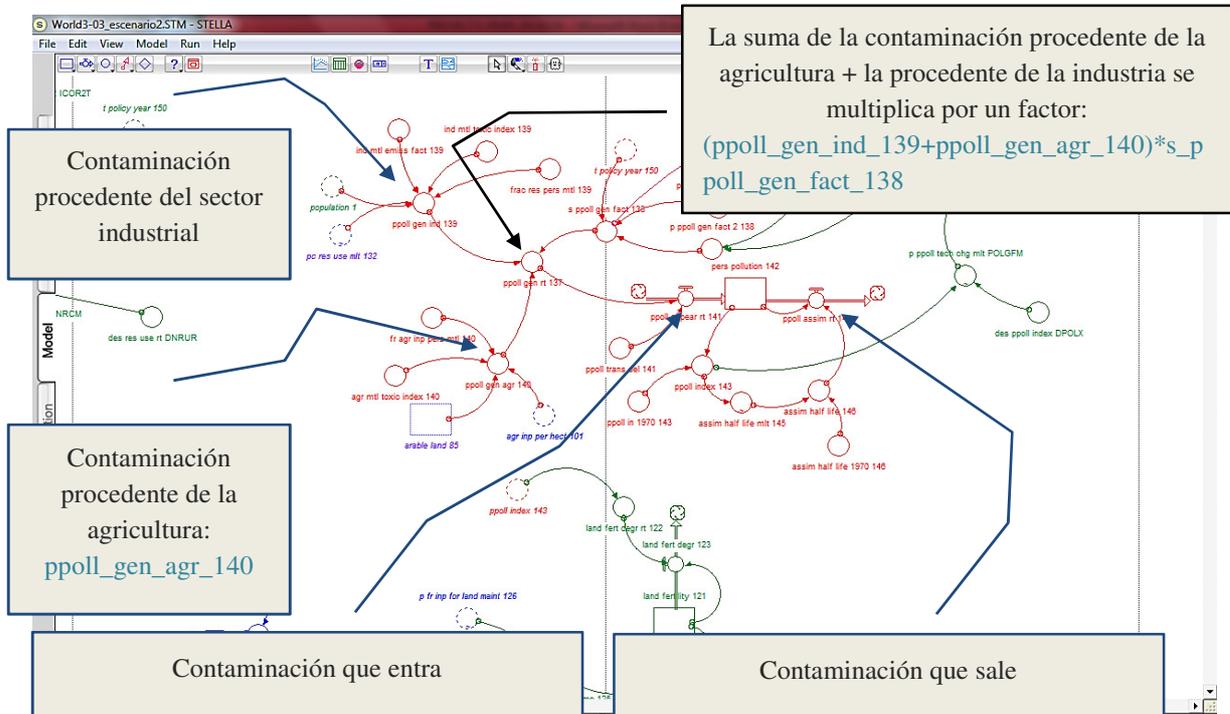


Figura 3.9.- Descripción del subsistema contaminación

Para entender cómo limitamos el impacto de la contaminación, tenemos que desplazarnos al nivel `ppoll_tech_ptd` que es el que va a producir el factor que puede reducir el caudal de salida de las dos contaminaciones. Este nivel tiene 1 como valor inicial, y para hacerlo trabajar hemos de modificar el año de implantación de la política y el porcentaje

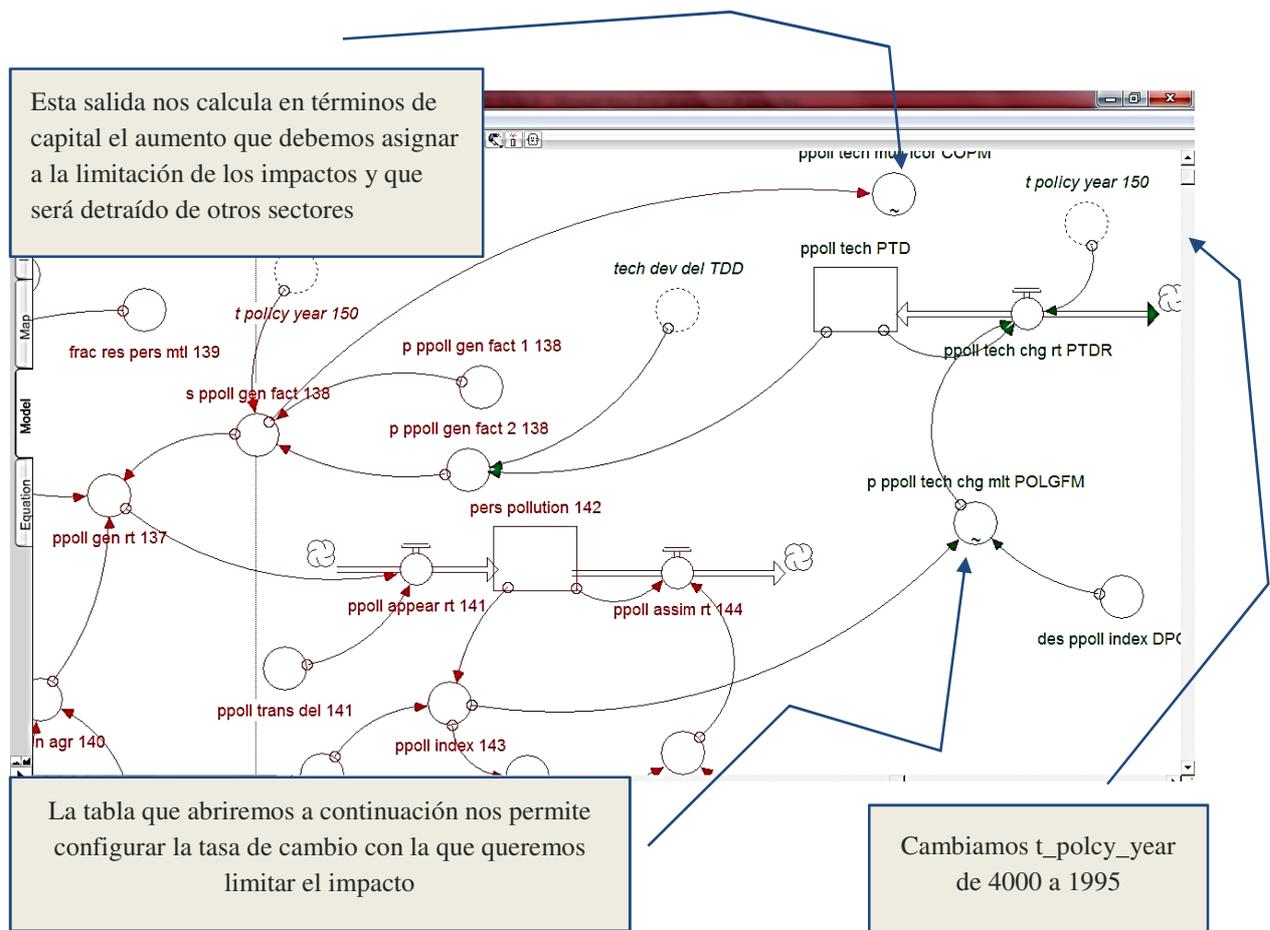


Figura 3.10.- Dónde ir dentro del subsistema contaminación para conseguir el escenario3

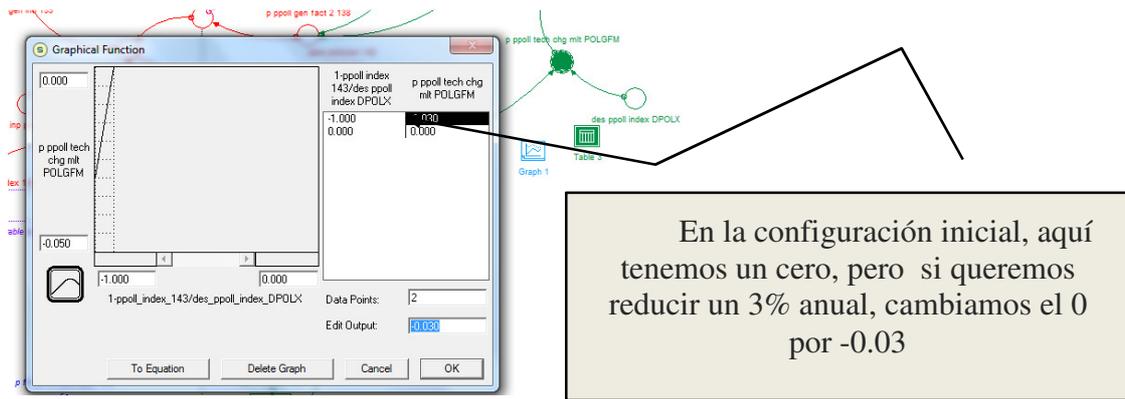


Figura 3.11.- Qué modificar dentro del subsistema contaminación para conseguir el escenario3

Veamos qué graficas nos producen estas modificaciones:

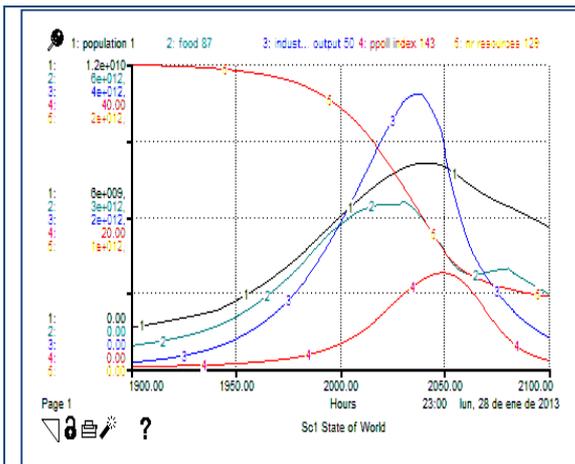


Figura 3.12.- Estado del mundo en el escenario 3

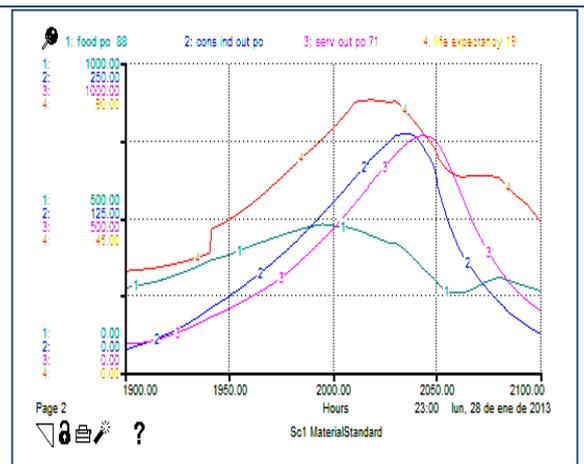


Figura 3.13.- Nivel de vida material en el escenario 3

3.3.3.2 Interpretación de los resultados:

En este escenario la contaminación continúa elevándose a pesar del programa de reducción debido a los retrasos en su realización y debido al continuo crecimiento subyacente de la agricultura y la producción industrial. Los rendimientos no decaen debido a que la pérdida de productividad de la tierra se compensa mediante el incremento de insumos agrícolas. Ejemplos del mundo real de este fenómeno son el uso de cal para limitar el impacto de la lluvia ácida o el empleo de fertilizantes para sustituir la baja capacidad de generar nutrientes que tienen los suelos a causa del uso intensivo de los pesticidas)

La producción industrial alcanza un máximo en 2035 y a partir de ahí empieza a decaer a causa de la cantidad de capital derivado hacia la escasez de recursos y a la



contaminación, lo que determina una escasez de capital para reponer la depreciación para reponer el parque industrial. Dado que la población sigue creciendo hasta el 2050, la producción industrial per cápita cae, la economía declina y se establece un colapso.

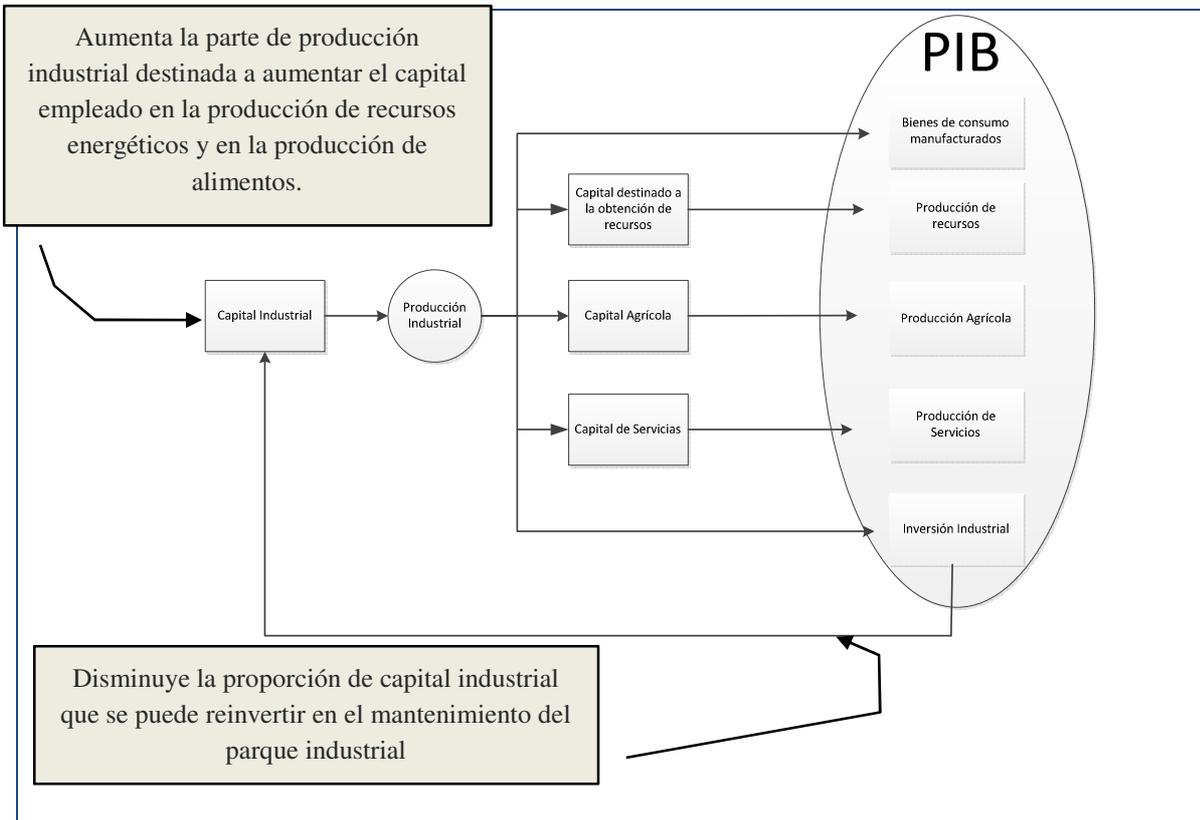


Figura 3.14.- Repercusión sobre los flujos de capital de las políticas establecidas en el escenario4

3.3.4 Escenario4: “Duplicación de recursos y tecnología para el control de la contaminación e incremento el rendimiento de la tierra”

“En este escenario asumimos que se han duplicado los recursos, como en el escenario2, y que existe además una creciente tecnología de control de la contaminación, que pueda reducir la cantidad de contaminación generada por unidad de producto industrial en un 3% anual. La contaminación no obstante se eleva lo suficiente como para producir una crisis en la agricultura que drena capital de la economía a la agricultura y eventualmente lleva al estancamiento del sector industrial. En 1995 la sociedad mundial decide incrementar los rendimientos agrícolas más allá incluso que los rendimientos de la tecnología puede brindar. (Las tecnologías adicionales pueden ser, por ejemplo, tecnologías genéticas, añadidas a las extendidas tecnologías químicas difundidas en el siglo XX). También se da por supuesto que la implantación a escala mundial durará 20 años, costará algo en términos de capital y permitirá incrementar el rendimiento en torno a un 2% anual (dependiendo de las necesidades). Obsérvese que los crecimientos anuales



del 2% logrados durante un siglo supondrían incrementos totales del rendimiento del suelo equivalentes a un factor de más de 7, en el supuesto de que no hubiera retrasos en el desarrollo de la tecnología. Veamos ahora cómo conseguir el escenario para analizar luego los resultados

3.3.4.1 Cómo conseguir el escenario

Debemos añadir al modelo los cambios hechos en el escenario3 y además incrementar la productividad del terreno un 2% anual. Todo ello a partir de 1995 y con un retraso en la implantación de las medidas de 20 años. Veamos las estructuras que hay que modificar siguiendo las viñetas, pero antes describiremos las ecuaciones fundamentales:

La producción de la tierra se representa con el valor de la variable: `land_yield_103` que algebraicamente es igual a:

land_yield_103 =
`s_land_yield_fact_104*land_fertility_121*land_yield_mlt_cap_102*s_yield_mlt_air_poll_105`

las variables `land_fertility_121`, `land_yield_mlt_cap_102`, `s_yield_mlt_air_poll_105`, no se modifican en este escenario. La que nos interesa es `s_land_yield_fact_104`

s_land_yield_fact_104=

`if (time > t_policy_year_150) then p_land_yield_fact_2_104 else p_land_yield_fact_1_104`
a partir de 1995, se pasa de `p_land_yield_fact_1_104` a `p_land_yield_fact_2_104`

p_land_yield_fact_1_104=1, por lo tanto no afecta al valor de `land_yield_103`

p_land_yield_fact_2_104=`SMTH3(yield_tech_LYTD,tech_dev_del_TDD)`

tech dev del TDD = 20, es el tiempo de retraso en la implementación de las políticas yes común al `smooth3` del escenario anterior.

yield tech LYTD es un stock utilizado para configurar el factor `s_land_yield_fact_104`, su valor es:

$$\int_{1900}^t (yield\ tech\ chg\ rt\ LYTDR)(dt)+1$$

Y **yield tech chg rt LYTDR**=`if (time > t_policy_year_150) then`

`p_yield_tech_chg_mlt_LYCM*yield_tech_LYTD`

`else 0`

Y es finalmente en **p_yield_tech_chg_mlt_LYCM** donde tenemos que actuar

Veamos con viñetas lo que vamos a hacer:

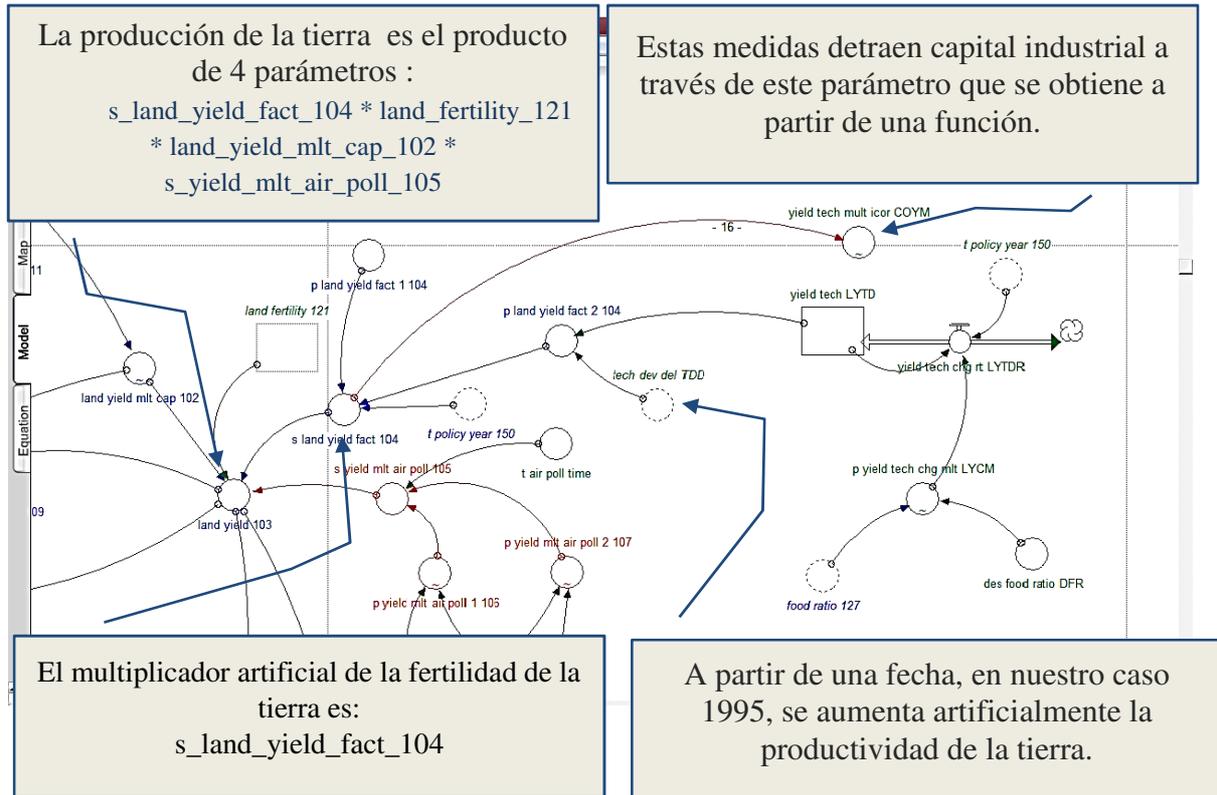


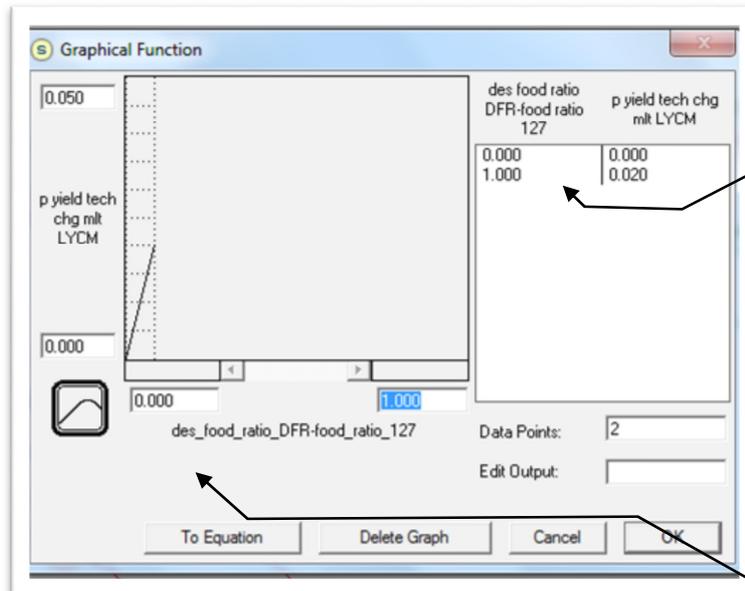
Figura 3.15.- Descripción parcial del subsistema de producción de alimentos

p_yield_tech_chg_mlt LYCM depende de food_ratio127 y de des_food_ratio_DFR.

Food ratio 127 viene de dentro del subsistema de producción de alimentos y es igual a: $food_pc_88 / subsist_food_pc_127$, y representa la relación entre los alimentos por persona medido en calorías y las calorías de subsistencia.

des food ratio DFR, equivale al ratio deseado y se compara con el food_ratio para dimensionar la medida correctora a través de la función **p_yield_tech_chg_mlt LYCM**

que presentamos en la siguiente viñeta y que es donde debemos modificar uno de los puntos para conseguir ese incremento anual de un 0,02%



En el modelo bussiness
as usual, este valor es 0,
para este escenario,
ponemos 0.02

Cuanto mayor es la diferencia entre el ratio deseado y el ratio real,
mayor es la dotación en capital destinada a obtener incrementos en la
productividad de la tierra mediante el uso de biotecnología

Figura 3.16. - Cómo modificar el subsistema alimentos para conseguir el escenario 4

Veamos qué graficas nos producen estas modificaciones:

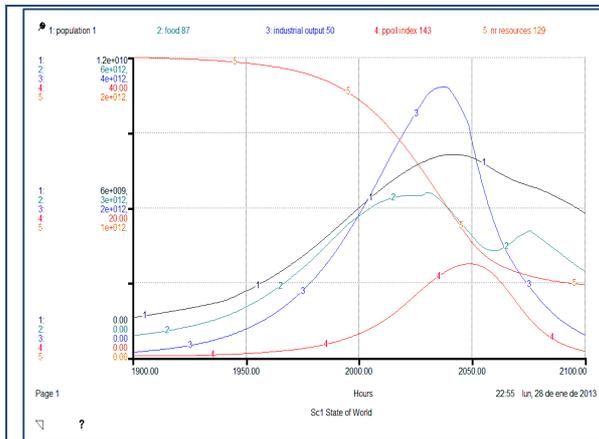


Figura 3.17.- Estado del mundo en el escenario 4

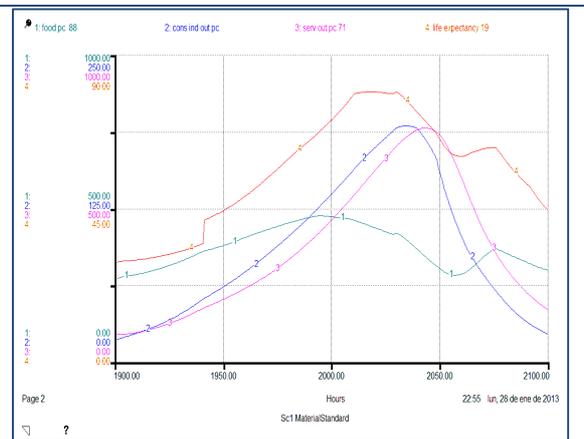


Figura 3.18.- Nivel de vida material en el escenario 4

3.3.4.2 Interpretación de los resultados:

Esta nueva tecnología agrícola, combinada con la tecnología de reducción de la contaminación, mantiene en realidad el rendimiento de la tierra en rápido ascenso en el escenario 4, hasta que los promedios normales de rendimiento alcanzan casi cuatro veces



los niveles de 1990 en el 2100. No obstante la producción de alimentos no se eleva mucho en su conjunto durante mucho más tiempo, de lo que se elevó en el escenario anterior, porque los mayores rendimientos se obtienen cada vez de menos tierra. La altísima intensificación de la actividad agrícola en este mundo simulado provoca la erosión galopante del suelo. Con menos tierra, los productores trabajan incluso para obtener mayores rendimientos de la tierra que queda, lo que ocasiona incluso mayor erosión, y así sucesivamente en un bucle de realimentación positiva que arrastra cuesta abajo al sistema de cultivo de forma acelerada. El sector agrícola, sometido a una sobrecarga, drena cada vez más capital y recursos humanos de la economía, en una época en la que la base de recursos no renovables, también en disminución, exige inversión.

3.3.5 Escenario5: “Duplicación de recursos y tecnología para el control de la contaminación, incremento del rendimiento de la tierra y protección de la erosión del suelo”

En este escenario damos por supuesto que, partir de 1995, los progresos técnicos que reducen la contaminación por unidad industrial de producto e incrementan el rendimiento de la tierra han sido incorporados, pero añadimos un programa que reduce la erosión global de la tierra. Los dos primeros programas requieren inversión de capital, el tercero, damos por supuesto que no la requiere.

3.3.5.1 Cómo conseguir el escenario.

Partiendo del escenario 4, vamos a localizar la parte del subsistema agrícola que se usa para limitar la erosión de la tierra y poder reducir la erosión global de tierra por tres. Vayamos pues al recorte de desarrollo y pérdida de tierra del subsistema de producción de alimentos

arable land 85 Representa el stock de tierra cultivable. La tierra cultivable aumenta con la entrada de tierra potencialmente cultivable, como por ejemplo, la superficie boscosa y disminuye, o bien por erosión o bien por su uso para terreno urbano e industrial.

land erosion rt 116 representa la superficie de tierra que se erosiona cada año, y que es igual a la tierra cultivable dividido entre la vida media de la tierra

$$\text{land_erosion_rt_116} = \text{arable_land_85} / \text{avg_life_land_112}$$

avg life land 112 Representa la vida media de la tierra cultivable y es función de la vida media normal de la tierra avg_land_norm_112 y de $\text{s_land_life_yield_113}$

$$\text{avg_life_land_112} = \text{avg_life_land_norm_112} * \text{s_land_life_mlt_yield_113}$$

s land life mlt yield 113 Multiplicador de la vida del suelo del rendimiento de la tierra

$$\text{s_land_life_mlt_yield_113} = \text{if (time > t_land_life_time) then}$$

$$0,95^{(\text{time} - \text{t_land_life_time})} * \text{p_land_life_mlt_yield_1_114} \\ + (1 - 0,95^{(\text{time} - \text{t_land_life_time})}) * \text{p_land_life_mlt_yield_2_115}$$

Else

$$\text{p_land_life_mlt_yield_1_114}$$



t land life time Es el parámetro que debemos modificar de 4000 a 1995

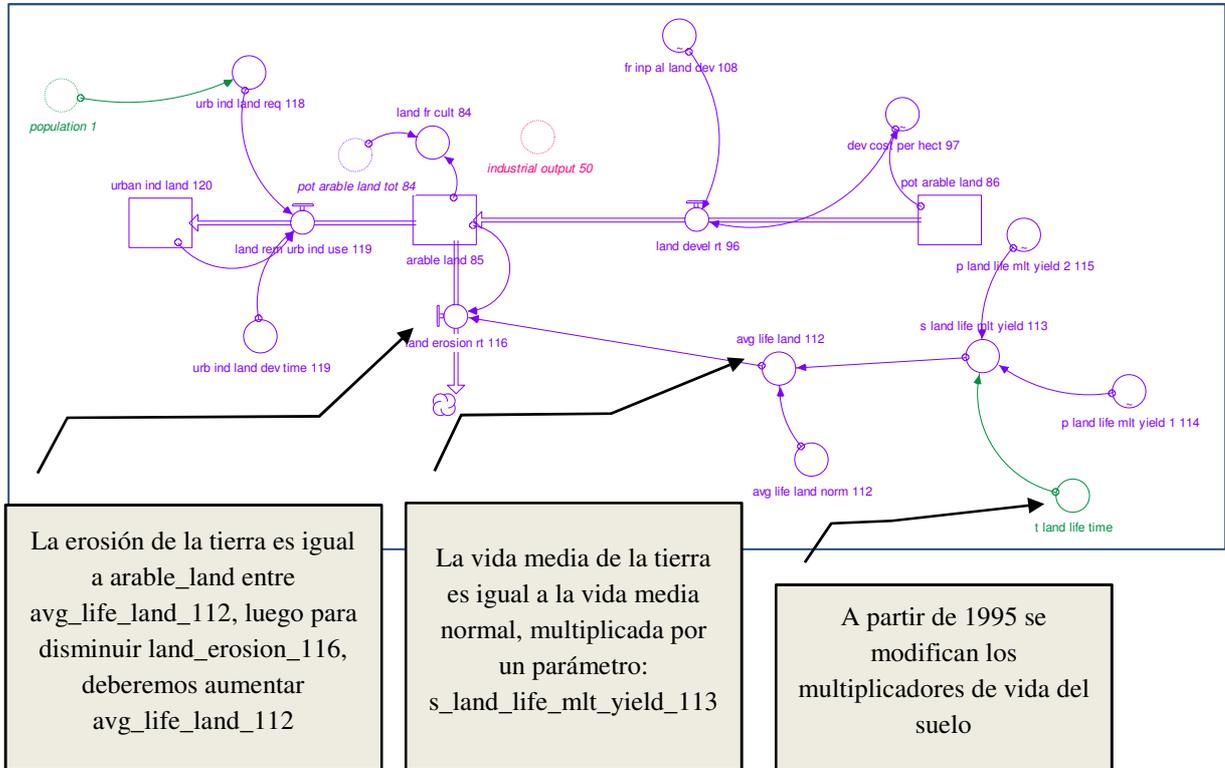


Figura 3.19.- Descripción del área de conservación - erosión de la tierra del subsistema producción de alimentos.

Veamos los efectos que producen estos cambios:

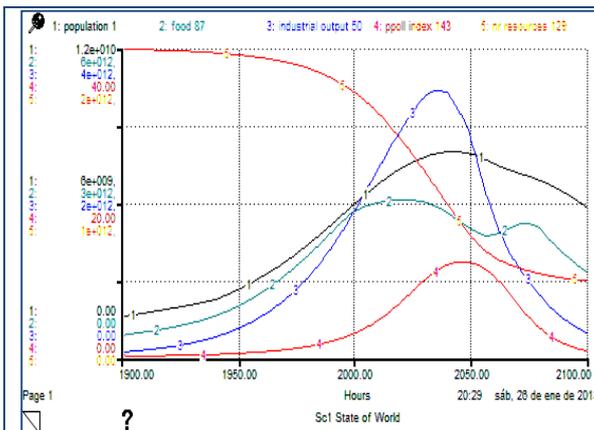


Figura 3.20.- Estado del mundo en el escenario 5:

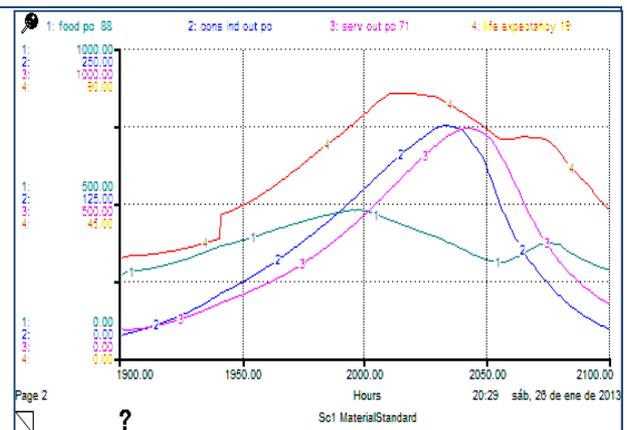


Figura 3.21.- Nivel material de vida en el escenario 5



3.3.5.2 Interpretación de los resultados:

El resultado del escenario5 no es una crisis de recursos, contaminación o tierra, sino de todos más o menos al mismo tiempo. El alimento suficiente, la contaminación tolerable, la economía crece, la expectativa de vida aumenta, hasta aproximadamente el año 2020, cuando el coste de las diversas tecnologías, además del coste creciente de la obtención de recursos, simplemente exige más capital en cualquier momento del proceso que el que la economía puede proveer.

3.3.6 Escenario6: “Duplicación de recursos y tecnologías para el control de la contaminación, incremento del rendimiento de la tierra, protección de la erosión del suelo y tecnología eficiente en recursos”

En el escenario 6 se inicia el escenario de simulación del año 1995 que reduce la cantidad de recursos no renovables necesarios por unidad de producto industrial en un 3% hasta que el consumo total de recursos no renovables desciende al nivel de 1975 (esto también reduce la contaminación). Entretanto, también se conservan operativos los programas de tecnologías de control de la contaminación, de rendimiento del suelo y de protección del suelo.

3.3.6.1 Cómo conseguir el escenario.

Partiendo del escenario 5, vamos a localizar la parte del subsistema de recursos no renovables que se usa para limitar la intensidad energética. Estas políticas de aumento de eficiencia energética, tienen un retraso en la implantación de 20 años. La demanda anual de energía depende de la población y del consumo de energía por persona y de un factor: $s_nr_res_use_fact$.

$$nr_res_use_rate_130 = population_1 * pc_res_use_mlt_132 * s_nr_res_use_fact_131$$

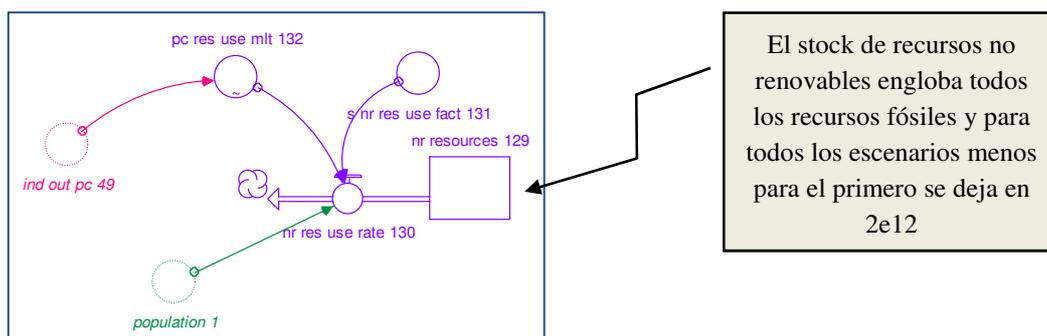


Figura 3.22.- Área del subsistema de recursos no renovable con el stock inicial de recursos fósiles

Para mejorar la relación de energía consumida por cada unidad de producción industrial, debemos atacar este factor.

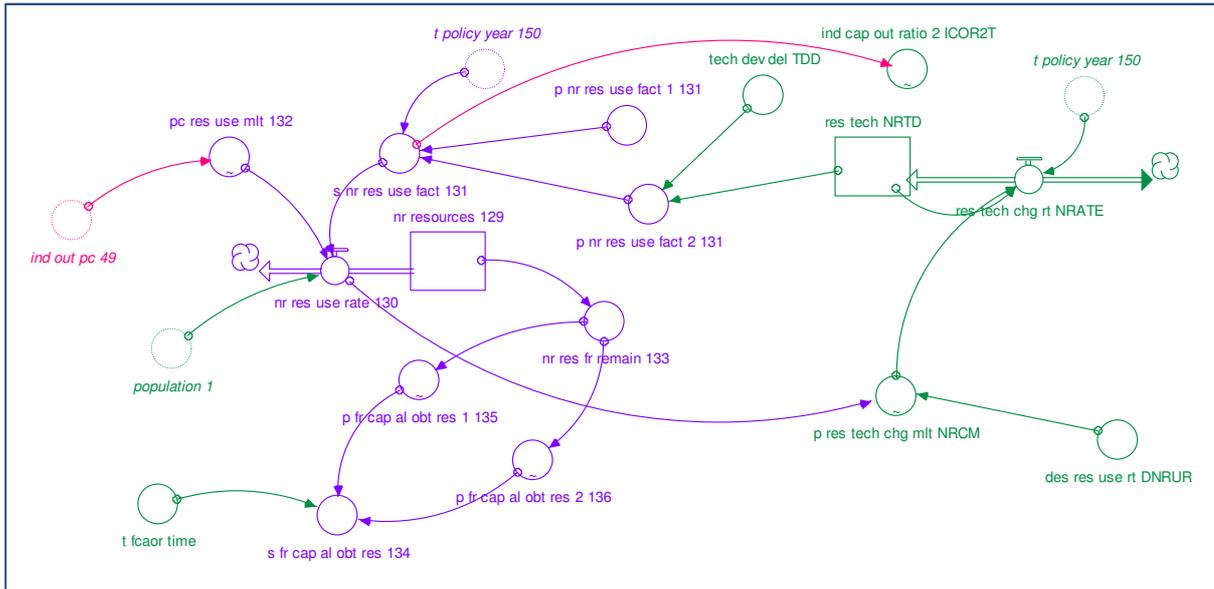


Figura 3.23.- Recorte del subsistema de recursos no renovables

sn_res_use_fact_131 = if (time > t_policy_year_150) then
p_nr_res_use_fact_2_131
else
p_nr_res_use_fact_1_131

A partir de t_policy_year = 1995 entra p_nr_res_use_fact_2_131, hasta esa fecha hemos estado trabajando con p_nr_res_use_fact_1_131=1

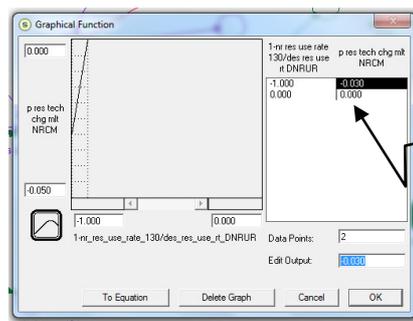
p_nr_res_use_fact_2_131 = SMTH3 (res_tech_NRTD, tech_dev_del_TDD)

tech_dev_del_TDD = tiempo para implementar las tecnologías, es el mismo que el usado para implementar las tecnologías de reducción de la contaminación

res_tech_NRTD = $1 + \int_{1900}^t \text{res_tech_chg_rt_NRATE}(dt)$

res_tech_chg_rt_NRATE = if (time > t_policy_year_150) then
p_res_tech_chg_mlt_NRCM * res_tech_NRTD
else 0

p_res_tech_chg_mlt_NRCM Es una de las funciones que debemos modificar para conseguir este escenario.



Aquí cambiamos el 0 de los escenarios anteriores y ponemos -0.03

Figura 3.24.- Cómo modificar el subsistema de recursos no renovables para conseguir el escenario 6. Paso1

Con este cambio, hemos mejorado la eficiencia energética de los recursos restantes, este subsistema también nos permite reducir el empleo de recursos industriales para extraer los recursos restantes. Veamos:

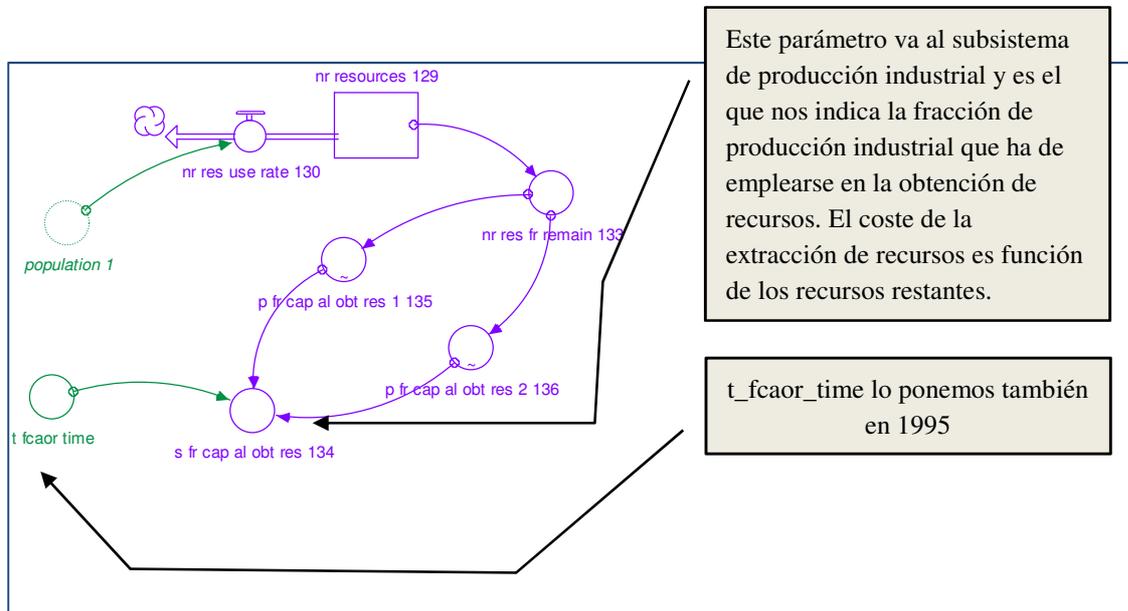
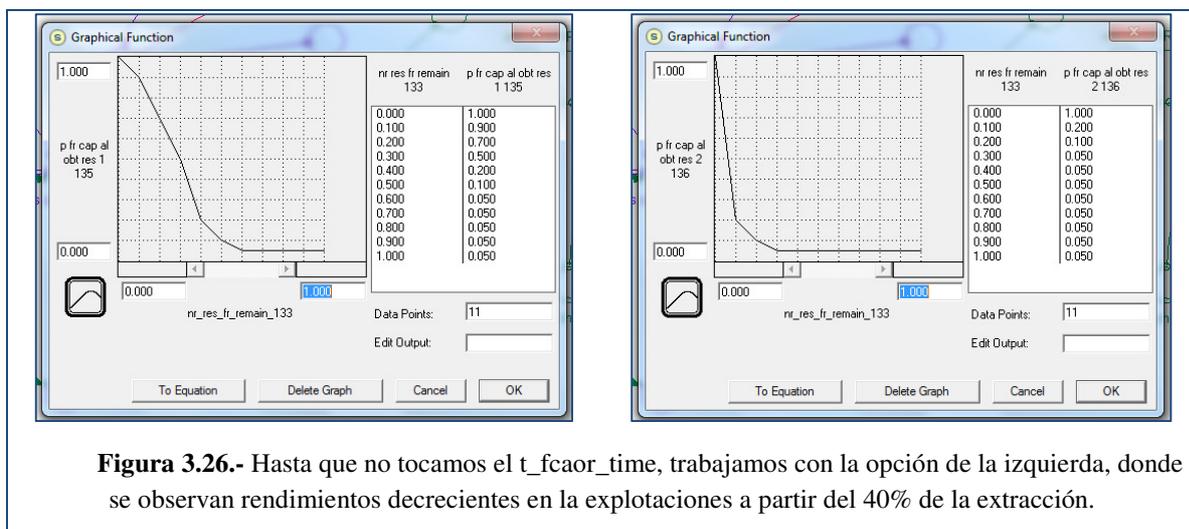


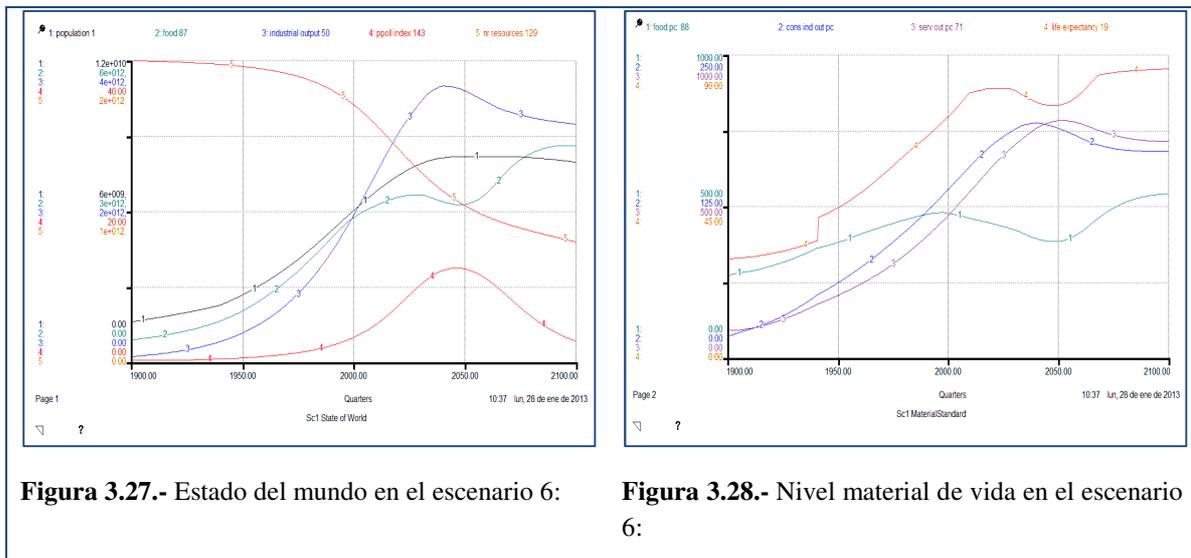
Figura 3.25.- Cómo modificar el subsistema de recursos no renovables para conseguir el escenario 6. Paso2

A medida que los yacimientos de petróleo, gas, uranio o carbón se van agotando, resulta más costoso extraer cada unidad de producción. Pero en la opción 2 ciertas mejoras tecnológicas han permitido retrasar este aumento en el precio, que no empieza a manifestarse hasta que hemos consumido el 70% de los recursos





Veamos los efectos que producen estos cambios:



3.3.6.2 Interpretación de los resultados:

Esta combinación de tecnologías permite que la economía siga creciendo hasta el 2050, los recursos no renovables se mantienen bajos. La producción de alimentos se mantiene de forma gradual. La contaminación crece lo suficiente para rebajar la producción de la tierra, pero su efecto puede suprimirse con la adición de insumos agrícolas. El mundo está desarrollando tecnologías para reducir la contaminación, incrementar el rendimiento de la tierra, proteger los suelos y conservar los recursos a un mismo tiempo. Se supone que todas estas tecnologías insumen capital y su implantación completa requiere 20 años. Combinadas permiten al mundo simulado proseguir su crecimiento hasta el año 2050. Lo que finalmente detiene el crecimiento es el coste acumulado de las tecnologías. A partir del tercer cuarto de siglo, los descensos en los recursos no renovables empiezan a emplear grandes recursos de capital que provocan descensos en la producción industrial y de servicios per cápita.

3.3.7 Escenario7: “Aplicación de todas las tecnologías con menor retraso”

En el escenario 7 repetimos las condiciones del escenario 6, reduciendo el tiempo de implementación de las tecnologías de 20 a 5 años. Es el último escenario en el cual se ponen en marcha sólo medidas tecnológicas. Veamos cómo conseguirlo y qué resultados da:

3.3.7.1 Cómo conseguir el escenario

Tenemos que localizar los tiempos de implementación en las políticas. El `tech_dev_del_TDD`, nos aparece en el subsistema recursos, en el subsistema contaminación y en el subsistema alimentos. Con cambiarlo en uno de los tres subsistemas basta, ya que al cambiarlo en uno, se cambia en todos.

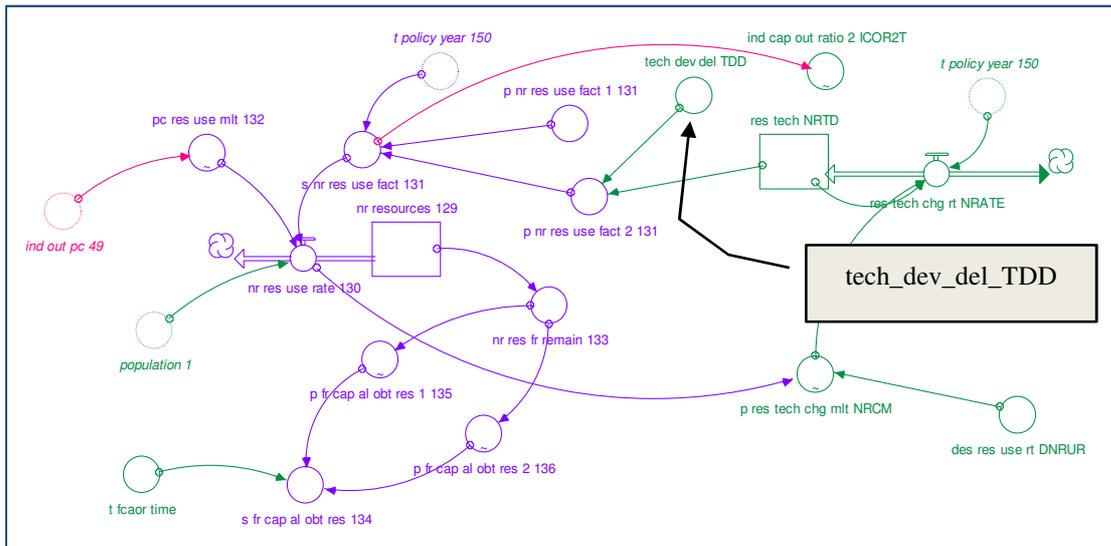


Figura 3.29.- Cómo reducir los plazos de implementación de políticas para conseguir el escenario7

3.3.7.2 Interpretación de resultados

Este es el último escenario en el que solamente se aplican medidas tecnológicas que funcionan hasta el tercer cuarto de siglo. Se consiguen ciertas mejoras con respecto al escenario6, pero finalmente se entra también en declive como consecuencia del alto nivel de población y del coste de los recursos energéticos una vez que se supera el 60% del total de recursos

Veamos los efectos que produce:

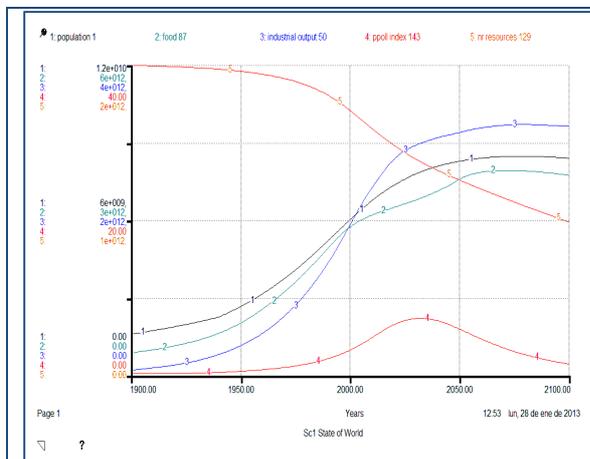


Figura 3.30.- Estado del mundo en el escenario 7:

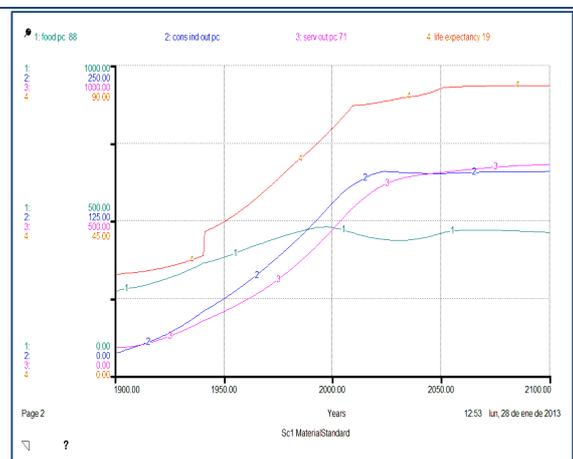


Figura 3.31.- Nivel de vida material en el escenario 7:



3.3.8 Escenario8: “El mundo adapta objetivos estables de población en 1995”

A partir de este escenario y los siguientes, vamos a incorporar factores de tipo cultural: por un lado, vamos a actuar sobre el control de natalidad y por otro, vamos a actuar sobre una limitación voluntaria en los niveles de consumo. Finalmente en los últimos escenarios, incorporaremos los progresos tecnológicos a estas medidas culturales para conseguir en éstos, un mundo estabilizado. En el escenario 8 se asume el escenario 2, es decir, nivel inicial de recursos no renovables igual a 2e12 y además las parejas deciden a partir de 1995 limitar el número de hijos por pareja a 2.

3.3.8.1 Cómo conseguir el escenario

Veamos la estructura del subsistema:

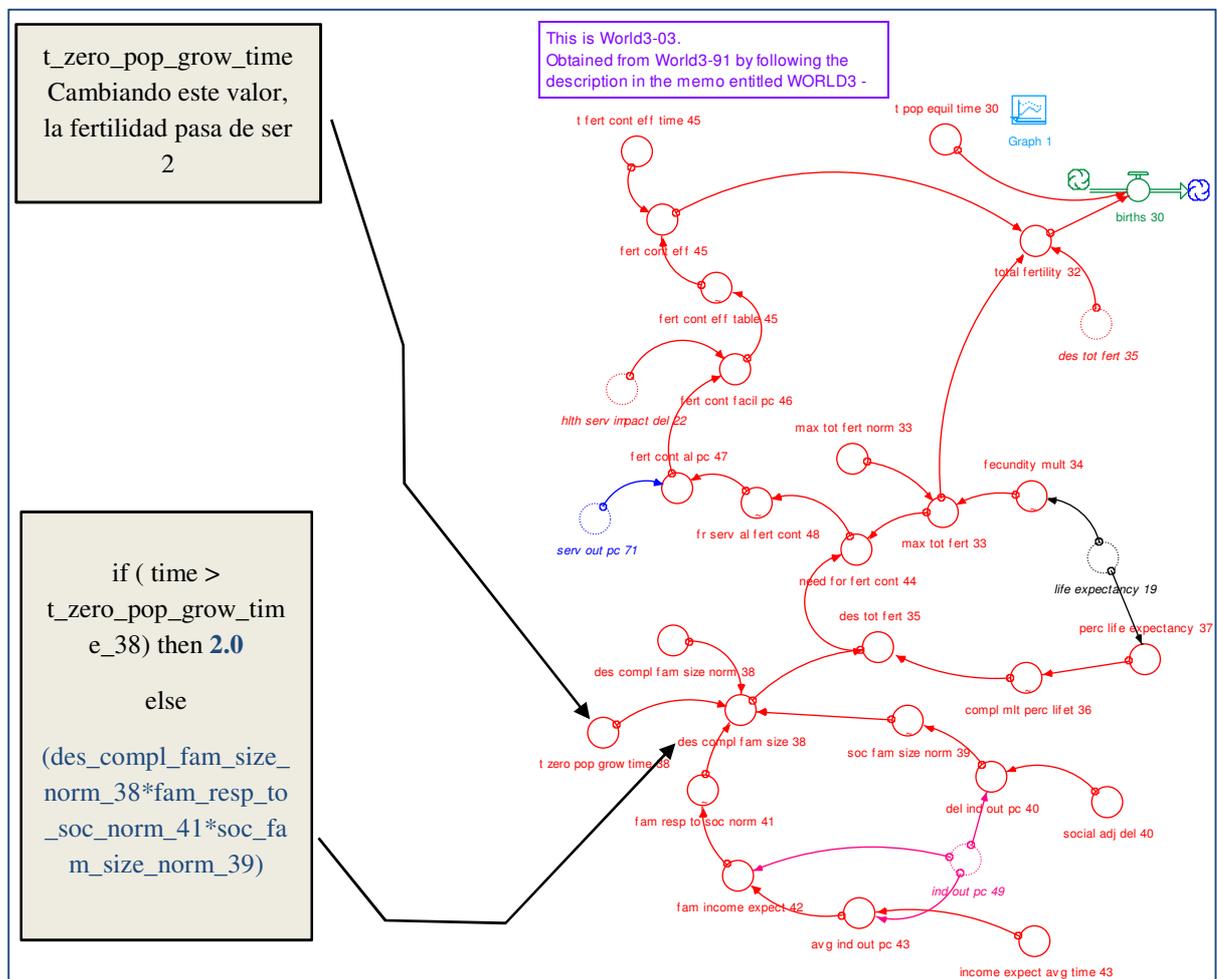
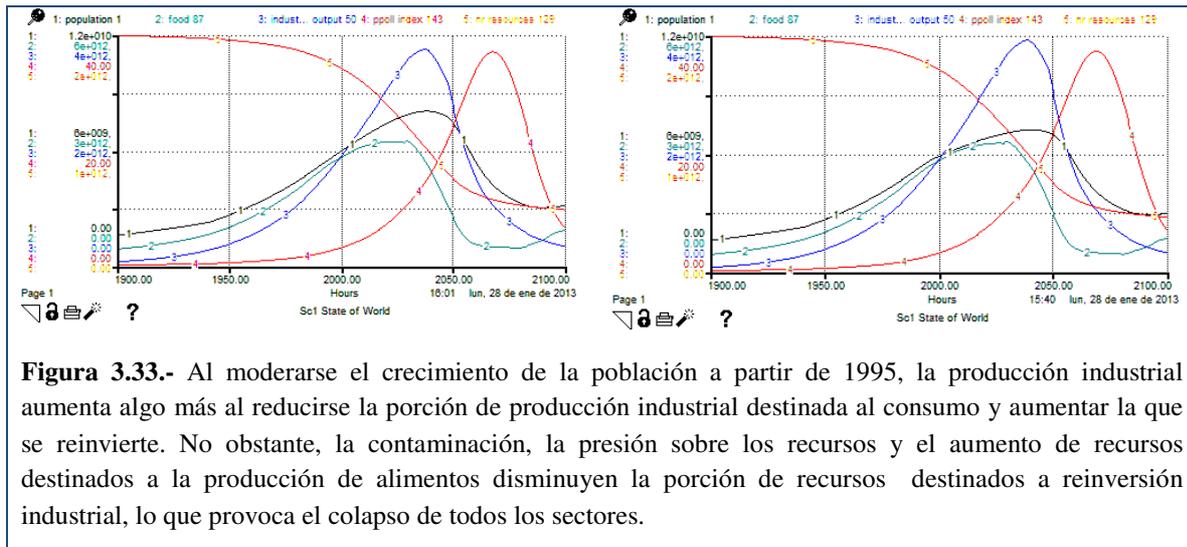


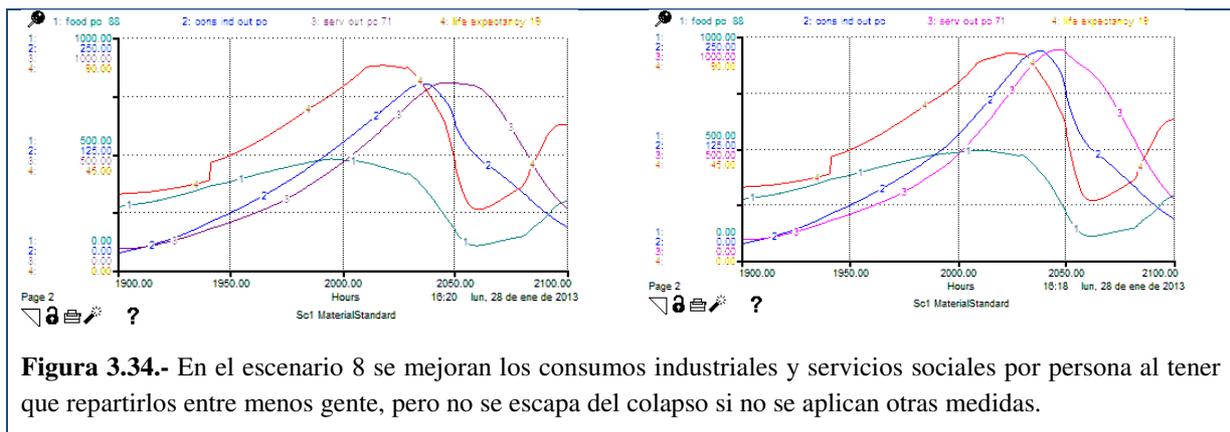
Figura 3.32.- Descripción del subsistema fertilidad

Veamos qué gráficas produce comparándolas con el escenario 2

Estado del mundo en el escenario 2 y en el escenario 8:



Nivel material de vida en el escenario 2 y en el escenario 8:



3.3.9 Escenario9 “El mundo adopta objetivos estables de población y producción industrial en 1995”

En este escenario el mundo decide, no solo limitar la población, sino que decide limitar también el consumo a partir de cierto nivel de renta. En este mundo hay una definición de lo que es suficiente. Este mundo se ha decidido a alcanzar un nivel de consumo per cápita de 350\$ en 1995. Es un nivel de renta equivalente al nivel per cápita europeo de los años 90 si excluimos los gastos militares y la corrupción.

3.3.9.1 Cómo conseguir este escenario

Tenemos que entrar en el subsistema de producción industrial, seleccionar el año en que queremos empezar a equilibrar la renta y después poner la opción que corresponda a 350.

Veamos cómo conseguirlo. El subsistema industrial es clave en el W3 ya que representa la estructura del capital y la producción que representamos en la figura 3.1



La parte de la producción industrial que se reinvierte en formación de capital es igual a:

$$\underline{\text{ind cap invest 55}} = \text{fioa_ind_56} * \text{industrial_output_50};$$

$$\underline{\text{fioa ind 56}} = 1 - \text{s_fioa_agr_93} - \text{s_fioa_serv_63} - \text{s_fioa_cons_57}$$

siendo:

- s_fioa_agr_93, la fracción que se dedica a la formación de capital agrícola.
- s_fioa_serv_63, la fracción que se dedica a la formación de capital en el sector servicios.
- s_fioa_cons_57, la fracción que se dedica a consumo

s fioa cons 57 if (time > t_ind_equil_time_57) then

p_fioa_cons_var_59 else

s_fioa_cons_const_58

Por el lado del 59 tenemos:

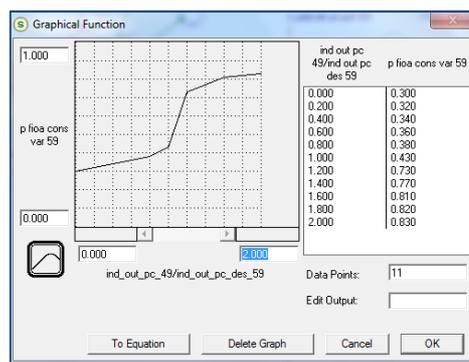


Figura 3.35.- Gráfica para el equilibrado de la producción industrial en el World3-03

Según esta gráfica, si la producción industrial per cápita es mayor que la renta per cápita deseada, se destina menos fracción al consumo y más a la inversión y viceversa. En el punto de equilibrio se destina el 0,43 por ciento a consumo. Si con esta política, reducimos la renta deseada a 350, la relación entre ind_out_pc e ind_out_pc_des_59 aumenta y hay más posibilidad de consumir más parte del PIB.

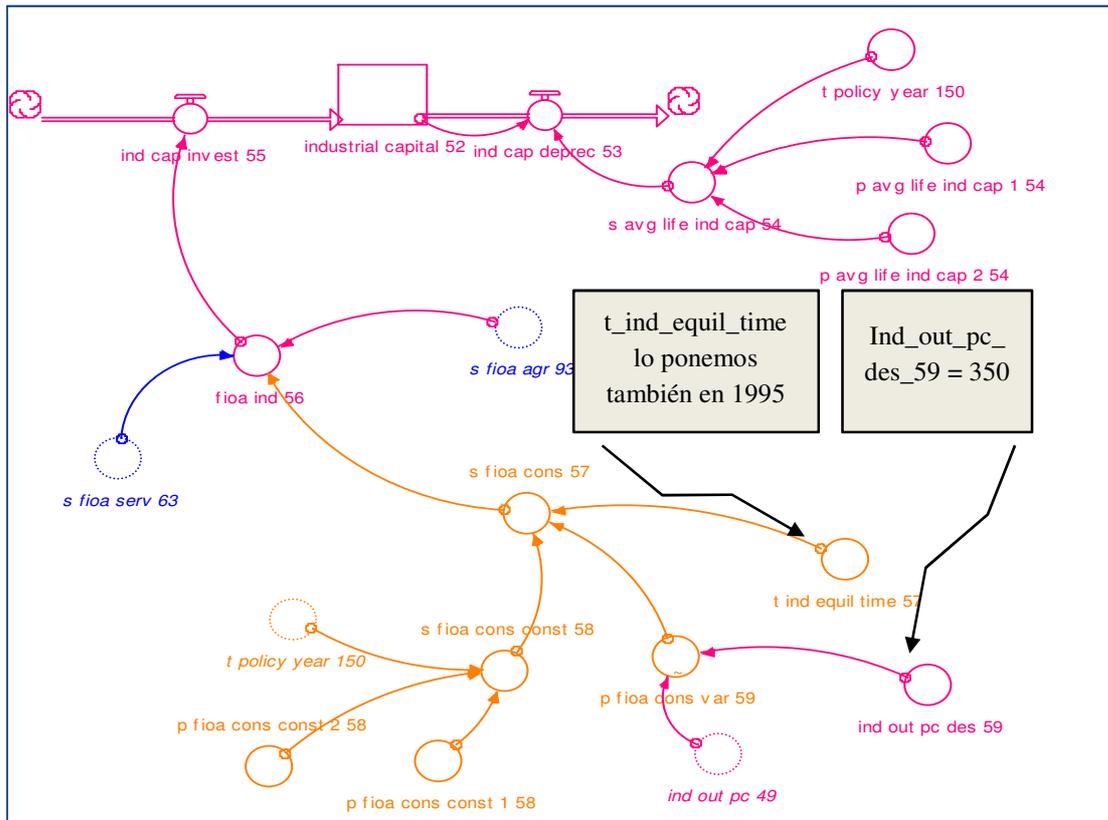


Figura 3.36.- Recorte del subsistema producción industrial desde donde se pueden modificar las estructuras para estabilizar la población.

Veamos ahora qué resultados da:

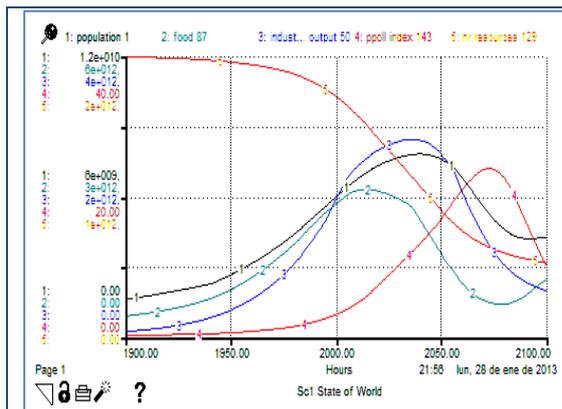


Figura 3.37.- Estado del mundo en el escenario 9:

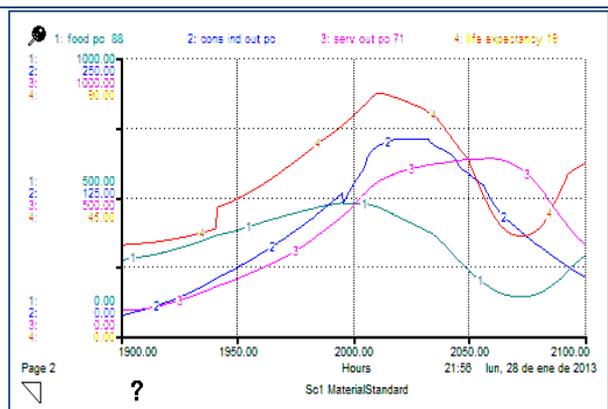


Figura 3.38.- Nivel de vida material en el estado 9:



3.3.9.2 Interpretación de resultados

Este podría ser un mundo con un nivel de servicios excelente para todos durante 75 años. Al limitarse el consumo se asignan más recursos a la formación de capital en servicios. Pero sin técnicas para reducir la contaminación, esta limita la producción del sector agrícola que no es capaz de mantener estables los alimentos por persona, lo que va haciendo aumentar la tasa de mortalidad, hasta que en el 2050 esta supera la tasa fijada de natalidad y la población comienza a declinar. Además, si no hay inversiones en mejorar la eficiencia energética ni tampoco las hay en mejorar las tecnologías de extracción, los recursos destinados a la obtención de energía empiezan a drenar las inversiones destinadas a reponer el parque industrial y la producción industrial per cápita también decae al mermar el capital industrial.

3.3.10 Escenario10 “Población e industria estabilizadas con tecnologías para reducir las emisiones, la erosión y el uso de recursos adoptadas en 1995”

En este escenario se ponen en marcha las decisiones del escenario 6 más las decisiones del escenario 8, es decir, tamaño de familia de 2 hijos, renta media 350\$ y tecnologías para mejorar el rendimiento del suelo, prevención de la erosión, limitar el impacto de la contaminación así como mejoras en la eficiencia energética y tecnologías para mejorar el rendimiento decreciente de las explotaciones mineras. Estimamos el tiempo de implantación de estas tecnologías en 20 años.

Veamos el estado del mundo y el nivel de vida material

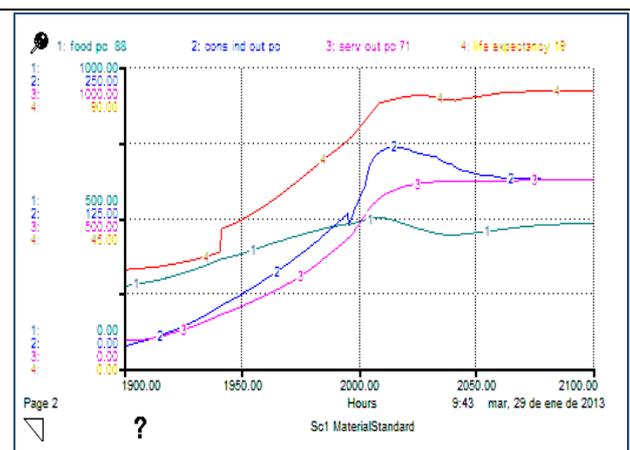
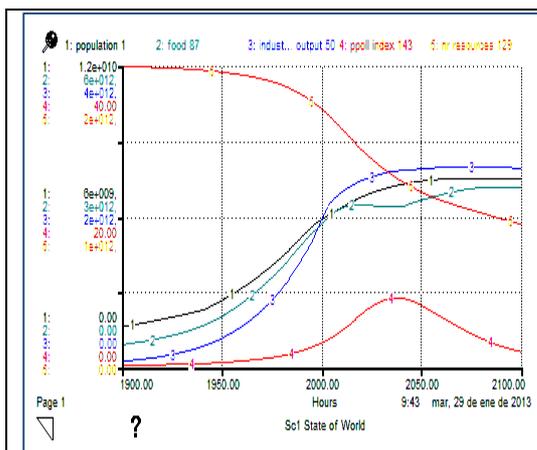


Figura 3.39.- Estado del mundo en el escenario10: Figura 3.40.- Nivel material de vida en el escenario 10:



3.3.10.1 Interpretación de resultados

En el escenario 10 la población se nivela escasamente por debajo de los 8000 millones y logra un buen de vida material durante casi un siglo. Después del año 2010 su expectativa de vida se mantiene por encima de los 80 años, sus servicios por persona se elevan un 210% por encima del nivel de 1990 y hay suficientes alimentos para todos. La contaminación alcanza su máximo y empieza a decaer antes de causar daños irreversibles. Los recursos no renovables se extinguen tan lentamente que la mitad del stock inicial se encuentra presente en el 2100. El sistema se coloca debajo de sus límites, evita un colapso descontrolado y se sostiene casi, pero no del todo, en equilibrio.

La palabra equilibrio en el lenguaje de sistemas significa que los ciclos positivos y negativos están compensados y que los grandes stocks se mantienen estables. A grandes rasgos son como ríos que mantiene estables su caudal, el agua que entra a partir de un punto es igual al agua que sale, a pesar de que fluye es siempre agua nueva. La sociedad del escenario 10 es una sociedad ideal todavía posible en 1995. El modelo World 3 permite aún más simulaciones y puede aún generar más aprendizajes. Podemos todavía alargar el periodo de vida del capital industrial con medidas de reutilización y reciclaje, podemos ver qué pasaría si las medidas que hemos tomado en 1995 las hubiésemos tomado en el año 2015 o en 1975 o podemos ver cómo se comporta todo si en vez de situar el nivel de vida material deseado en 350 lo hubiésemos puesto en 700\$

3.3.11 Escenario 11 “Población e industrias estabilizadas con tecnologías para reducir las emisiones, la erosión y el uso de los recursos, adoptadas en 1975”

El escenario 11 es exactamente igual al escenario 10 con la salvedad de que los cambios se llevan a efecto 20 años antes, es decir en 1975. Para conseguir este escenario hay que poner todas las variables temporales t_policy_year , $t_land_life_time$, t_fcaor_time , $t_zero_pop_grow_time$, $t_ind_equil_time$ igual a 1975. Veamos las gráficas:

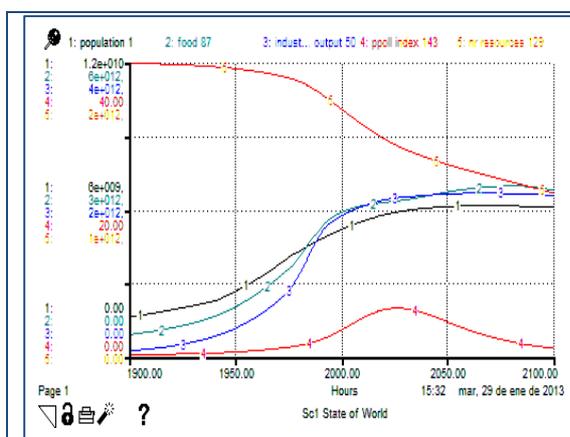


Figura 3.41.- Estado del mundo en el escenario 11

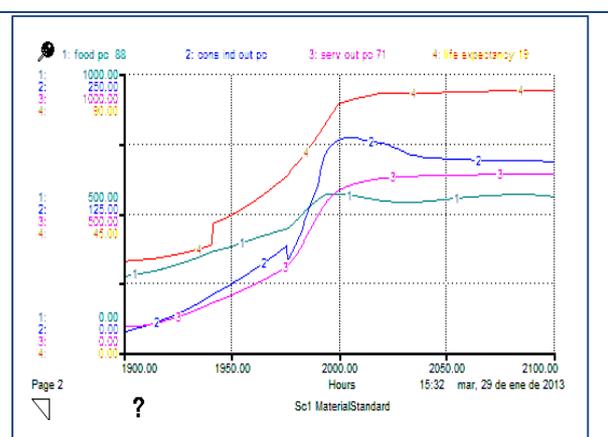


Figura 3.42.- Nivel material del mundo en el escenario 11

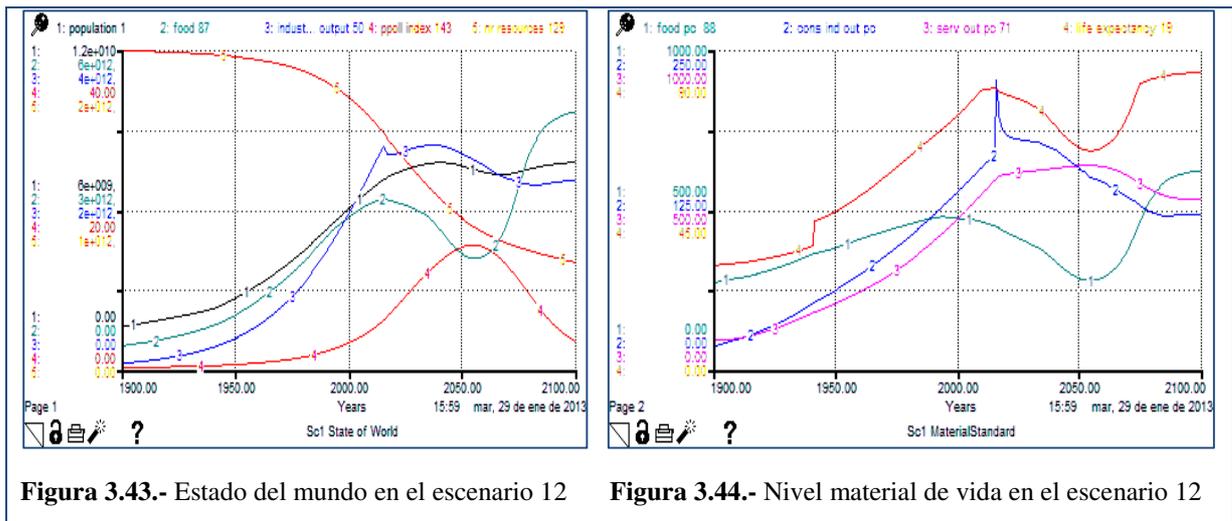


3.3.11.1 Interpretación de los resultados

La entrada en el reino de la sostenibilidad 20 años antes ha producido un mundo más seguro y más rico, pero no es un mundo cualitativamente distinto, la población se limita antes, la contaminación no sube tanto e interfiere mucho menos en el rendimiento de las cosechas que en el escenario 10. La expectativa de vida alcanza los 80 años y se mantiene alta. Hay más recursos no renovables disponibles a finales del siglo XXI.

3.3.12 Escenario12 “Población e industrias estabilizadas con tecnologías para reducir las emisiones, la erosión y el uso de recursos, adoptadas en el 2015”

El escenario 11 es exactamente igual al escenario 10 con la salvedad de que los cambios se llevan a efecto 20 años después, es decir en 2015. Para conseguir este escenario hay que poner todas las variables temporales t_policy_year , $t_land_life_time$, t_fcaor_time , $t_zero_pop_grow_time$, $t_ind_equil_time$ igual a 2015. Veamos las gráficas:



3.3.12.1 Interpretación de los resultados

Un retraso de 20 años supone una gran diferencia, como cabía esperar conociendo las consecuencias del crecimiento exponencial. Parece demasiado tarde para evitar algunas consecuencias. La población simulada del escenario 12 supera en más de 1500 millones a la del escenario 11 y pese a que se fija el mismo nivel de vida, la producción industrial debe elevarse y no controla el impacto de la contaminación en la producción de alimentos. Una vez que los avances tecnológicos empiezan a tener efecto, hacia 2035, parece que la producción de alimentos se recupera así como la expectativa de vida. Se ha necesitado no obstante tal cantidad de inversión para corregir el sobrepasamiento, que no es suficiente lo que está disponible para sostener el nivel material de vida deseado. Que cae bruscamente, después de subir bruscamente y limitar el crecimiento de los servicios por persona. El equilibrio se alcanza muy al final del siglo, pero ya con los recursos no



renovables por debajo del 40%, lo que eleva sobremanera su explotación y hace ya muy difícil mejorar la eficiencia energética de la producción industrial.

3.3.13 Escenario13 “Políticas de equilibrio pero con objetivos más altos de producción industrial y de alimentos”

Usando todas las políticas del escenario 10 pero con un consumo deseado de 700\$. . Para conseguir este escenario hay que poner todas las variables temporales t_policy_year , $t_land_life_time$, t_fcaor_time , $t_zero_pop_grow_time$, $t_ind_equil_time$ igual a 1995. Vamos en este escenario los tiempos alargados hasta el año 2300:

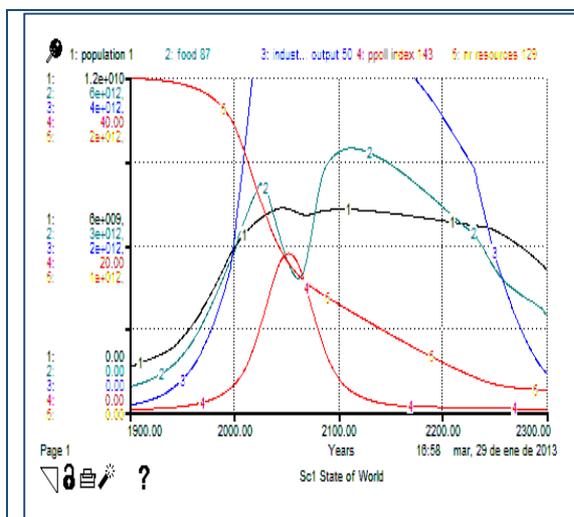


Figura 3.45.- Estado del mundo entre los años 1900 y 2300 en el escenario 13:

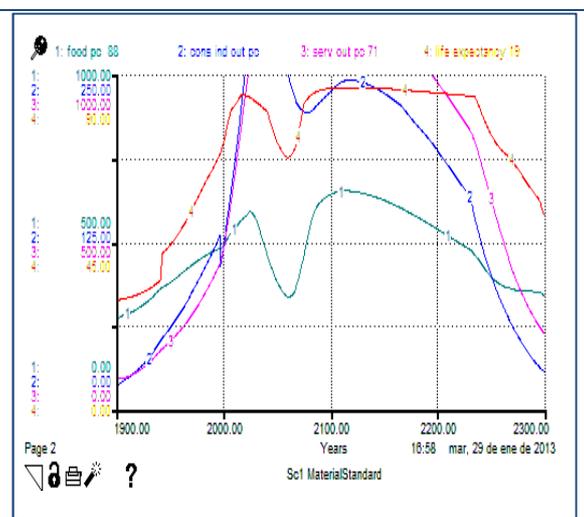


Figura 3.46.- Nivel de vida material entre los años 1900 y 2300 en el escenario 13:

3.3.13.1 Interpretación de los resultados

Lo primero que apreciamos es que la producción industrial se dispara motivada e incentivada por el consumismo que dinamiza la economía. Pero pese a haber activado medidas tecnológicas muy avanzadas para contener la contaminación y mejorar la eficiencia energética, la inercia de la maquinaria industrial y la producción agrícola elevan la contaminación persistente hasta más del doble que en el escenario 10 y no se consigue detener hasta el 2035. Esta contaminación provoca una caída en la producción de alimentos que no obstante no provoca caídas en la población, ya que su aumento si está contenido desde 1995. La gran abundancia de capital disponible en todos los sectores hace asumible el coste de limitar la contaminación, extraer recursos, el sistema de servicios, las tecnologías para producir alimentos etc. pero ya en el año 2100, los recursos no renovables descienden del 40% y la producción industrial y de servicios cae lentamente durante el siglo XXII y más rápidamente un siglo después. El mundo simulado en este escenario es un mundo en el que no se ha renunciado al crecimiento estacionario, es un mundo con mucha eficiencia energética, hipertecnológico con la población limitada desde finales del siglo XX, pero con unas ambiciones materiales de



consumo nunca satisfechas. Una estimación a tan larguísimo plazo no puede ser tenida en cuenta nunca desde el punto de vista cuantitativo, el w3 no se concibió para eso. En este escenario la enseñanza que podemos sacar es que el mundo empieza a dar síntomas de fatiga a partir del 2100 si no se decide un nivel limitado de consumo material.

3.3.14 Algunas posibilidades más del World3 no recogidas en los escenarios descritos

3.3.14.1 Vida media del capital industrial

En el subsistema industrial podemos alargar la vida media del capital industrial:

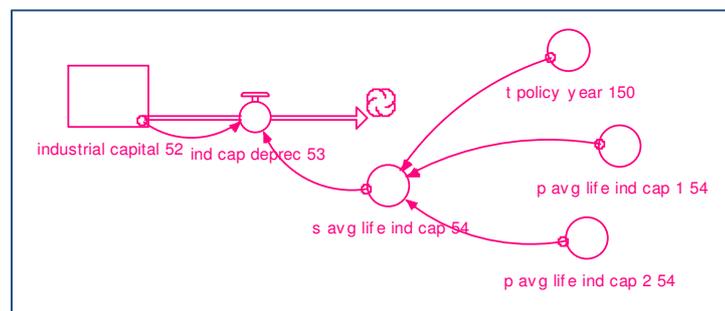


Figura 3.47.- Estructura para alargar la vida del capital industrial

La depreciación del capital industrial es igual $ind_cap_deprec_54$

ind cap deprec 54 = industrial_capital_52/s_avg_life_ind_cap_54
s avg life ind cap 54 =if (time > t_policy_year_150) then
 p_avg_life_ind_cap_2_54
 else
 p_avg_life_ind_cap_1_54

por defecto en el escenario principal. $p_avg_life_ind_cap$ 1 y 2 son igual a 14. Si deseamos aumentar la vida de este capital es decir, alargar su periodo de amortización, deberemos modificar $p_avg_life_ind_cap_2_54$ y aumentarlo. Así, al cambiar $t_policy_year_150$, cosa que se hace ya en el tercer escenario, podremos alargar la vida del capital aumentando $p_avg_life_ind_cap_2_54$. Veamos el efecto que produce si lo aumentamos un 50% y lo dejamos en 21. Vamos a partir del escenario 2, modificando $t_policy_year_150$ dejándolo en 1995. Es un parámetro muy sensible, pasemos de 14 a 15 y veamos los efectos:

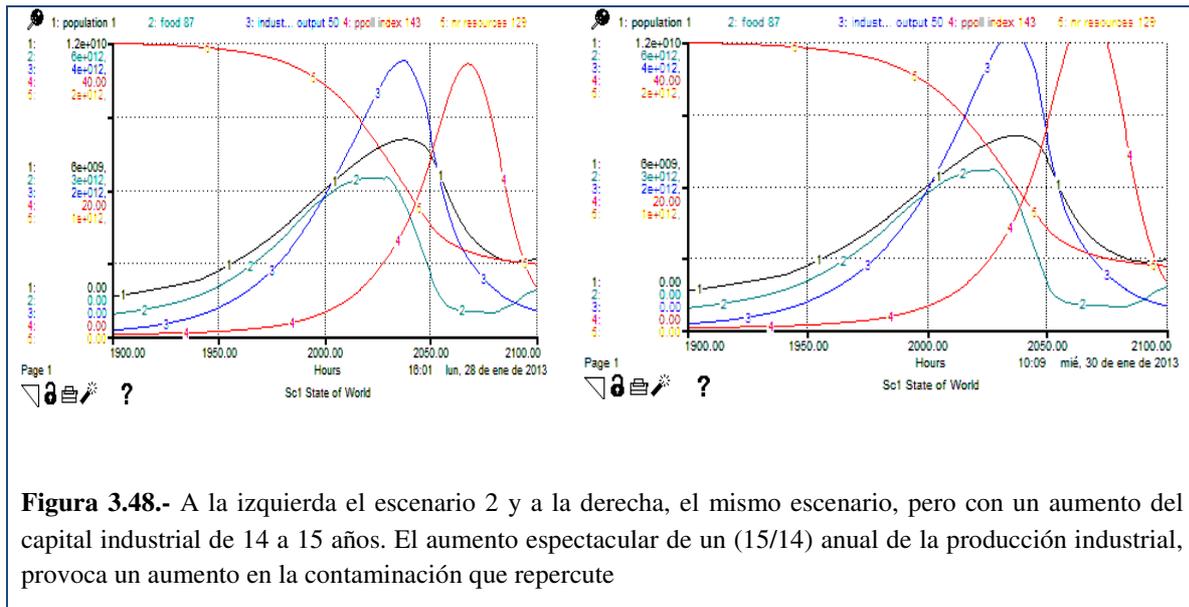


Figura 3.48.- A la izquierda el escenario 2 y a la derecha, el mismo escenario, pero con un aumento del capital industrial de 14 a 15 años. El aumento espectacular de un (15/14) anual de la producción industrial, provoca un aumento en la contaminación que repercute

3.3.14.2 Vida media del capital servicios

En el subsistema servicios podemos alargar la vida media del capital servicios:

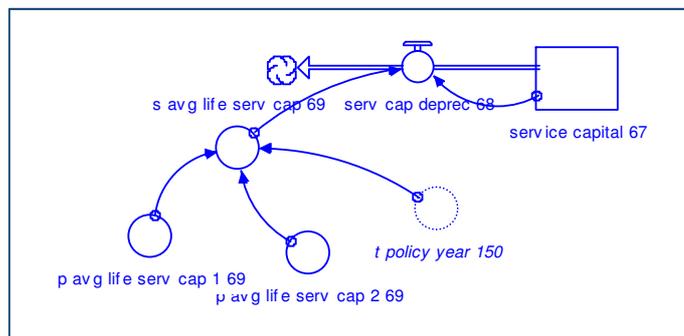


Figura 3.49.- Estructuras para alargar la vida media del capital de servicios.

La depreciación del capital servicios es igual $\text{serv_cap_deprec}_{69}$

$$\text{serv_cap_deprec}_{68} = \text{service_capital}_{67} / \text{s_avg_life_serv_cap}_{69}$$

$$\text{s_avg_life_serv_cap}_{69} = \text{if (time} > \text{t_policy_year}_{150}) \text{ then}$$

$$\text{p_avg_life_serv_cap}_{2_69}$$

else

$$\text{p_avg_life_serv_cap}_{1_69}$$

Hagamos el mismo experimento que en el punto anterior, partiendo del escenario2, vamos a aumentar la vida media del capital de servicios de 20 a 22, dejando igual todo lo demás.

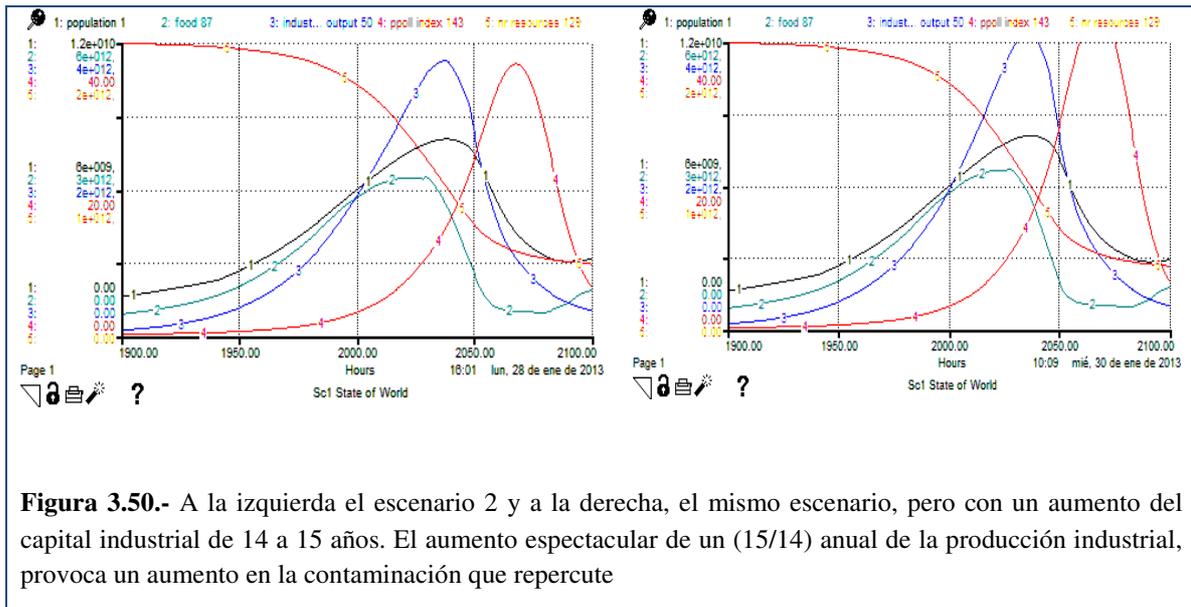


Figura 3.50.- A la izquierda el escenario 2 y a la derecha, el mismo escenario, pero con un aumento del capital industrial de 14 a 15 años. El aumento espectacular de un (15/14) anual de la producción industrial, provoca un aumento en la contaminación que repercute



3.3.14.3 Mejora de la eficiencia en la administración de servicios

En el subsistema social también podemos mejorar la eficiencia en la administración de los servicios a partir del año elegido en *t_policy_year*.

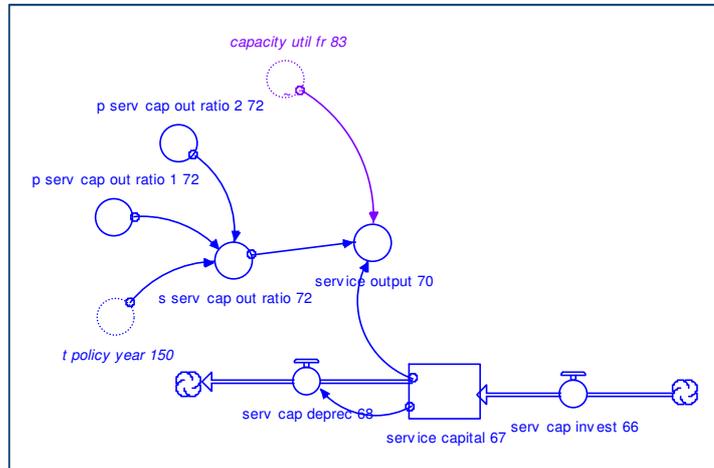


Figura 3.51.- Estructuras para mejorar la eficiencia en e servicios

La producción de servicios es función del capital servicios y de su eficiencia en la gestión así como de la disponibilidad de mano de obra según las siguientes ecuaciones:

$$\text{service output } 70 = (\text{service_capital_67} * \text{capacity_util_fr_83}) / \text{s_serv_cap_out_ratio_72}$$

Por tanto la producción de servicios se ve afectada por *s_serv_cap_out_ratio_72*:

$$\text{s_serv_cap_out_ratio_72} = \begin{cases} \text{p_serv_cap_out_ratio_2_72} & \text{If (time > t_policy_year_150) then} \\ \text{p_serv_cap_out_ratio_1_72,} & \text{else} \end{cases}$$

Tanto *p_serv_cap_out_ratio_1* como *2* están inicialmente igualados a 1, y dependen para entrar en juego de *t_policy_year*. Disminuyendo un 10% *p_serv_cap_out_ratio_2_72* podemos ver qué efectos produce. Utilizamos de base el escenario2, como hicimos en el experimento anterior.

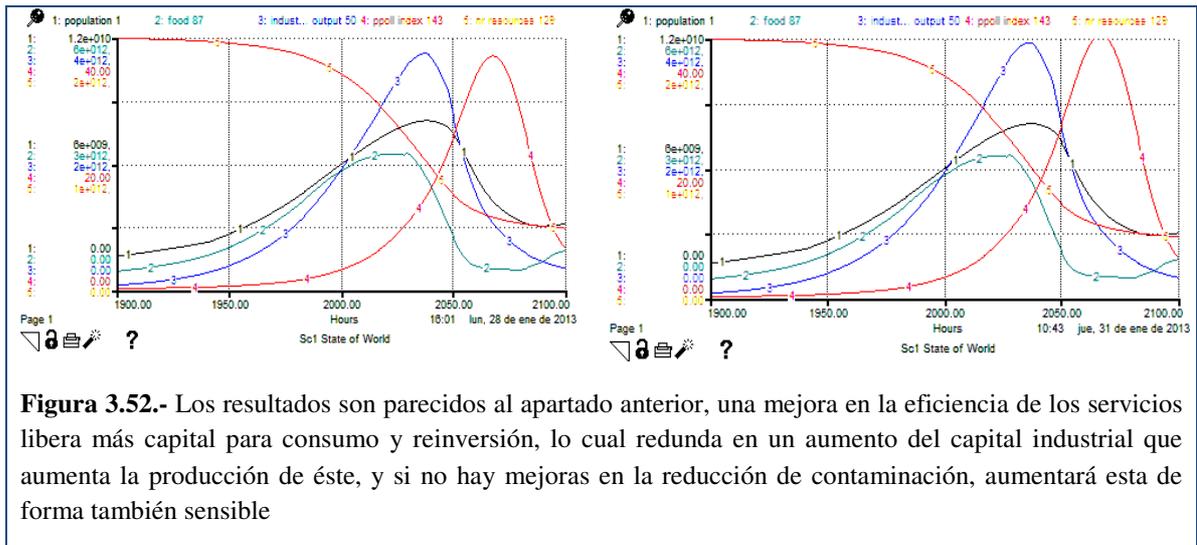


Figura 3.52.- Los resultados son parecidos al apartado anterior, una mejora en la eficiencia de los servicios libera más capital para consumo y reinversión, lo cual redundará en un aumento del capital industrial que aumenta la producción de éste, y si no hay mejoras en la reducción de contaminación, aumentará esta de forma también sensible

3.3.14.4 Limitaciones más severas en la natalidad

Hay dos políticas más de aplicación en los lazos del world3: Una es la de un único hijo por familia y la otra es de difícil aplicación en la práctica, pero que está ahí para hacer experimentos. La primera se aplica desde `t_fert_cont_eff_time_45` y da paso a la opción 1 de `fert_cont_eff_45`

```
fert_cont_eff_45 = if (time > t_fert_cont_eff_time_45)
then 1
else
fert_cont_eff_table_45
```

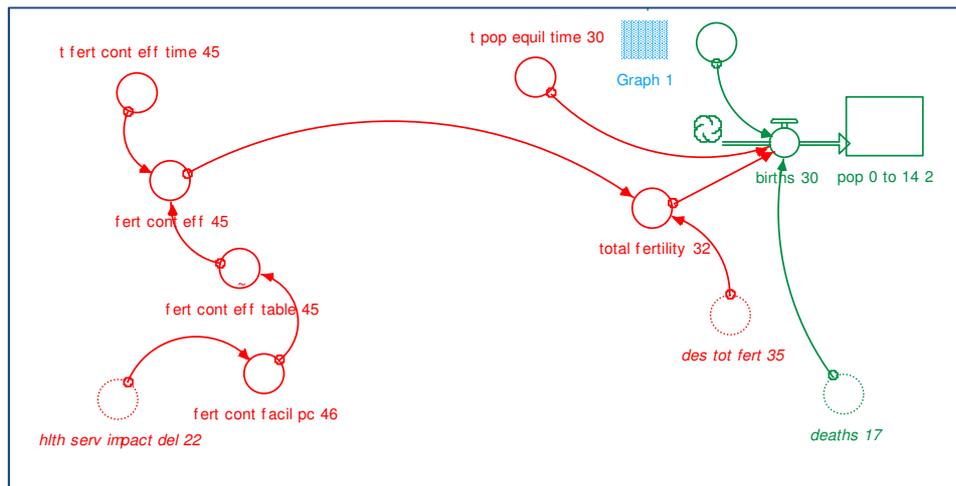


Figura 3.53.- El subsistema fertilidad nos da la opción de elegir sólo un hijo por familia

Veamos cómo trabaja `fert_cont_eff_table_45`

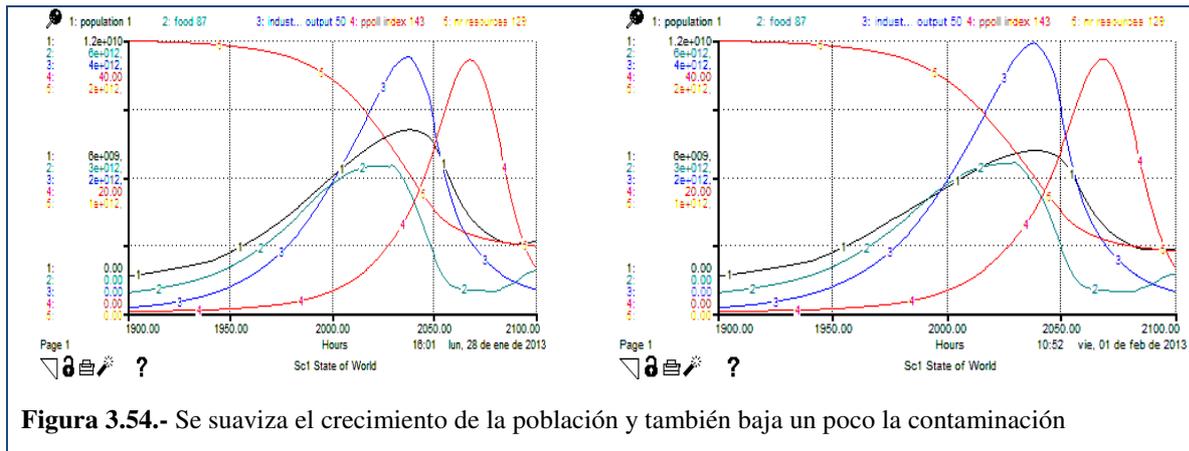


Figura 3.54.- Se suaviza el crecimiento de la población y también baja un poco la contaminación

Veamos ahora cómo actúa `t_pop_equil_time_30`, para ello hay que abrir `births_30` y ver qué hay dentro

```
births_30=if (time > t_pop_equil_time_30) then
deaths_17
```

```
ELSE
```

```
(total_fertility_32*pop_15_to_44_6*0.5/reproductive_lifetime_30)
```

O sea este lazo nos permite poner horizontal la función de población, veamos:

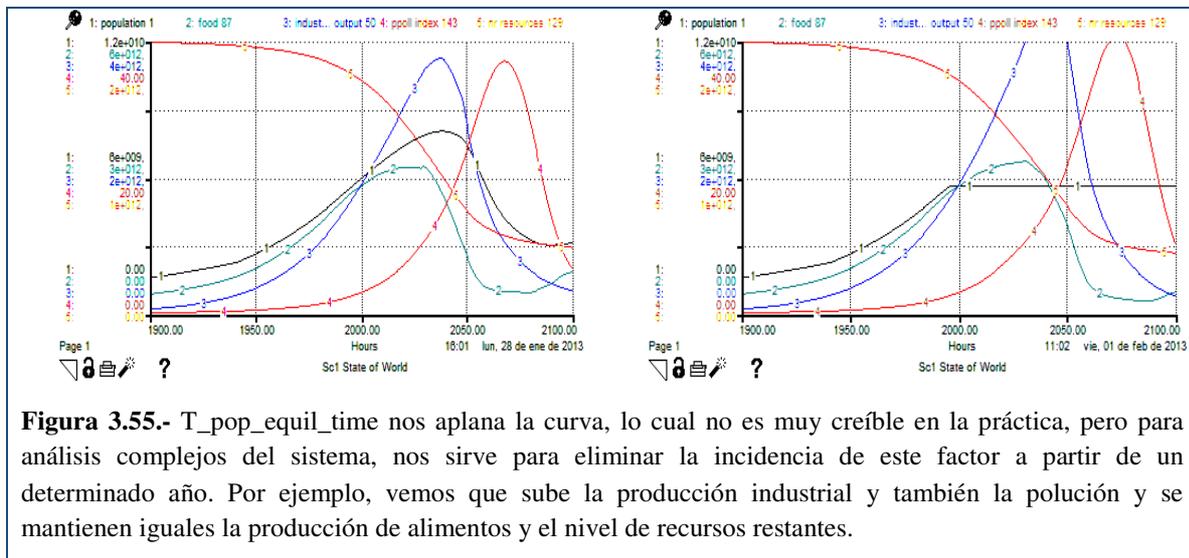


Figura 3.55.- `T_pop_equil_time` nos aplana la curva, lo cual no es muy creíble en la práctica, pero para análisis complejos del sistema, nos sirve para eliminar la incidencia de este factor a partir de un determinado año. Por ejemplo, vemos que sube la producción industrial y también la polución y se mantienen iguales la producción de alimentos y el nivel de recursos restantes.

3.3.14.5 Tecnologías de mejora del rendimiento de los insumos de la tierra

`T_policy_year` abre paso a `p_avg_life Agr_imp_2`, según el contenido de `s_avg_life Agr_inp`:



```

s_avg_life_agr_inp =if (time > t_policy_year_150) then
p_avg_life_agr_inp_2_100
else
p_avg_life_agr_inp_1_100
    
```

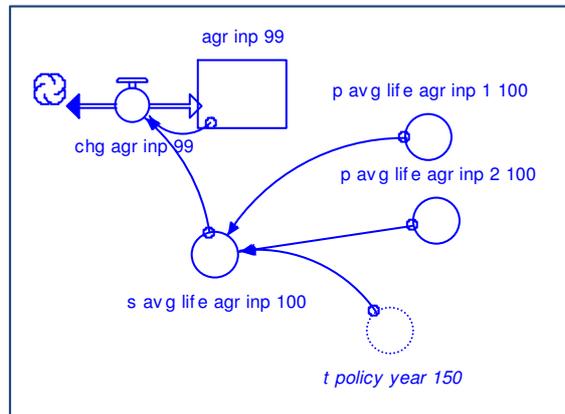


Figura 3.56.- Lazo del subsistema producción de alimentos que nos permite mejorar las tecnologías de los insumos agrícolas.

por defecto, ambos vienen igualados a 2, vamos a poner = 1 y veamos lo que pasa:

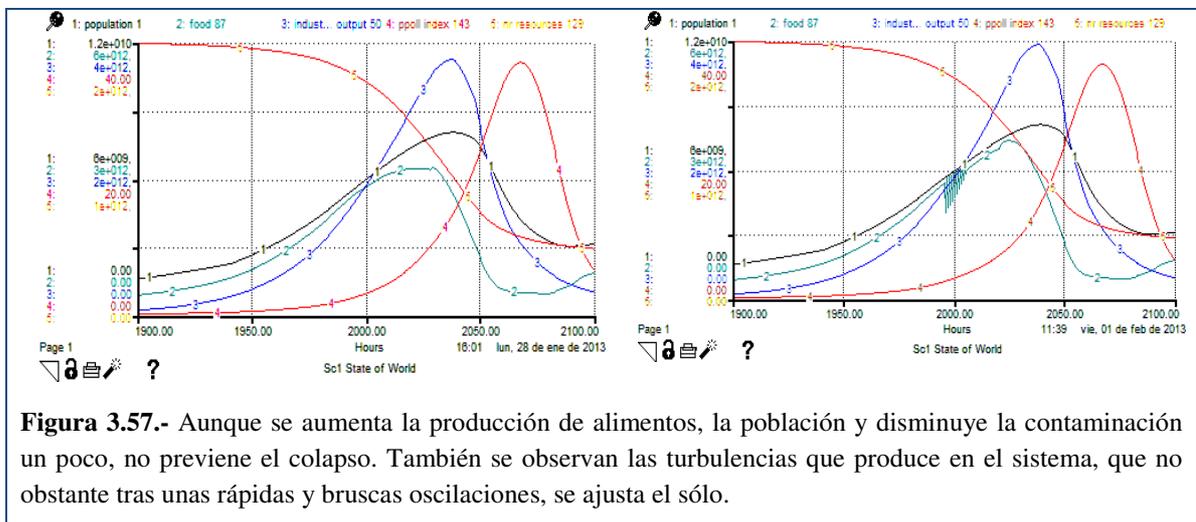


Figura 3.57.- Aunque se aumenta la producción de alimentos, la población y disminuye la contaminación un poco, no previene el colapso. También se observan las turbulencias que produce en el sistema, que no obstante tras unas rápidas y bruscas oscilaciones, se ajusta el sólo.



3.4 CONCLUSIONES DE LOS ESCENARIOS

Presentamos a continuación una tabla para explicar cómo modificar el World3-03 para trazar los 13 escenarios y otros que hemos desarrollado nosotros. Los autores del World3 van construyendo los escenarios del 2 al 6 basándose en el escenario anterior modificando una o varias estructuras cada vez. Las medidas que se introducen en estos escenarios son puramente tecnológicas. En el escenario7 cambian el tiempo de implementación de todas las políticas de los escenarios 2 a 6. En los escenarios 8 y 9 parten del escenario 2 y modifican primero la fertilidad y luego la limitación consciente y voluntaria de los niveles de consumo. Son escenarios en los que lo que cambia son los valores de la población, que busca el fin del crecimiento, pero no se introducen cambios tecnológicos. Se parte del escenario 2 que presupone que los recursos no renovables se multiplican por 2 debido a los nuevos descubrimientos. En el escenario 10 se agrupan todas las políticas, las tecnológicas y las decrecentistas. En el escenario 11 se cambia el año de introducción de las políticas de 1995 a 1975 y en el 12 de 1995 al 2015. En el escenario 13 se parte de las políticas cambiadas en 1975 pero aumentando el nivel de renta deseada de 350 dólares por persona y mes a 700.

Nosotros hemos añadido 5 escenarios más en los que se modifican además, partiendo del escenario 2 otras estructuras que presenta el World3 pero que no se ven afectadas en ninguno de los escenarios que trabajan ellos.

Para describir los procedimientos necesarios para crear los escenarios de los autores y los nuestros, presentamos la tabla 3.1. En esta tabla, las filas representan los escenarios y 7 columnas que tiene representa cada una lo siguiente:

- **Escenario:** Representa el escenario que estamos intentando reproducir.
- **Escenario base:** Representa el escenario del que se parte.
- **Subsistema:** Son los subsistemas que se han de modificar para conseguir el escenario.
- **Año de cambio:** Es el año a partir del cual, se modifican las políticas.
- **Variable o función a modificar:** Es la estructura del subsistema en cuestión que hay que modificar.
- **Valor en escenario1:** Valor que viene en el escenario1, el que viene en el World3-03 distribuido por los autores y que vamos modificando para crear los nuevos escenarios.
- **Nuevo valor:** El valor que proponen los autores para crear ese escenario. Hasta el escenario 13, son los valores que proponen los autores, y a partir de ese escenario, los que proponemos nosotros.

Veamos la tabla 3.1 a continuación.

Escenario	Escenario base	Subsistema	Año de cambio	Variable o función a modificar	Valor en escenario1	Nuevo valor
Escenario1						
Escenario2	Escenario1	Recursos	1900	nr_resources_129	1e12	2e12



Escenario3	Escenario2	Contaminación	1995	p_ppoll_tech_chg_mlt_POLGFM t_policy_year	0 4000	-0.03 1995
Escenario4	Escenario3	Escenario3 + Alimentos	1995	p_yield_tech_chg_mlt_LYCM	0	0.02
Escenario5	Escenario4	Escenario4 + Alimentos	1995	t_air_poll_time t_land_life_time	4000 4000	1995 1995
Escenario6	Escenario5	Escenario5 + Recursos	1995	p_res_tech_chg_mlt_NRCM t_fcaor_time	0 4000	-0.03 1995
Escenario7	Escenario6	Todos los de Escenario6	1995	Tech_dev_del_TDD	20	5
Escenario8	Escenario2	Fertilidad	1995	des_compl_fam_size_38 t_zero_pop_grow_time	Calculado 4000	2 1995
Escenario9	Escenario8	Industria	1995	ind_out_pc_des_59 t_ind_equil_time	400 4000	350 1995
Escenario10	Escenario6 + Escenario8	Todos los de Escenario6 y Escenario 9	1995			
Escenario11	Escenario10	Todos los de Escenario 10	1975	t_policy_year, t_land_life_time, t_fcaor_time, t_zero_pop_grow_time, t_ind_equil_time	4000	1975
Escenario12	Escenario10	Todos los de Escenario 10	2015	t_policy_year, t_land_life_time t_fcaor_time, t_zero_pop_grow_time, t_ind_equil_time	4000	2015
Escenario13	Escenario10	Todos los de Escenario 10	1975	t_policy_year, t_land_life_time, t_fcaor_time, t_zero_pop_grow_time, t_ind_equil_time, ind_out_pc_des_59	4000 400	1975 700
Vida media del capital industrial	Escenario2	Sector Industrial	1995	t_policy_year p_avg_life_ind_cap_2_54	4000 14	1995 15
Vida media del capital	Escenario2	Sector Servicios	1995	t_policy_year	4000	1995



servicios				p_avg_life_serv_cap_2_69	20	22
Eficiencia en la gestión de servicios	Escenario2	Sector Servicios	1995	t_policy_year	4000	1995
				p_serv_cap_out_ratio_2_72	1	0,9
Políticas más restrictivas de natalidad	Escenario2	Fertilidad	1995	t_pop_equil_time	4000	1995
				t_fert_cont_eff_time_45		
Mejora en el rendimiento de los insumos agrícolas	Escenario2	Alimentos	1995	t_policy_year	4000	1995
				p_avg_life_agr_inp_2_100	2	1

Tabla 3.1. Como modificar el World3-03 en Stella para conseguir los 13 escenarios que proponen los autores y otros que proponemos nosotros.



4. SIMULINK COMO POSIBILIDAD DE REPRESENTAR SISTEMAS DINÁMICOS. EL WORLD3 EN SIMULINK



ANÁLISIS AUTOMÁTICO DE MODELOS COMPLEJOS
UTILIZANDO HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA
ARTIFICIAL PARTIENDO DEL EJEMPLO DEL WORLD3





4.1 ¿QUÉ ES SIMULINK?

Simulink es una herramienta interactiva para modelar, simular y analizar sistemas dinámicos. Nos permite construir diagramas de bloque gráficos, evaluar el rendimiento del sistema y refinar sus diseños. Como una extensión de Matlab, Simulink añade muchas características específicas a los sistemas dinámicos, mientras conserva toda la funcionalidad del propósito general de Matlab. Así Simulink no es completamente un programa separado de Matlab, sino un anexo a él. El ambiente de Matlab está siempre disponible mientras se ejecuta una simulación en Simulink.

Simulink tiene dos fases de uso: la definición del modelo y el análisis del modelo. La definición del modelo significa construir el modelo a partir de elementos básicos contruidos previamente, tal como, integradores, bloques de ganancia o servomotores. El análisis del modelo significa realizar la simulación, linealización y determinar el punto de equilibrio de un modelo previamente definido.

Para simplificar la definición del modelo Simulink usa diferentes clases de ventanas llamadas ventanas de diagramas de bloques. En estas ventanas se puede crear y editar un modelo gráficamente usando el ratón. Simulink usa un ambiente gráfico lo que hace sencillo la creación de los modelos de sistemas. Después de definir un modelo este puede ser analizado seleccionando una opción desde los menús de Simulink o entrando comandos desde la línea de comandos de Matlab.

Simulink puede simular cualquier sistema que pueda ser definido por ecuaciones diferenciales continuas y ecuaciones en diferencias. Esto significa que se puede modelar sistemas continuos en el tiempo, discretos en el tiempo o sistemas híbridos. Simulink usa diagramas de bloques para representar sistemas dinámicos. Mediante una interfaz gráfica con el usuario se pueden arrastrar los componentes desde una librería de bloques existentes y luego interconectarlos mediante conectores y alambre.



4.2 CONSTRUIR UN MODELO EN SIMULINK

4.2.1 Ventanas y Menús en Simulink

Para comenzar SIMULINK, se debe arrancar primero MATLAB. En el indicador de MATLAB, se introduce la orden Simulink. El computador incluirá la ventana de órdenes de MATLAB y la ventana SIMULINK Block Library.

La ventana SIMULINK Block Library visualiza los íconos de sus bibliotecas de bloque. Construye modelos copiando bloques de la biblioteca de bloques en una ventana de modelo.

Cuando se ejecuta una simulación y se analizan sus resultados, se puede utilizar órdenes de MATLAB que se introducen desde la ventana de órdenes de MATLAB.

SIMULINK utiliza ventanas separadas para visualizar una biblioteca de bloques, un modelo o la salida de una simulación gráfica. Estas ventanas no son ventanas de figura de MATHALAB y no se pueden manipular utilizando las órdenes del entorno gráfico de MATLAB.

Los menús de SIMULINK aparecen cerca de la parte superior de cada ventana SIMULINK. Las órdenes del menú se aplican a los contenidos de esa ventana.

Un error frecuente de los nuevos usuarios de SIMULINK es comenzar una simulación mientras el SIMULINK Block Library es la ventana activa. Hay que asegurarse de que la ventana del modelo es la ventana activa antes de comenzar una simulación.

Para finalizar una sesión de SIMULINK se escoge Exit MATLAB en el menú File.

4.2.2 Construcción de un modelo

Esta sección analiza las tareas que se llevan a cabo durante la construcción de un modelo.

Para crear un nuevo modelo, se escoge la orden **New** en el menú **File**. Simulink crea una nueva ventana. Se puede mover la ventana de la misma forma que se hace con otras ventanas.

Para editar el diagrama de un modelo existente, se debe hacer una de las dos acciones siguientes:

- Escoger la orden **Open** en el menú **File** y especificar el archivo-M que describe el modelo que se desea editar.
- Introducir el nombre del modelo en la ventana de orden de Matlab.

Simulink crea una nueva ventana y visualiza ese modelo en la ventana.



4.2.3 Seleccionar objetos

Muchas acciones de edición y construcción de modelos requieren que primero se seleccione uno o más bloques y líneas (objetos).

4.2.1.1 Selección de un objeto

Para seleccionar un objeto, se sitúa el cursor encima del objeto y se pulsa el botón del ratón. Aparecen pequeñas asas en las esquinas del objeto. Por ejemplo, la figura que sigue muestra la selección de un bloque Sine Wave y de una línea:

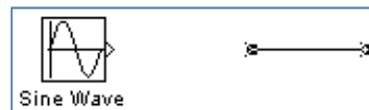


Figura 4.1.- Seleccionar un objeto

Cuando selecciona un objeto pulsando encima de él, cualquier otro que lo estuviera deja de estarlo.

4.2.1.2 Selección de más de un objeto

Puede seleccionar más de un objeto seleccionándolos uno a uno o todos a la vez si están próximos utilizando un recuadro que los englobe.

4.2.1.3 Selección de objetos de uno en uno

Para seleccionar más de un objeto, haciéndolo de uno en uno, se debe mantener pulsada la tecla Shift y pulsar sobre cada objeto que se desea seleccionar. Para desactivar la selección de un objeto que está seleccionado, se pulsa otra vez sobre el mismo mientras se mantiene pulsada la tecla Shift.

4.2.1.4 Selección de objetos utilizando un cuadro de delimitación

Una manera fácil de seleccionar más de un objeto en la misma área de la ventana es dibujar un cuadro de delimitación alrededor de los objetos. Para definir el cuadro de delimitación se debe hacer lo siguiente:

- Se define la esquina de comienzo de un cuadro de delimitación posicionando el puntero en un ángulo del cuadro, a continuación se pulsa el botón del ratón.

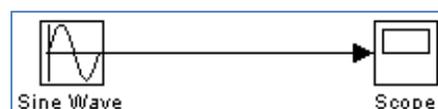


Figura 4.2.- Paso1 para seleccionar varios objetos

- Luego se arrastra el puntero al ángulo opuesto del cuadro.

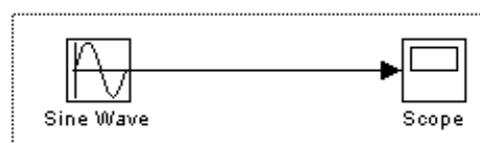


Figura 4.3.- Paso2 para seleccionar varios objetos



- Seguido se debe liberar el botón del ratón. Quedan seleccionados todos los bloques y líneas que están parcialmente encerrados por el cuadro de delimitación.

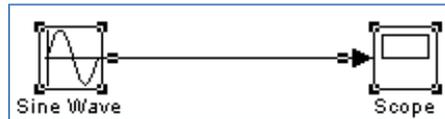


Figura 4.4.- Paso 3 para seleccionar varios objetos

4.2.4 Manipulación de bloques

- Se presentará cómo efectuar acciones útiles para construir modelos en los que intervienen bloques.
- Copiar y mover bloques de una ventana a otra
- Para copiar y mover bloques de una ventana a otra se deben hacer los siguientes pasos:
- Abrir la biblioteca de bloques apropiada o la ventana del modelo fuente.
- Arrastrar el bloque que se desea copiar en la ventana del modelo.
- También se puede copiar bloques utilizando Copy y Paste en el menú Edit mediante los siguientes pasos:
- Seleccionar el bloque que se desea copiar.
- Escoger Copy en el menú Edit.
- Seleccionar la ventana en el modelo de forma que sea la ventana activa.
- Escoger Paste en el menú Edit.
- Otra forma de copiar o mover bloques entre aplicaciones que sean compatibles, es empleando las órdenes Copy, Cut y Paste.
- Mover bloques en un modelo
- Para mover un solo bloque de un lugar a otro en una ventana de modelo, se debe seleccionar y arrastrar a una nueva posición.
- Para mover más de un bloque, incluyendo las líneas de conexión, se debe hacer lo siguiente:

4.2.4.1 Seleccionar los bloques y las líneas.

- Arrastrar los bloques y las líneas seleccionadas a sus nuevas posiciones y liberar el botón del ratón.
- Duplicar bloques en un modelo



La forma de duplicar bloques en un modelo depende del tipo de computador que se esté utilizando:

- **Windows:** mantener pulsada la tecla **Ctrl**, con el botón izquierdo del ratón seleccionar el bloque y arrastrarlo a una nueva localización. También se puede seleccionar el bloque pulsando el botón derecho del ratón mientras el puntero se encuentra sobre el bloque y lo arrastra a una nueva posición.
- **Macintosh:** mantener pulsada la tecla **Ctrl**, seleccionar el bloque y arrastrarlo a una nueva localización.

4.2.4.2 Especificación de los parámetros del bloque

Ciertos aspectos de una función de bloque se definen a través de sus parámetros. Se puede asignar valores a los parámetros de un bloque accediendo a su cuadro de diálogo. Haciendo doble clic, al bloque, se visualiza el cuadro de diálogo del bloque, que lista los parámetros y sus valores actuales. Se puede cambiar estos valores o aceptar los valores visualizados.

- **Suprimir bloques**

Para suprimir uno o más bloques, se debe seleccionar y pulsar la tecla **Delete** o escoger del menú **Edit** la opción **Clear** o **Cut**. La orden **Cut** escribe el bloque o los bloques en el portapapeles dejándolos disponibles para que se puedan pegar en un modelo. La utilización de la tecla **Delete** o la orden **Clear** no afecta a los contenidos del portapapeles.

- **Desconectar bloques**

Para desconectar un bloque del modelo sin suprimirlo, se debe mantener pulsada la tecla **Shift** y seleccionar y arrastrar el bloque desde su posición original en el modelo.

- **Cambiar la orientación de los bloques**

Hay varias órdenes que permiten cambiar la orientación de un bloque, éstas son:

- ✓ La orden **Rotate** en el menú **Options** gira un bloque 90° en el sentido de las agujas de un reloj.
- ✓ La orden **Flip Horizontal** (sistema Windows) o la orden **Flip** (sistema Macintosh) en el menú **Options** gira el bloque 180°.
- ✓ La orden **Orientation** en el menú **Style** le permite seleccionar la orientación del bloque **Left to Right, Right to Left, Up o Down**.

En la siguiente figura SIMULINK ordena los puertos después de cambiar la orientación de un bloque utilizando las órdenes **Rotate** y **Flip**. Los textos en los bloques indican su orientación.

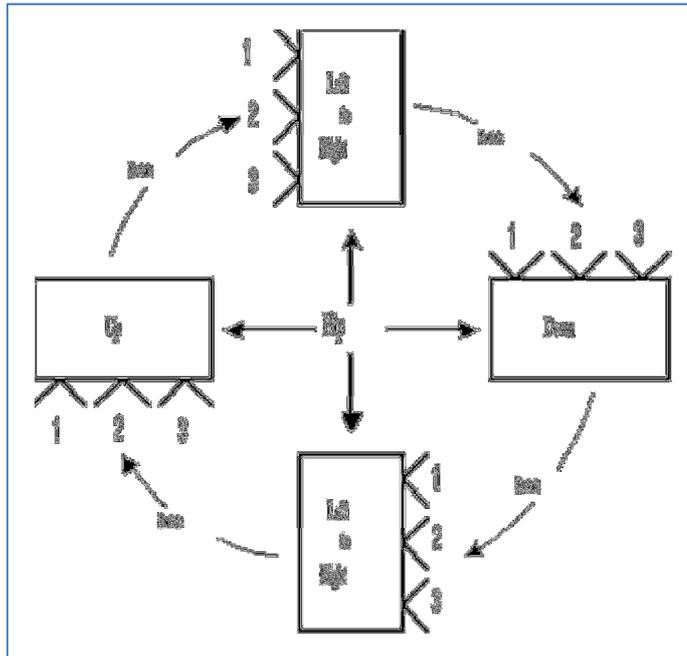


Figura 4.5.- Rotación de bloques

- **Redimensionar los bloques**

Para cambiar el tamaño de un bloque, se debe seleccionar y arrastrar cualquiera de sus asaderas de selección. El tamaño mínimo de un bloque es de cinco por cinco pixels. El tamaño máximo está limitado por el tamaño de la ventana. La forma del cursor refleja la esquina y la dirección en la que se está siendo arrastrada. Mientras el bloque está siendo redimensionado, un rectángulo punteado muestra el tamaño propuesto.

- **Manipulación de los nombres de los bloques**

Los nombres de bloques en un modelo deben ser únicos y deben contener al menos un carácter. Estos nombres aparecen debajo de los bloques si los puertos están en los laterales y a la derecha de los bloques si están en la parte superior o inferior. Puede cambiar los nombres de los bloques y sus localizaciones.

- **Cambiar los nombres de los bloques**

Se puede editar los nombres de los bloques de una de las tres formas:

- ✓ Seleccionando el recuadro en el que se visualiza el nombre e introduciendo el nuevo.
- ✓ Colocando el punto de inserción en el nombre e introduciendo el nuevo texto.
- ✓ Arrastrando el ratón para seleccionar el trozo de texto a reemplazar e introduciendo el nuevo texto.

Cuando se pulsa el puntero sobre otro bloque o se realiza cualquier otra acción, el nombre se acepta o se rechaza. Si intenta modificar el nombre de un bloque a un nombre que ya existe o a uno que no tiene caracteres, se visualiza un mensaje de error.



También se puede modificar las fuentes utilizadas en los nombres de los bloques seleccionando el bloque o los bloques y escogiendo un tipo fuente del submenú **Fonts** que está en el menú **Style**.

- **Cambiar la localización de un nombre de bloque**

Se puede cambiar la localización del nombre de un bloque eligiendo la opción **Title** que está en el menú **Style**:

- ✓ **Displayed**, visualiza el nombre.
- ✓ **Hidden**, no visualiza el nombre.
- ✓ **Top/Left** coloca el nombre encima del bloque cuando su orientación en *Left to Right* o *Right to Left* o a la izquierda del bloque cuando su orientación es *Up o Down*.
- ✓ **Bottom/Right**, coloca el nombre debajo del bloque cuando su orientación es *Left to Right* o *Right to Left* o a la derecha del bloque cuando su orientación es *Up o Down*.
- ✓ Por ejemplo en la figura se muestra la posición de los nombres de bloque Top/Left.

- **Vectorización de los bloques**

Casi todos los bloques incorporados aceptan entradas escalares o vectoriales y le permiten especificar parámetros de uno u otro tipo.

Para determinar qué líneas en un modelo llevan señales vectoriales, se elige la opción **Wide Vector Lines** en el menú **Style**, luego se dibuja las líneas que llevan vectores más gruesas que las que contienen escalares.

Después de elegir esta opción y si ha cambiado el modelo, se debe actualizar explícitamente la visualización seleccionando la opción **Update Diagram** en el menú **Style**. Para comenzar la simulación también actualiza la visualización.

- **Expansión escalar de entradas y parámetros**

La expansión escalar es la conversión de un valor escalar en un vector de elementos idénticos. Se puede aplicar la expansión escalar a las entradas y parámetros de bloques.

- ✓ **Entradas:** cuando se utilizan bloques que poseen más de un puerto de entrada, puede mezclar entradas vectoriales y escalares. Las entradas escalares se expanden en vectores que tienen la misma longitud que las entradas vectoriales. Por ejemplo, el bloque Sum muestra el resultado de expandir una entrada escalar para que concuerde el tamaño de una entrada vectorial al bloque.
- ✓ **Parámetros:** se puede especificar los parámetros para bloques vectorizados como vectores o como escalares. Cuando se especifica parámetros, cada elemento se asocia con el vector de entrada correspondiente. Cuando se especifica parámetros escalares, se aplica la expansión escalar para convertirlos automáticamente en vectores del tamaño adecuado. Por ejemplo, la figura muestra el parámetro escalar (Gain) se expande para coincidir con el tamaño de la entrada al bloque, un vector de tres elementos.



4.2.5 Manipulación de líneas

Las líneas conectan la salida de un bloque a la entrada de otro bloque. Las líneas también conectan otras líneas a la entrada de un bloque. Pueden conectarse cualquier número de líneas a un puerto de salida, pero solamente se puede conectar una línea a cada puerto de entrada. (El bloque MUX es útil para combinar algunas líneas en una única línea vectorial).

4.2.5.1 Dibujar líneas entre bloques

- Posicionar el cursor sobre el puerto de salida del primer bloque. No es necesario posicionar el cursor de forma precisa sobre el puerto.

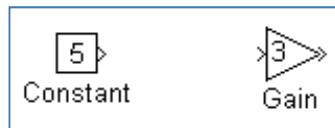


Figura 4.6.- Paso 1 para dibujar líneas entre bloques

- Presionar y mantener pulsado el botón del ratón. El cursor cambia a una forma de cruz.



Figura 4.7.- Paso 2 para dibujar líneas entre bloques

- Arrastrar el puntero al puerto de entrada del segundo bloque. Se puede posicionar el cursor sobre o cerca del puerto o dentro del bloque. Si se coloca el cursor en el bloque, la línea se conecta al primer puerto de entrada disponible. Para conectar la línea a un puerto específico, se debe posicionar el cursor sobre ese puerto antes de soltar el botón del ratón.

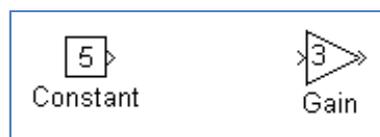


Figura 4.8.- Paso 3 para dibujar líneas entre bloques

- Soltar el botón del ratón. SIMULINK sustituye los símbolos de los puertos por una línea de conexión con una flecha que muestra la dirección del flujo de señal. Se puede crear líneas de conexión o desde la salida a la entrada o desde la entrada a la salida. En cualquier de los dos casos, la flecha se dibuja en el puerto de entrada apropiado y la señal es la misma.



Figura 4.9.- Paso 4 para dibujar líneas entre bloques



4.2.5.2 Encaminamiento de líneas alrededor de bloques

SIMULINK encamina automáticamente las líneas alrededor de los bloques en lugar de pasar a través de ellos. Sin embargo, se le puede indicar a SIMULINK que dibuje una línea exactamente como se desee, manteniendo pulsada la tecla SHIFT mientras se dibuja la línea, dibujando la línea del puerto de entrada al puerto de salida o dibujando una secuencia de segmentos de líneas.

La opción **Reroute Lines** es útil para limpiar zonas muy pobladas del diagrama de bloques. Utilizando el cuadro de delimitación, se selecciona un área del modelo y se escoge **Reroute Lines** en el menú **Options**.

- **Dibujar líneas desde otras líneas**

Se puede añadir una línea que comience en cualquier punto de una línea existente. Ambas líneas transportan la misma señal a sus salidas.

Por ejemplo, en la siguiente figura el diagrama de bloque del lado izquierdo muestra una única línea que va desde el bloque **Product** al bloque **Scope**. El diagrama detallado derecho muestra una línea adicional que va desde el bloque **Product** al bloque **To Workspace**. La misma señal va a cada bloque.

Para añadir una línea desde otra línea, se deben seguir estos pasos.

- ✓ Colocar el puntero en la línea donde se desea comenzar la nueva línea.
- ✓ Mientras se mantiene pulsada la tecla Ctrl., pulsar y mantener presionado el botón del ratón.
- ✓ Arrastrar el puntero al puerto destino y soltar el botón del ratón y la tecla Ctrl. SIMULINK crea una nueva línea entre los puntos de comienzo y finalización.

En el sistema Windows, se puede también utilizar el botón derecho del ratón en lugar de mantener pulsada la tecla **Ctrl** mientras se utiliza el botón izquierdo del ratón.

- **Dibujar un segmento de línea**

Para dibujar un segmento de línea, se dibuja una línea que finaliza en una zona no ocupada del diagrama. Aparece una flecha en el final no conectado de la línea. Para añadir otro segmento de línea, se pulsa el botón del ratón mientras el puntero está sobre la flecha y luego repetir el procedimiento.

Se puede utilizar esta técnica para dibujar una línea con segmentos exactamente donde se desee o para dibujar líneas antes de copiar bloques a los cuales se conectan las líneas. Cuando se comienza una simulación, SIMULINK proporciona un mensaje de aviso si el modelo tiene algunas líneas que no están conectadas.

La figura que se muestra a continuación tiene un segmento de línea sin conectar.

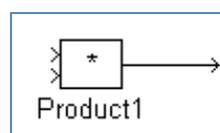




Figura 4.10.- Dibujar un segmento de línea

- **Ángulos de líneas**

SIMULINK dibuja líneas de conexión en múltiplos de 45 grados con estas excepciones:

- ✓ Si el puntero se mueve cerca de un puerto que está disponible, la línea se conecta a ese puerto.
- ✓ Si se crea una línea mientras se mantiene pulsada la tecla **Shift**, SIMULINK dibuja la línea tal como la crea.
- ✓ Si se crea una línea moviendo el puntero sobre el bloque y se suelta, la línea va al puerto no usado en el bloque que está más arriba o más a la izquierda.

- **Suprimir líneas**

Para suprimir una o más líneas, se selecciona la línea o líneas que se van a eliminar y se pulsa la tecla **Delete** o se escoge **Clear** o **Cut** en el menú **Edit**

- **Mover segmentos de línea**

Para mover un segmento de línea se deben seguir estos pasos:

- Posicionar el puntero sobre el segmento

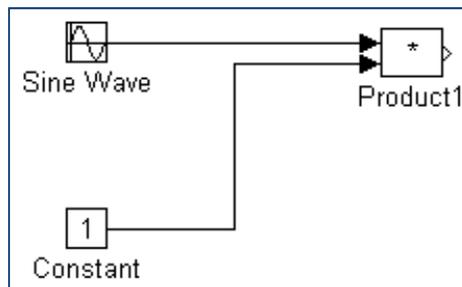


Figura 4.11.- Paso 1 para mover segmento de línea

- Pulsar el botón del ratón y mantenerlo así

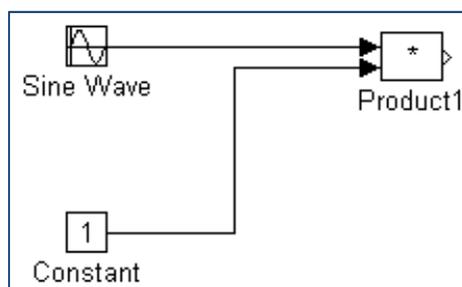


Figura 4.12.- Paso 2 para mover segmento de línea

- Arrastrar el puntero a la posición deseada

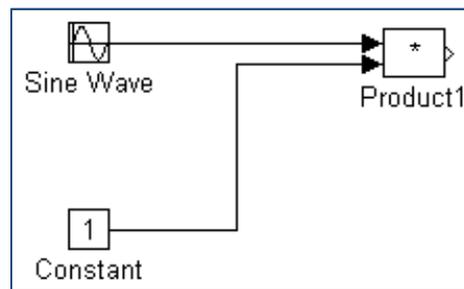


Figura 4.13.- Paso 3 para mover segmento de línea

- Soltar el botón del ratón

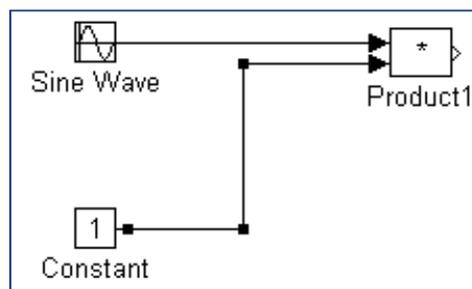


Figura 4.14.- Paso 4 para mover segmento de línea

No se pueden mover los segmentos conectados directamente a los puertos de los bloques.

- **Mover vértices**

Para mover un vértice de una línea, se debe posicionar el puntero sobre el vértice, pulsar y manteniendo así el botón del ratón, se arrastra el puntero a la posición deseada y se suelta el botón del ratón. No se puede mover los vértices que están en los extremos de la línea.

La figura que sigue muestra la forma del cursor y el movimiento del vértice cuando se arrastra. Se puede arrastrar el vértice en cualquier dirección

- **Dividir una línea en segmentos**

Se puede dividir una línea en dos segmentos (o un segmento de línea en dos segmentos), dejando los extremos de la línea en sus posiciones originales. SIMULINK crea segmentos de línea y un vértice que los une. Para dividir una línea en segmentos, se deben seguir estos pasos:

- Colocar el puntero sobre la línea donde se desea el vértice.



Figura 4.15.- Paso 1 para dividir una línea en segmentos



- Mientras se mantiene pulsada la tecla **Shift**, pulsar y mantener presionado el botón del ratón.

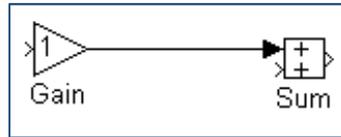


Figura 4.16.- Paso 2 para dividir una línea en segmentos

- Arrastrar el puntero a la posición deseada.

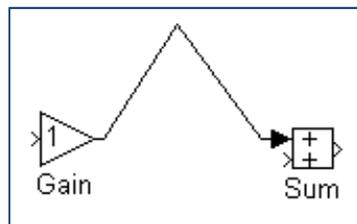


Figura 4.17.- Paso 3 para dividir una línea en segmentos

- Soltar el botón del ratón y la tecla **Shift**.

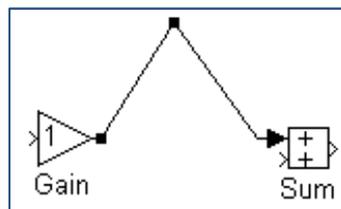


Figura 4.18.- Paso 4 para dividir una línea en segmentos

4.2.6 Resumen de las acciones del ratón y del teclado

Acciones de Construcción del modelo	Windows
Seleccionar objetos	Botón izquierdo del ratón
Seleccionar más de un objeto	Shift + botón izquierdo del ratón
Copiar objetos de otras ventanas	Seleccionar el objeto y arrastrar



Duplicar objeto	Option + Botón izquierdo del ratón y arrastrar; o Botón derecho del ratón y arrastrar
Mover objeto	Seleccionar el objeto y arrastrar
Conectar bloques	Botón izquierdo del ratón
Desconectar bloques	Shift + arrastrar bloque
Encaminar líneas desde otra línea	Shift + dibujar líneas
Dibujar líneas desde otra línea	Ctrl + arrastrar línea
Mover segmento de línea	Seleccionar segmento y arrastrar
Mover vértice	Seleccionar vértice y arrastrar
Dividir líneas en segmentos	Shift + arrastrar líneas

4.2.7 Añadir anotaciones de texto al diagrama del modelo

Posicionando el puntero donde se desea colocar el texto, luego pulsar el botón del ratón y por último escribir el texto.

- El texto debe ser único en el modelo; y puede ser utilizada para fechar el modelo y etiquetar las líneas.
- Para modificar las fuentes de texto, se debe seleccionar mediante un cuadro de delimitación y posteriormente, se escoge la fuente del submenú **Fonts**, que está accesible en el menú **Style**.



4.3 CREAR SUBSISTEMAS

Los subsistemas son usados cuando nuestro modelo se hace complicado, ya que aumenta de tamaño y complejidad. El agrupamiento es útil por una serie de razones:

- Ayuda a reducir el número de bloques visualizados.
- Permite mantener juntos los bloques que están funcionalmente relacionados.
- Hace posible establecer un diagrama de bloques jerárquico.

Se pueden crear los subsistemas de dos maneras:

- ✓ Añadiendo un bloque **Subsystem** al modelo, y luego añadiendo los bloques que contiene.
- ✓ Añadiendo los bloques que constituyen el subsistema y posteriormente agrupándolos.

Para crear un subsistema antes de añadir los bloques que contiene, se debe insertar un bloque **Subsystem** y crear los bloques que constituyen el subsistema de la forma siguiente:

- ✓ Copiar el bloque **Subsystem** de la biblioteca **Connections** del modelo.
- ✓ Abrir el bloque **subsystem** (doble clic).
- ✓ En la ventana nueva del bloque **Subsystem**, crear el correspondiente subsistema. Utilizar bloques **Inport** para representar las entradas que vienen desde fuera del subsistema y bloques **Output** para las salidas externas. Por ejemplo, el bloque Sum que se muestra a continuación es el único bloque de un subsistema. El diagrama representa el bloque y sus bloques Inport y Outport asociados:

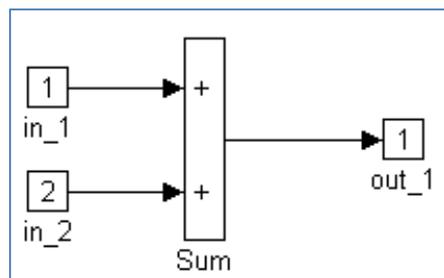


Figura 4.19.- Conectar subsistemas.

Una vez creados los bloques que se desea convertir en un subsistema, se debe hacerlo siguiente:

- Encierre los bloques y líneas de conexión que desea incluir dentro del subsistema mediante un cuadro de delimitación. Por ejemplo, la figura que viene a continuación muestra un modelo que representa un contador. Los bloques Sum y Delay se seleccionan dentro de un cuadro de delimitación:

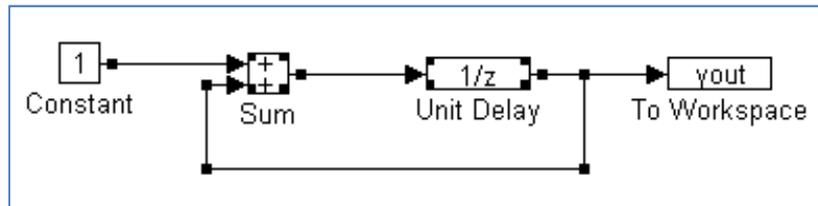


Figura 4.20.- Seleccionar elementos de un subsistema.

Cuando se suelta el botón del ratón, se seleccionan los bloques y todas las líneas de conexión.

□ Escoger **Options**, luego **Group**. SIMULINK reemplaza los bloques que están en el grupo por un único bloque **subsystem**. La figura muestra el modelo después de escoger la orden **Group**:

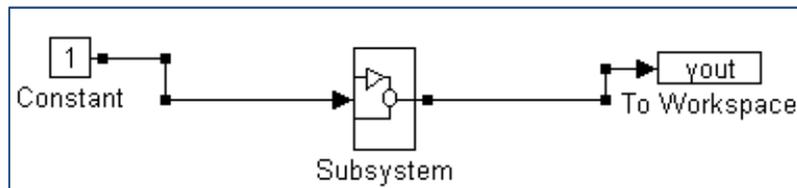


Figura 4.21.- Agrupar elementos seleccionados en un subsistema.



4.4 MODELAR ECUACIONES

Uno de los temas más confusos para los nuevos usuarios de SIMULINK es cómo modelar ecuaciones. Algunos ejemplos ayudarán a comprender cómo modelarlas.

□ Conversión de grados centígrados en Fahrenheit

Modelemos la ecuación que convierte grados centígrados a grados Fahrenheit:

En primer lugar, consideremos los bloques que se necesitan para construir el modelo:

- Un bloque Gain de la biblioteca Linear, para multiplicar la señal de entrada por $9/5$
- Un bloque Constant de la biblioteca Sources, para definir una constante de 32
- Un bloque Sum de la biblioteca Linear, para sumar las dos cantidades
- Un bloque Sine Wave de la biblioteca Sources, para introducir la señal
- Un bloque Scope de la biblioteca Sinks, para visualizar la salida

A continuación, reúna los bloques en la ventana de su modelo:

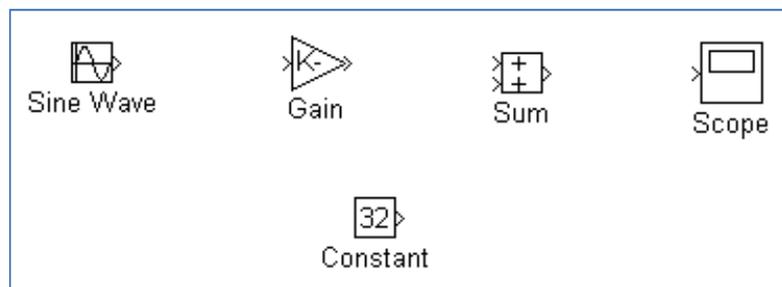


Figura 4.22.- Ejemplo de creación de subsistemas. Paso 1.

Se asignan valores a los bloques Gain y Constant abriendo cada uno de ellos (mediante una doble pulsación) e introduciendo los valores apropiados. Luego, pulsar el botón OK. Ajustar la amplitud del bloque Sine Wave a 10 para conseguir una mayor variación de temperatura. Ahora, se debe conectar los bloques.

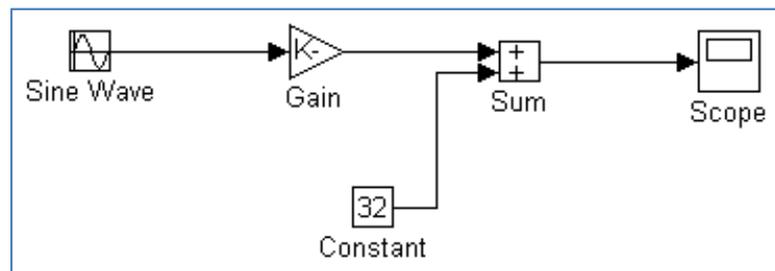


Figura 4.23.- Ejemplo de creación de subsistemas. Paso 2.

El bloque Sine Wave representa la temperatura en grados centígrados. El bloque Gain genera 915(Tc). Ese valor se suma a la constante 32 mediante el bloque Sum. La salida de ese bloque es la temperatura en grados Fahrenheit. Se debe abrir el bloque Scope para visualizar la salida. Se debe fijar la escala horizontal en algún pequeño valor de tiempo, por ejemplo 10 segundos. Luego, fijar la escala vertical de forma que se pueda visualizar todas las salidas - al menos 50. Manténgase abierto el bloque Scope.

Se debe especificar los parámetros de simulación seleccionando **Parameters** en el menú **Simulation**. Especificar un tiempo de parada de 10 segundos y un tamaño de paso máximo de 0.1. Estos valores deberían ejecutar la simulación rápidamente. Ahora, se debe escoger **Start** en el menú **Simulation** para ejecutar la simulación.

□ **Modelar un sistema continuo sencillo**

Modelemos la siguiente ecuación diferencial:

$$\dot{x} = -2x + u$$

El bloque **Integrator** integra la entrada, dx/dt y produce x . Otros bloques necesitados en este modelo incluyen un bloque Gain y un bloque Sum. Para generar una onda cuadrada, se utiliza un bloque Signal Generator. Otra vez, se visualizará la salida empleando un bloque Scope. Se debe reunir los bloques y definir el valor de la ganancia del bloque Gain.

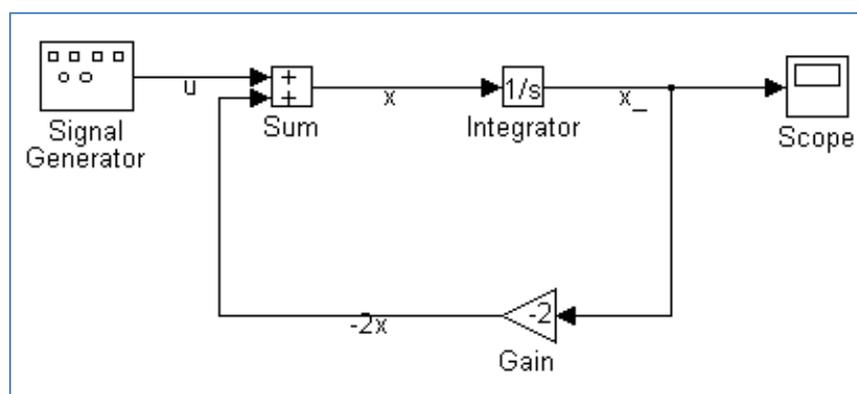


Figura 4.24.- Ejemplo 2 de creación de subsistemas.



En este modelo, para invertir la dirección del bloque Gain, se escoge **Flip Horizontal** en el menú **Options**. También, para crear la línea de la salida del bloque Integrator al bloque Gain se debe mantener pulsada la tecla **Ctrl** mientras se dibuja la línea. Posteriormente, conectar todos los bloques.

Un concepto importante en este modelo es el bucle que incluye al bloque Sum, al bloque Integrator y al bloque Gain. En esta ecuación, x_+ es la salida del bloque Integrator así como la entrada a los bloques que calculan x , sobre el cual se basa. Esta relación se implementa utilizando un bucle.

El bloque Scope visualiza x_+ en cada paso de tiempo. Para una simulación que dura 10 segundos y que el rango vertical del bloque Scope es de 1, la salida que resulta se muestra en la figura.

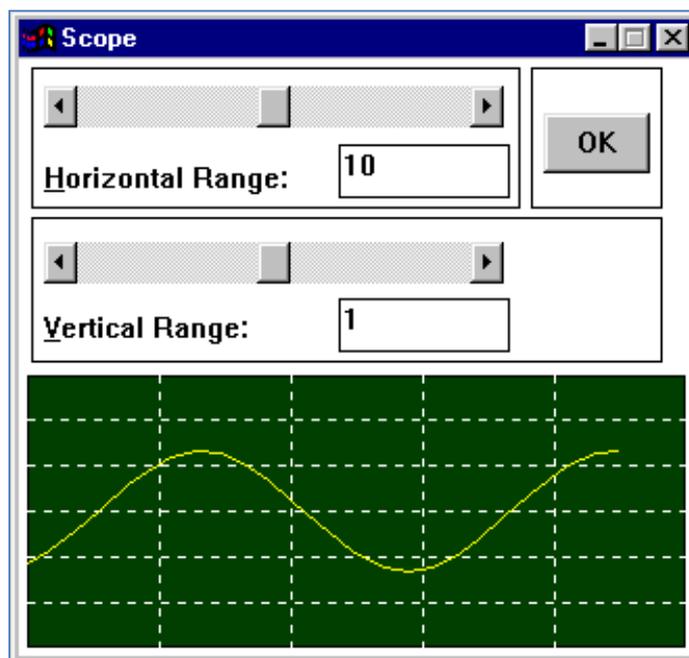


Figura 4.25.- Ejemplo bloque scope.

□ Un ejercicio de construcción de un modelo

Este ejemplo muestra cómo construir un modelo utilizando muchas de las órdenes y acciones que se utilizarán para desarrollar nuestros propios modelos.

El modelo genera una onda sinusoidal utilizando un bloque Signal Generator. Modifica una copia de la forma de onda pasándola a través de un bloque Gain. Ambas señales, la original y la modificada, se combinan en una señal vectorial empleando un bloque Mux. Esa señal se visualiza utilizando un bloque Scope y enviándola a una variable del espacio de trabajo. El diagrama de bloques del modelo tiene el siguiente aspecto:

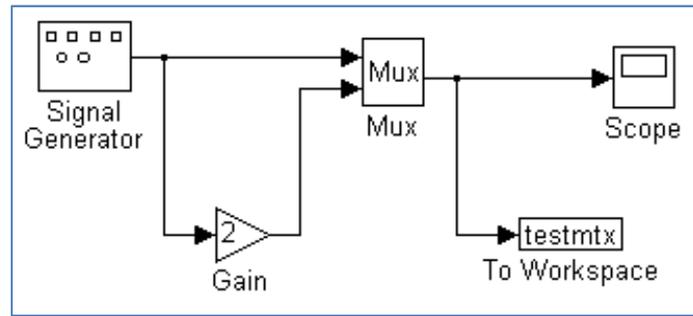


Figura 4.26.- Ejercicio de construcción de un modelo.

Los bloques utilizados en este modelo, se obtienen de las bibliotecas siguientes:

- Biblioteca Sources (para el bloque Signal Generator)
- Biblioteca Linear (para el bloque Gain)
- Biblioteca Connections (para el bloque Mux)
- Biblioteca Sinks (para los bloques Scope y To Workspace)

Primero, generar una nueva ventana de modelo seleccionando **New** en el menú **File**.

Segundo, Abrir la biblioteca Sources para copiar el bloque Signal Generator.

Para copiar un bloque desde la biblioteca de bloques, se arrastra dentro de la ventana del modelo. Para hacer esto, se posiciona el cursor sobre el bloque Signal Generator, a continuación se presiona el botón del ratón, manteniéndolo en esa posición. El cursor cambiará.

Después, se arrastra el bloque dentro de la ventana del modelo. Cuando se mueve el bloque, se puede observar que el recuadro del bloque y su nombre se mueven con el puntero.

Cuando el puntero se encuentre dentro de la ventana del modelo, se debe soltar el botón del ratón. Una copia del bloque Signal Generator se encontrará en la ventana del modelo.

De la misma forma, se deben copiar el resto de los bloques dentro de la ventana del modelo. Se puede mover un bloque, desde un lugar a otro dentro de la ventana del modelo, utilizando la misma técnica de arrastre que se empleó para copiar el bloque.

Cabe destacar que el bloque Mux tiene tres puertos de entradas pero sólo dos señales de entrada. Para ajustar el número de puertos de entrada, se debe abrir el bloque Mux dando un doble clic encima de él. SIMULINK visualiza su cuadro de diálogo. Cambia el valor del parámetro **Number of inputs** a 2, a continuación se pulsa el botón OK. SIMULINK ajusta el número de puertos de entrada.

Con todos los bloques ya copiados en la ventana del modelo, el modelo debería tener un aspecto parecido al siguiente:

Ahora se deben conectar los bloques. Si se examinan los íconos de los bloques, se verá un signo en forma de ángulo a la derecha del bloque Signal Generator y dos a la



izquierda del bloque Mux. El símbolo > apuntando hacia fuera de un bloque es un puerto de salida; si el símbolo apunta hacia el bloque es un puerto de entrada. Cuando los bloques se conectan, los símbolos del puerto desaparecen.

Puerto de salida

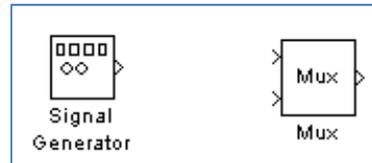


Figura 4.27.- Bloque mux 1

Puertos de entrada

A continuación se conecta el bloque Signal Generator al bloque Mux. Posicionando el puntero sobre el puerto de salida en el lado derecho del bloque Signal Generator.

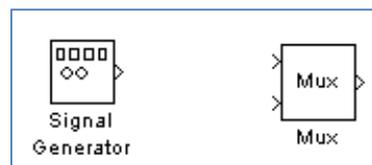


Figura 4.28.- Bloque mux 2

Luego se presiona y se mantiene pulsado el botón del ratón. Se observa que el botón cambia a una forma de una cruz.

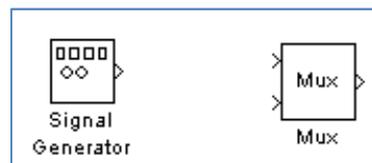


Figura 4.29.- Bloque mux 3

Manteniendo pulsado el botón del ratón, se debe mover el cursor al puerto de entrada superior del bloque Mux o sobre el propio bloque Mux. Obsérvese que el cursor mantiene su forma de cruz y que una línea conecta el bloque Signal Generator con el puerto de entrada superior del bloque Mux.

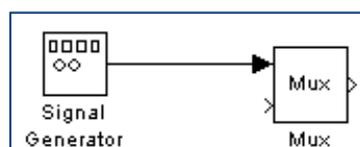




Figura 4.29.- Bloque mux 4

Luego, se libera el botón del ratón. Los bloques se conectan.

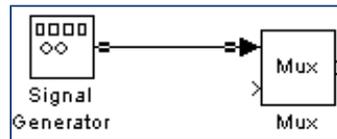


Figura 4.30.- Bloque mux 5

En el modelo que hay al comienzo se observa que la mayoría de las líneas conectan puertos de salida de bloques a puertos de entrada de otros bloques. Sin embargo, dos líneas conectan líneas a puertos de entrada de otros bloques. Estas líneas conectan la salida de Signal Generator al bloque Gain, y la salida Mux al bloque To Workspace y llevan la misma señal que las líneas desde las cuales se originan.

Dibujar esta clase de línea es ligeramente diferente a dibujar la línea que se acaba de dibujar. Para unir una conexión a una línea ya existente, se deben seguir estos pasos. En primer lugar, posicionar el cursor sobre la línea que hay entre los bloques Signal Generator y Mux.

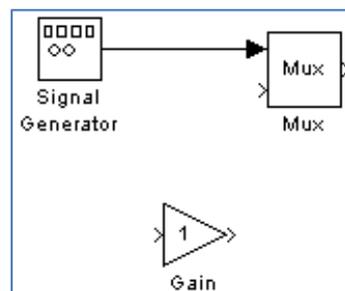


Figura 4.31.- Bloque mux 5

Mientras se mantiene pulsado el botón del ratón, se debe presionar y mantener también pulsada la tecla ctrl. Luego, se arrastra el cursor al puerto de entrada del bloque Gain o sobre el propio bloque Gain.

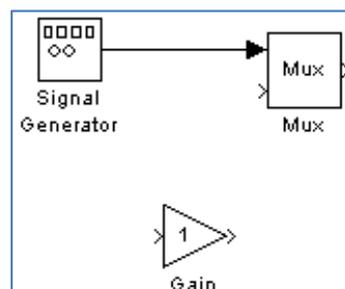




Figura 4.32.- Bloque mux 6

Ahora, se libera el botón del ratón. SIMULINK dibuja una línea entre el punto de comienzo y el puerto de entrada del bloque gain.

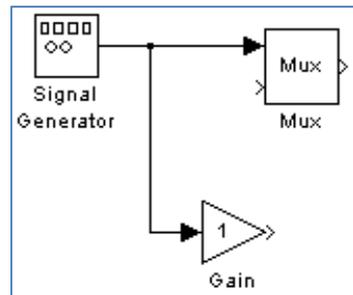


Figura 4.33.- Bloque mux 7

De forma análoga se debe dibujar una línea similar entre la línea de salida del bloque Mux y el bloque To Workspace. Se debe acabar de realizar las conexiones. Cuando se ha finalizado de conectar los bloques, es necesario ajustar algunos de sus parámetros. En primer lugar, se debe abrir el bloque Gain y cambiar el parámetro **Gain** a 2.

A continuación, se debe abrir el bloque To Workspace y modificar el parámetro **Variable name** a testmtx. Éste es el nombre de la variable del espacio de trabajo que mantendrá la salida de la simulación.

La salida por defecto del bloque signal generator es una onda sinusoidal con una amplitud de 1. Como esto es aceptable para este ejercicio, no hay necesidad de modificar ningún parámetro para este bloque.

Se debe ejecutar la simulación durante 10 segundos. Primero, se debe ajustar los parámetros de simulación seleccionando **Parameters** del menú **Simulation**. En el cuadro de diálogo que aparece, ajuste el **Stop Time** a 10 y cambie el **Maximum Step Size** a 0.1.

A continuación se debe abrir el bloque Scope para visualizar la salida de la simulación. Antes de que comience la simulación, se debe ajustar los parámetros de forma que se pueda visualizar la simulación completa. Se modifican los parámetros **Horizontal Range** (tiempo) a 10 (segundos) y **Vertical Range** (para esta simulación, corresponde a la amplitud de la onda sinusoidal) a 3.

Manteniendo abierta la ventana del bloque Scope se debe ejecutar la simulación. Se escoja **Start** en el menú **Simulation** y se observan las trazas del vector de entrada al bloque Scope.

Para guardar este modelo, se selecciona **Save** en el menú **File** y se especifica el nombre y la localización del archivo-M que describe el modelo. Para finalizar SIMULINK y MATLAB se debe escoja **Exit MATLAB** en el menú **File**.



Guardar el modelo

- Se escoge la orden **save** o **save as** en el menú **File**. Simulink guarda el modelo generando un **archivo.M** que contiene las ordenes de MATLAB necesarias para recrear el modelo.
- Si se está guardando por primera vez, se debe asignar un nombre y una localización al archivo.M, y luego pulsar OK para guardar.

Simulación y Análisis

Cómo trabaja Simulink

Cada bloque mediante un modelo de **Simulink** tiene estas características generales: Un conjunto de entradas u , un conjunto de salidas y y un conjunto de estados x .

El vector de estado puede constar de estados continuos, estados discretos o una combinación de ambos.

La simulación consta de dos fases: inicialización y simulación. Algunas acciones tienen lugar durante la fase de inicialización.

En primer lugar, los parámetros del bloque se pasan a MATLAB para su evolución. Los valores numéricos resultantes se utilizan como los parámetros actuales de bloque.

En segundo lugar, la jerarquía del modelo se reduce a su nivel inferior. Es decir, cada subsistema se sustituye por los bloques que contiene.

En tercer lugar, los bloques se disponen en el orden en que se necesita que se actualicen. El algoritmo de ordenación construye una lista tal que cualquier bloque con alimentación directa no se actualiza hasta que se calculan los bloques que excitan sus entradas. Es durante este paso cuando se detectan los lazos algebraicos.

Finalmente, se comprueban las conexiones entre bloques para asegurar que la longitud del vector de salida de cada bloque coincide con la entrada que esperan los bloques a los que se conecta.

Ahora ya la simulación está ya preparada para poderse ejecutar.

Lazos algebraicos

Lazos algebraicos o implícitos ocurren cuando dos o más bloques con alimentación directa de sus entradas forman un lazo de realimentación. Cuando esto ocurre, SIMULINK debe efectuar iteraciones en cada paso para determinar si existe una solución a este problema.

Ejemplos de bloques con alimentación directa son:

- Bloques Gain
- La mayoría de los boques no lineales
- Bloques Transfer Fen, cuando el numerador y el denominador tienen el mismo orden
- Bloques Zero-Pole, cuando hay tantos ceros como polos
- Bloque State-Space, cuando hay una matriz D distinta de cero



SIMULINK informa de un error cuando no puede resolver un lazo algebraico en 200 iteraciones de una rutina de Newton-Raphson.

Para romper lazos algebraicos en lugar de permitir que SIMULINK que los resuelva de forma iterativa, inserte un bloque Memory entre dos bloques cualesquiera incluidos en el lazo.

Simulación

Se puede ejecutar una simulación seleccionando órdenes desde los menús de SIMULINK o introduciéndolas desde la ventana de órdenes de MATLAB.

- Seleccionar órdenes desde los menús es rápido de aprender. Se puede visualizar gráficamente la conducta del sistema con bloques tipo scope.
- La introducción de órdenes de simulación y análisis desde la ventana de órdenes de MATLAB o desde los propios programas le permite visualizar los efectos de cambiar los bloques o parámetros de integración.

Parámetros de Simulación

Antes de que se ejecute una simulación, se debe especificar los parámetros de simulación y elegir el método de integración. Los parámetros de simulación incluyen:

- Tiempo de comienzo y finalización
- Tamaño del paso mínimo
- Tamaño del paso máximo
- Tolerancia o error relativo
- Variables de retorno

Cuando se ejecuta la simulación utilizando órdenes del menú, se debe asignar los parámetros de simulación seleccionando **Parameters** en el menú **Simulation**, después selecciona un método de integración y rellenar los parámetros en el cuadro de dialogo de **Control Panel**(Windows).

Tiempos de comienzo y terminación

Los parámetros **Start Time** y **Stop Time** especifican los valores de t en los que la simulación comienza y termina. El tiempo de simulación y el tiempo del reloj de pared no son iguales.

La cantidad de tiempo que toma ejecutar una simulación depende de muchos factores, entre los que se incluyen la complejidad del modelo, los tamaños de paso mínimo y máximo y la velocidad del reloj del computador.

Tamaño de paso mínimo

El parámetro Minimum Step Size es el tamaño de paso utilizado al comienzo de una simulación. Los integradores no emplean un tamaño de paso por debajo de este valor cuando generan un punto de salida a menos que el sistema contenga bloques discretos con períodos de muestreo más pequeños que el tamaño de paso mínimo. Un punto de salida es un punto generado en un bloque tipo sumidero (sink), tales como los bloques Scope o To



Workspace o devuelto en una trayectoria de estado o de salida. Un punto de salida se genera después que se han completado las iteraciones del método de integración.

Cuando hay discontinuidades en el sistema, si se asigna un valor muy pequeño al tamaño de paso mínimo puede originar que se genere un número enorme de puntos, lo que podría malgastar memoria y recursos.

Para los métodos de integración de Adams y Gear, el tamaño de paso mínimo no afecta la precisión de la solución, pero si el número de puntos de salida generados.

Tamaño de paso máximo

Se debe asignar el tamaño de paso máximo bastante pequeño para que la simulación no deje de tomar en cuenta detalles importantes. Un tamaño de paso relativamente grande puede originar que algunos modelos se hagan inestables.

Algunas veces una simulación produce resultados que son precisos pero que no son buenos para generar gráficas suaves. En ese caso, puede ser necesario limitar el tamaño del paso máximo de forma que los resultados gráficos tengan una apariencia regular.

Tolerancia o error relativo

El parámetro **Tolerance** (Windows) controla el error relativo aceptable de la integración en cada paso. En general, este parámetro se debería fijar en el rango que va desde 0.1 a $1e-6$. Cuanto más pequeño sea el valor, más pasos de integración hay que utilizar, lo que origina una simulación más precisa. No obstante, cuando la tolerancia se fija en un valor muy pequeño ($1e-10$) puede producir un paso tan pequeño que el error de redondeo aumenta muy significativamente.

Variables de retorno

Se pueden especificar nombres de variables en este campo para conseguir que SIMULINK escriba valores para el tiempo y las trayectorias de estado y de salida en el espacio de trabajos. La primera variable almacena el tiempo, la segunda el estado y la tercera la salida.

Simulación desde el menú

La ejecución de una simulación desde el menú permite efectuar ciertas operaciones de forma iterativa durante una simulación:

- Cambiar los parámetros de un bloque, a condición de que no origine un cambio en el número de estados, entradas o salidas para ese bloque.
- Cambiar cualquier parámetro de simulación excepto las variables de retorno y el comienzo.
- Cambiar el método de simulación.
- Simular al mismo tiempo otro sistema.
- Pulsar sobre una línea para ver la señal que transporta esa línea sobre un bloque Scope de tipo flotante (no conectado).



Cambios en la estructura del modelo durante una simulación, tales como añadir o suprimir líneas o bloques, originan que se pare la simulación. Se debe seleccionar otra vez **Start** para ver el resultado del cambio.

Se asignan los parámetros de simulación escogiendo **Parameters** en el menú **Simulation**.

SIMULINK visualiza el cuadro de diálogo **Control Panel (Windows)** que se muestra a continuación.

Estos cuadros de diálogo permiten escoger el método de integración y definir los parámetros de simulación.

Cuando se han definido los parámetros de simulación, está ya todo preparado para iniciar la simulación. Se ejecuta una simulación seleccionando **Star** del menú de **Simulation**.

Se puede suspender una simulación que está en ejecución escogiendo **Pause** en el menú de **Simulation** y proseguir con una simulación que ha quedado en suspenso seleccionando **Continue**.

□ Visualización de las trayectorias de salida

Las trayectorias de salida de SIMULINK se pueden representar gráficamente utilizando uno de los tres métodos siguientes:

- Bloques Scope
- Variables de retorno y las órdenes de representación gráfica de MATLAB
- Bloques To Workspace y las órdenes de representación gráfica de MATLAB

□ Utilización del bloque Scope

El bloque Scope se puede utilizar para visualizar trayectorias de salida mientras la simulación está en ejecución. El modelo sencillo que se muestra a continuación es un ejemplo del uso del bloque Scope.

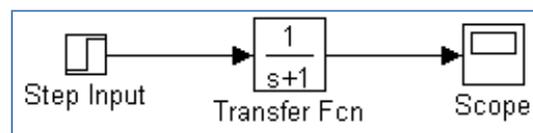


Figura 4.34.- Bloque scope.

La visualización en el bloque Scope es bastante básica; muestra la trayectoria de salida sin ninguna anotación. Los Bloques Graph proporcionan tipos de líneas y colores pero se ejecutan más lentamente que el bloque Scope.

□ Utilización de las variables de retorno



Devolviendo el tiempo y las historias de las salidas a MATLAB, puede utilizar las órdenes de representación gráfica de MATLAB para visualizar y poner anotaciones a dichas trayectorias.

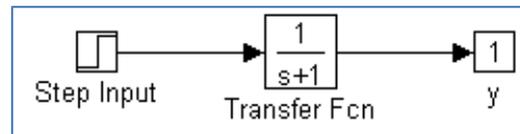


Figura 4.35.- Uso de variables de retorno. Caso 1.

El bloque etiquetado `y` es un bloque Outport de la biblioteca Connections. La trayectoria de salida y se devuelve por la función de integración. Por ejemplo, llamado al sistema `tfout` e invocando a la simulación desde la línea de orden:

`[t, x, y] = linsim ('tfout', 2);`

produce historias temporales. Podría también ejecutarse esta simulación desde el menú **Simulation** especificando `[t, x, y]` como el parámetro **Return Variables**. Puede entonces representar gráficamente estos resultados utilizando:

`plot (t, y)`

□ **Utilización del bloque Workspace**

El bloque To Workspace se puede utilizar para devolver trayectorias de salida al espacio de trabajo de MATLAB. El modelo que se muestra a continuación ilustra este método:

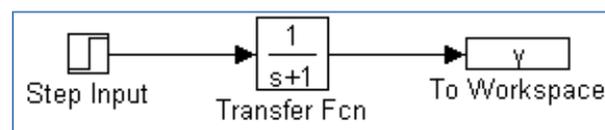


Figura 4.36.- Uso de variables de retorno. Caso 2.

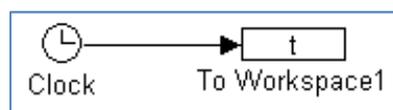


Figura 4.37.- Uso de variables de retorno. Caso 3.

Las variables `y` y `t` aparecen en el espacio de trabajo cuando se completa la simulación.

El vector de tiempos se almacena alimentando un bloque Clock en el bloque To Workspace. El vector de tiempos se puede obtener también introduciendo `t` en el



campo **Return Variables** para simulaciones conducidas por menú o retornándola desde la función de integración:

t = linsim ('tfout', 2);

El bloque To Workspace puede aceptar una entrada vectorial donde cada trayectoria de los elementos de entrada se almacena como un vector columna en la variable del espacio de trabajo resultante.

Métodos de integración

La simulación de modelos SIMULINK lleva consigo la integración numérica de conjuntos de ecuaciones diferenciales ordinarias. SIMULINK proporciona una serie de métodos de integración para la simulación de tales ecuaciones:

linsim	Método que extrae la dinámica lineal
rk23	Método de Runge-Kutta de tercer orden
rk45	Método de Runge-Kutta de quinto orden
gear	Método predictor-corrector de Gear para sistemas stiff
adams	Método predictor-corrector de Adams
euler	Método de Euler

Un sistema stiff es aquel en el que coexisten dinámicas lentas y rápidas y estas últimas alcanzan su estado estacionario.

Elección de un método

La elección del método apropiado y la selección cuidadosa de los parámetros de simulación son consideraciones importantes para obtener resultados rápidos y precisos.

El comportamiento de la simulación en términos de velocidad y precisión varía para los diferentes modelos y condiciones.

1. **Linsim**

Linsim utiliza un método que extrae la dinámica lineal de un sistema, dejando solamente la dinámica no lineal del sistema para ser simulado. Este método funciona muy bien cuando el sistema que se desea simular es relativamente lineal. Los modelos lineales se componen de bloques Transfer Fcn, State-Space, Zero-Pole, Sum y Gain. El método puede tomar tamaños de pasos muy grandes para tales sistemas. Por lo tanto, para obtener puntos de salida razonablemente espaciados, es necesario limitar el tamaño de paso máximo.



Linsim es particularmente bueno comparado con otros métodos cuando los bloques lineales tienen ambas dinámicas, rápidas y lentas.

✓ **rk45, rk23**

Los métodos de Rungr-Kutta, rk23 y rk45 son buenos algoritmos de propósito general que trabajan bien para un abanico amplio de problemas. Normalmente funcionan mejor que los otros métodos cuando el sistema es fuertemente no lineal y/o presenta discontinuidades. Sin embargo, no operan bien cuando el sistema tiene ambas dinámicas, rápidas y lentas. Los métodos rk23 y rk45 dan buen resultado para sistemas híbridos que contienen elementos de tiempo continuo y tiempo discreto.

Aunque rk45 es generalmente más rápido y preciso que rk23, produce menos puntos de salida; por lo tanto, rk23 puede ser la elección preferida para gráficas más regulares.

✓ **adams, gear**

Adams y gear son métodos del tipo predictor-corrector que funcionan bien en problemas donde las trayectorias de estados son regulares. El método de gear está diseñado para sistemas stiff. Es menos eficiente que otros métodos para sistemas no stiff y no da buenos resultados cuando el sistema tiene discontinuidades.

Se utiliza gear para sistemas que sean regulares y no lineales.

Se utiliza adams para sistemas que son regulares y no lineales pero que no tienen constantes de tiempo que varían en un amplio rango.

✓ **euler**

Euler es una implementación del método de Euler explícito, un método de primer orden que, en general, utilizará más puntos de tiempo que los métodos de orden superior. Este método no produce resultados tan precisos como otros métodos. Debería evitar utilizarlo a menos que esté investigando la ejecución de su modelo en tiempo real.

• **Comparación de los métodos: Un ejemplo**

El comportamiento de la simulación depende de la elección de los métodos y de los valores de los parámetros. Este ejemplo compara los métodos de simulación utilizando la ecuación de Van der Pol, un modelo no lineal simple de segundo orden:

$$\dot{x} + (x-1)x + x = 0$$

Esta ecuación se puede describir como un conjunto de ecuaciones diferenciales de primer orden:

$$\dot{x}_1 = x_1(1-x_2) - x_2$$

$$\dot{x}_2 = x_1$$

Estas ecuaciones se representan como el sistema vdp, que se proporciona como una demo con SIMULINK.

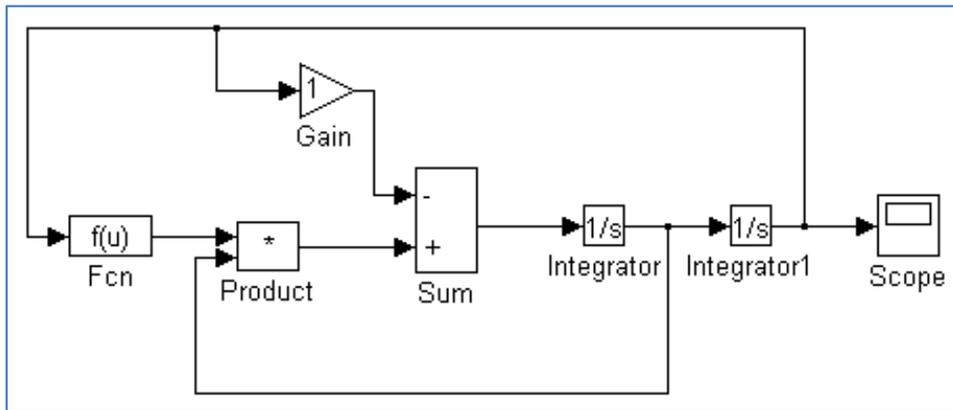


Figura 4.38.- Subsistema ejemplo para el estudio de los distintos pasos de integración..

En este ejemplo, comparamos los métodos de integración utilizando un valor de $1e-3$ para el parámetro de tolerancia. Los parámetros de integración se definen como:

```
tol = 1e-3;
minstep = 1e-5;
maxstep = 10;
options = [tol, minstep, maxstep];
x0 = [1;1];
```

Comparando los métodos de integración linsim, rk23 y rk45:

```
[tls, xls] = linsim ('vdp', 10, x0, options);
[tr23, xr23] = rk23 ('vdp', 10, x0, options);
[tr45, xr45] = rk45 ('vdp', 10, x0, options);
plot (tls, xls, tr23, xr23, 'o', tr45, xr45, '+')
```

La representación gráfica de las tres trayectorias de estados es:

- **La biblioteca de bloques de SIMULINK**

SIMULINK organiza sus bloques en bibliotecas de bloques de acuerdo con su conducta. La ventana **Simulink** visualiza los nombres de las bibliotecas y de los iconos.

La biblioteca Sources (Fuentes) incluye bloques que originan señales. La tabla que sigue a continuación describe los bloques de la biblioteca Sources.

Nombre del bloque	Objetivo
Band-Limited White Noise	Introduce ruido blanco en un sistema continuo
Chirp Signal	Genera una onda sinusoidal de frecuencia creciente



Clock	Visualiza y proporciona el tiempo de simulación
Constant	Genera un valor constante
Digital Clock	Genera tiempo de simulación en el intervalo de muestreo especificado
From File	Lee datos de un archivo
From Workspace	Lee datos de una matriz definida en el espacio de trabajo
Pulse Generator	Genera pulsos a intervalos regulares
Random Number	Genera números aleatorios distribuidos normalmente
Repeating Sequence	Genera una señal arbitraria repetible regularmente
Signal Generator	Genera diferentes formas de ondas
Sine Wave	Genera una onda sinusoidal
Step Input	Genera una función en salto

La biblioteca Sinks (Sumidero) incluye bloques que visualizan o escriben su salida. La tabla que se muestra a continuación describe los bloques de la biblioteca Sinks.

Nombre del bloque	Objetivo
Auto-Scale Graph Scope	Visualiza señales en ventanas de figuras de MATLAB autoescaladas
Graph Scope	Visualiza señales utilizando la ventana de figuras de MATLAB
Hit Crossing	Aumenta el número de pasos de simulación en tomo a un valor especificado.
Scope	Visualiza señales durante la simulación
Stop Simulation	Para la simulación cuando la entrada es distinta de cero
To File	Escribe datos en un archivo



To Workspace	Escribe datos en una matriz en el espacio de trabajo
XY Graph Scope	Visualiza gráficas X-Y de señales en la ventana de figuras de MATLAB

La biblioteca Discrete (Discretos) contiene bloques que describen componentes de tiempo-discreto. La tabla que se muestra a continuación describe los bloques de la biblioteca Discrete.

Nombre del bloque	Objetivo
Discrete-Time Integrator	Realiza la integración en tiempo discreto de una señal
Discrete-Time Integrator Limited	Realiza la integración en tiempo discreto de una señal con límites.
Discrete State-Space	Implementa un sistema discreto en el espacio de estados
Discrete Transfer Fcn	Implementa una función de transferencia discreta
Discrete Zero-Pole	Función de transferencia discreta en términos de polos y ceros
Filter	Implementa filtros IIR y FIR
First-Order Hold	Implementa un muestreador-retenedor de orden uno
Unit Delay	Retarda una señal en un período de muestreo
Zero-Order Hold	Retenedor de orden cero de un período de muestreo

La biblioteca Linear (Lineal) contiene bloques que describen funciones lineales estándar. La tabla que se muestra a continuación describe los bloques que contiene la biblioteca Linear.

Nombre del bloque	Objetivo
Derivative	Genera la derivada respecto al tiempo de la entrada



Gain	Multiplica la entrada al bloque
Inner Product	Genera el producto escalar
Integrator	Integra una señal
Matrix Gain	Multiplica la entrada por una matriz
Slider Gain	Varía una ganancia escalar utilizando una corredera
State-Space	Implementa un sistema lineal en el espacio de estados
Sum	Genera la suma de las entradas
Transfer Fcn	Implementa una función de transferencia lineal
Zero-Pole	Función de transferencia especificada en términos de polos y ceros

La biblioteca Nonlinear (No-lineal) contiene bloques que describen funciones no lineales estándar. La tabla que se muestra a continuación describe los bloques de la biblioteca Nonlinear.

Nombre del bloque	Objetivo
Abs	Genera el valor absoluto de la entrada
Backlash	Modela la conducta de un sistema con huelgo
Combinatorial Logic	Implementa una tabla de verdad
Coulombic Friction	Discontinuidad en cero con cualquier valor de ganancia lineal
Dead Zone	Proporciona una región de salida cero
Fcn	Aplica una expresión especificada a la entrada
Limited Integrator	Integra dentro de límites especificados
Logical Operator	Realiza operaciones lógicas especificadas sobre las entradas
Look-Up Table	Realiza una transformación lineal a tramos de la entrada



MATLAB Fcn	Aplica una función de MATLAB a la entrada
Memory	Saca la entrada al bloque en el paso de integración previo
Product	Multiplifica las entradas
Quantizer	Discretiza la entrada en un intervalo especificado
Rate Limiter	Limita la velocidad de cambio de una señal
Relational Operation	Realiza las operaciones relacionales especificadas sobre la entrada
Relay	Conmuta la salida entre dos valores
Reset Integrator	Reinicializa los estados del integrador durante la simulación
Saturation	Limita el valor de una señal
Sign	Devuelve el signo de la entrada
Switch	Conmuta entre dos entradas
Transpon Delay	Retarda la entrada en una cantidad dada de tiempo
2-D Look-Up Table	Realiza una transformación lineal a tramos de dos entradas
Variable Transpon Delay	Retarda la entrada una cantidad variable de tiempo

La biblioteca Connections (Conexiones) contiene bloques que permiten multiplexación y de demultiplexación, implementa Entradas/Salidas externas y crea subsistemas. La tabla que se muestra a continuación describe los bloques de la biblioteca Connections.

Nombre del bloque	Objetivo
Demux	Separa una señal vectorial en sus señales de salida
Inport	Proporciona un enlace a una entrada externa para linealización



Mux	Combina algunas líneas de entrada en una línea vectorial
Outport	Proporciona un enlace a una salida externa para linealización
Subsystem	Representa un sistema dentro de otro sistema



4.5 PRIMEROS PASOS EN LA TRADUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE DINÁMICA DE SISTEMAS

Empecemos por el bloque más característico la estructura

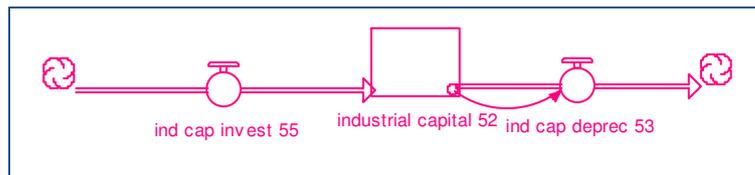


Figura 4.39.- Estructura básica

Flujo de entrada-> Stock->Flujo de salida

Deberemos elegir un nivel y dos flujos de las bibliotecas de Simulink.

4.5.1 El stock, nivel

Integrator: Integrador continuo de la señal de entrada

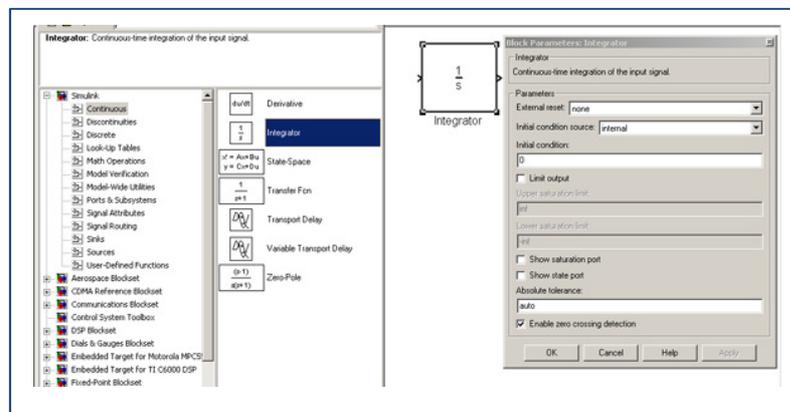


Figura 4.40.- Seleccionar un nivel en Simulink.

4.5.2 Flujos, Flows

Los flujos de entrada y salida a un nivel se componen con la ayuda de un operador matemático que introduce el balance de pérdida ganancia en el nivel. En el ejemplo, x52 industrial capital es el nivel, x55 es un flujo de entrada, y x53 es un flujo de salida.

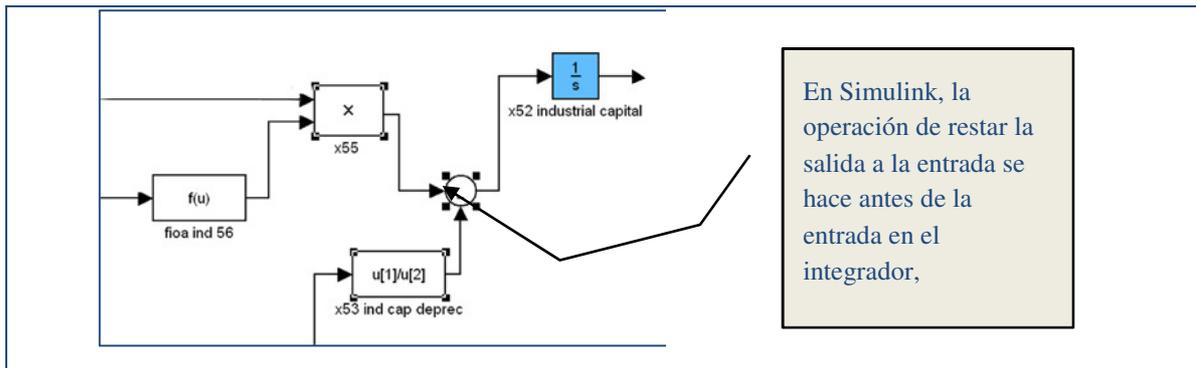


Figura 4.41.- Estructura equivalente en Simulink a la estructura 4.40 de Stella.

4.5.3 Funciones

Vamos a complicar ahora un poco más la estructura añadiendo funciones a los flujos:

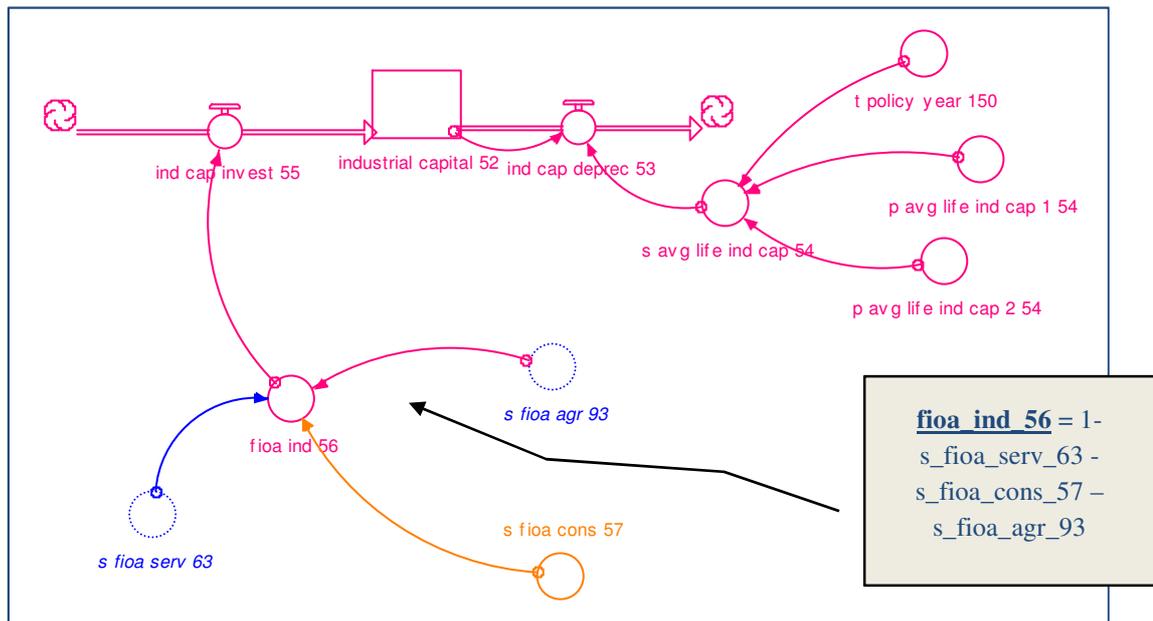


Figura 4.42.- Ejemplo de función del subsistema industrial.

Previamente hay que definir un vector de $1 \times n$, siendo n el n° de los valores con los que se quiere operar.

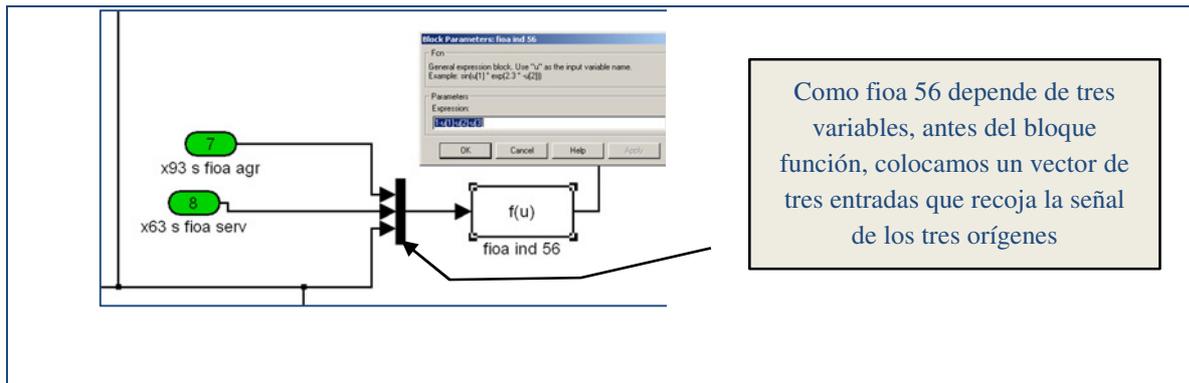


Figura 4.43.- Insertar una función en Simulink.

4.5.4 Constantes

Constante: Salida de la constante especificada por el parámetro "valor constante"

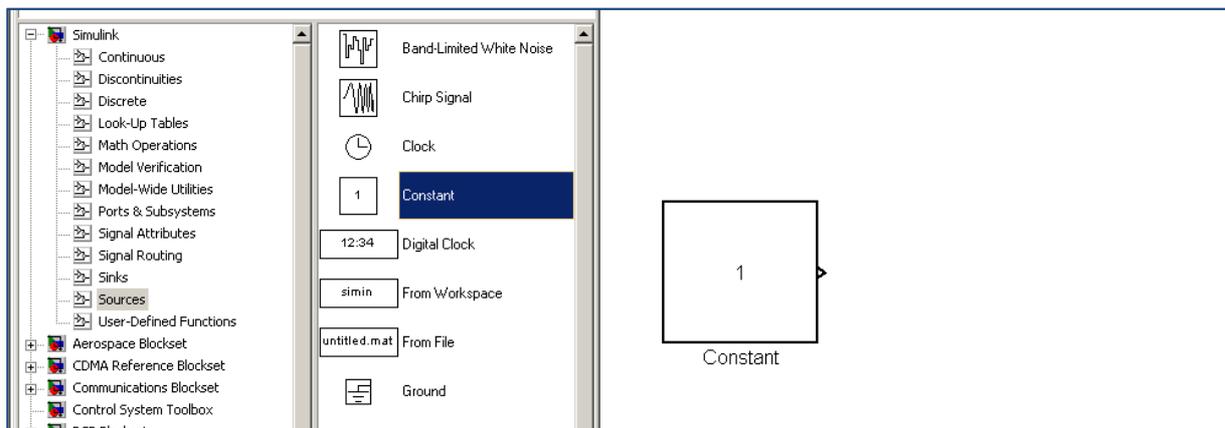


Figura 4.44.- Insertar una constante en Simulink.

Haciendo doble click sobre el icono, se nos abre el siguiente diálogo:



Si 'valor constante es un vector y' Interpretar parámetros vectoriales como 1-D 'está activada, el valor constante tratar como una matriz de 1-D. De lo contrario, la producción de una matriz con las mismas dimensiones que el valor constante.

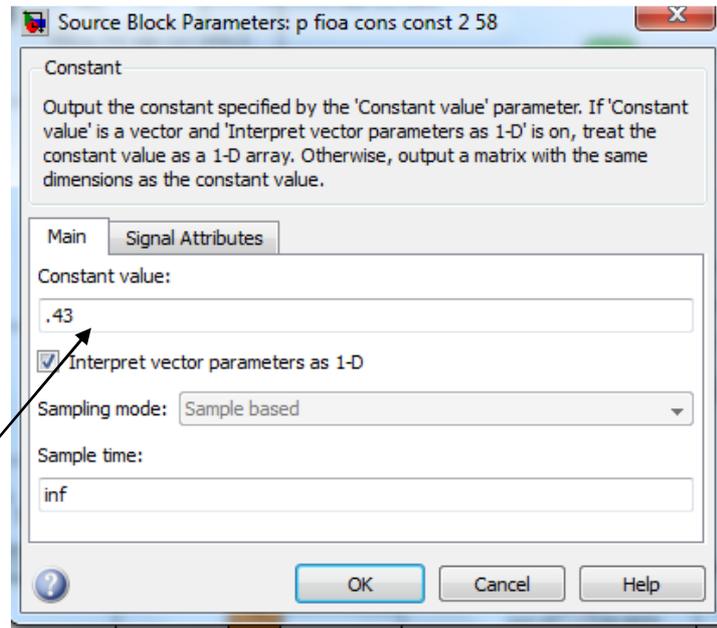


Figura 4.45.- Asignar un valor a una constante en Simulink.



4.6 ELEMENTOS CARACTERÍSTICOS COMPLEJOS

4.6.1 Construcción de una tabla en Simulink

Para construir la tabla x79 jobs per hect. en simuworld3 tenemos que conocer los valores los valores en worl3-2003

Abrimos la función en Stella haciendo doble click en el icono y copiamos los valores de agr_inp per Hect 101 de la ventana Graphical Function de Stella en el bloque de texto vector of input values de la ventana de Block Parameters de Simulink

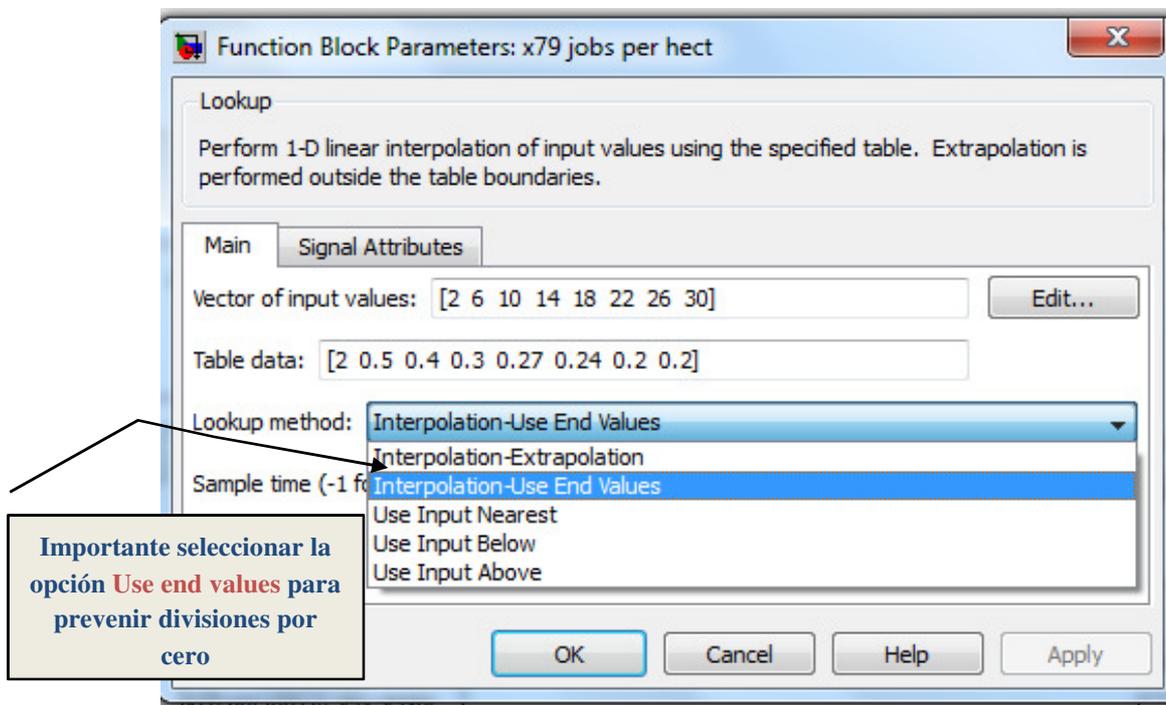


Figura 4.46.- Importante seleccionar la opción “use end values” para prevenir divisiones por cero.

4.6.2 Construcción de un bloque smooth1 en Simulink

Un smooth1 es una forma de transitar suavemente de un valor a otro

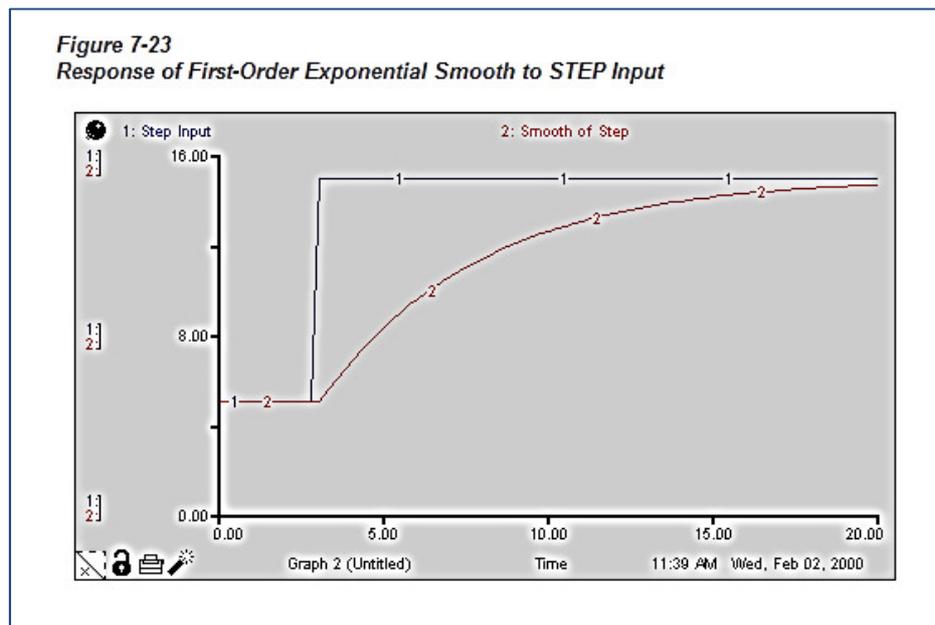


Figura 4.47.- Aproximación smooth1

La estructura equivalente usando diagramas de Forrester sería:

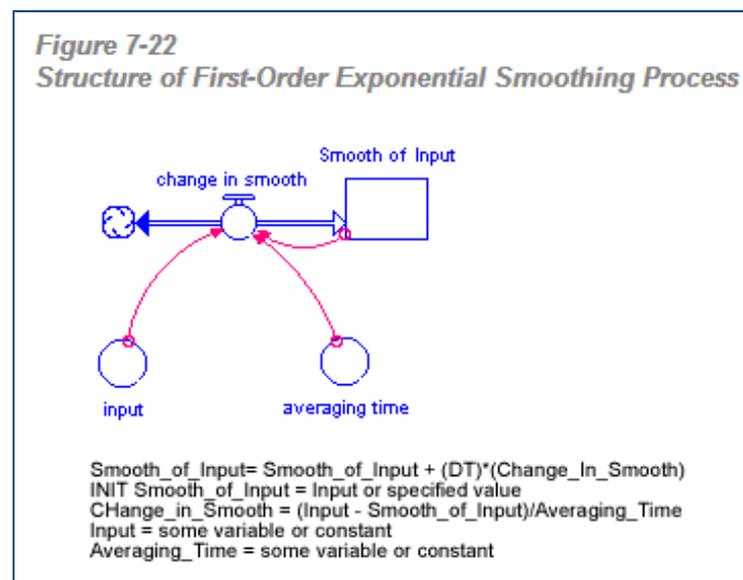


Figura 4.48.- Estructura equivalente en Stella al smooth1.

Por lo tanto, tenemos que construir esta estructura en Simulink, es una estructura con 2 entradas y una salida, las entradas son:

1. Input
2. Average time

Y una salida “Smooth of Input” es decir la entrada suavizada, veamos cómo construir esto en Simulink con lo que hemos visto hasta ahora. Tenemos dos entradas

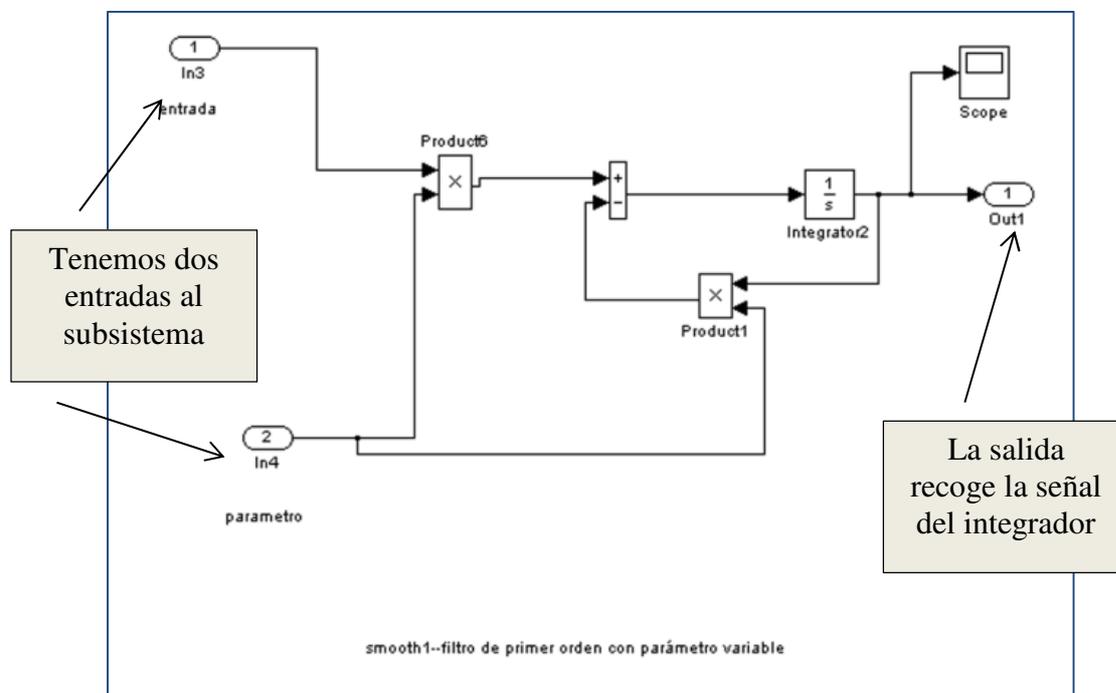


Figura 4.49.- Subsistema en Simulink para crear un smooth1

4.6.3 Construcción de un bloque smooth3 en Simulink

Un smooth3 es una forma de transitar suavemente de un valor a otro siguiendo un camino como el que vemos en la gráfica inferior:

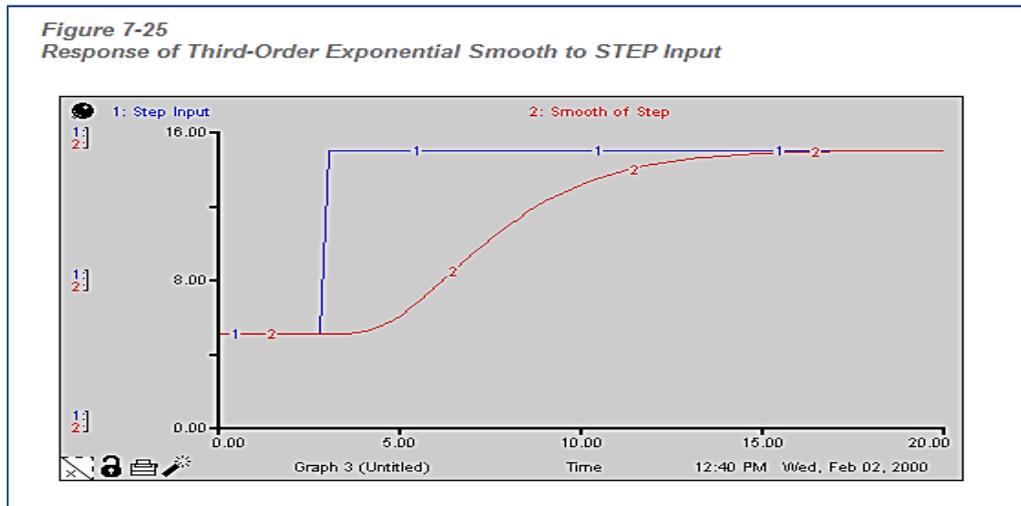


Figura 4.50.- Aproximación smooth3

La estructura equivalente usando diagramas de Forrester sería:

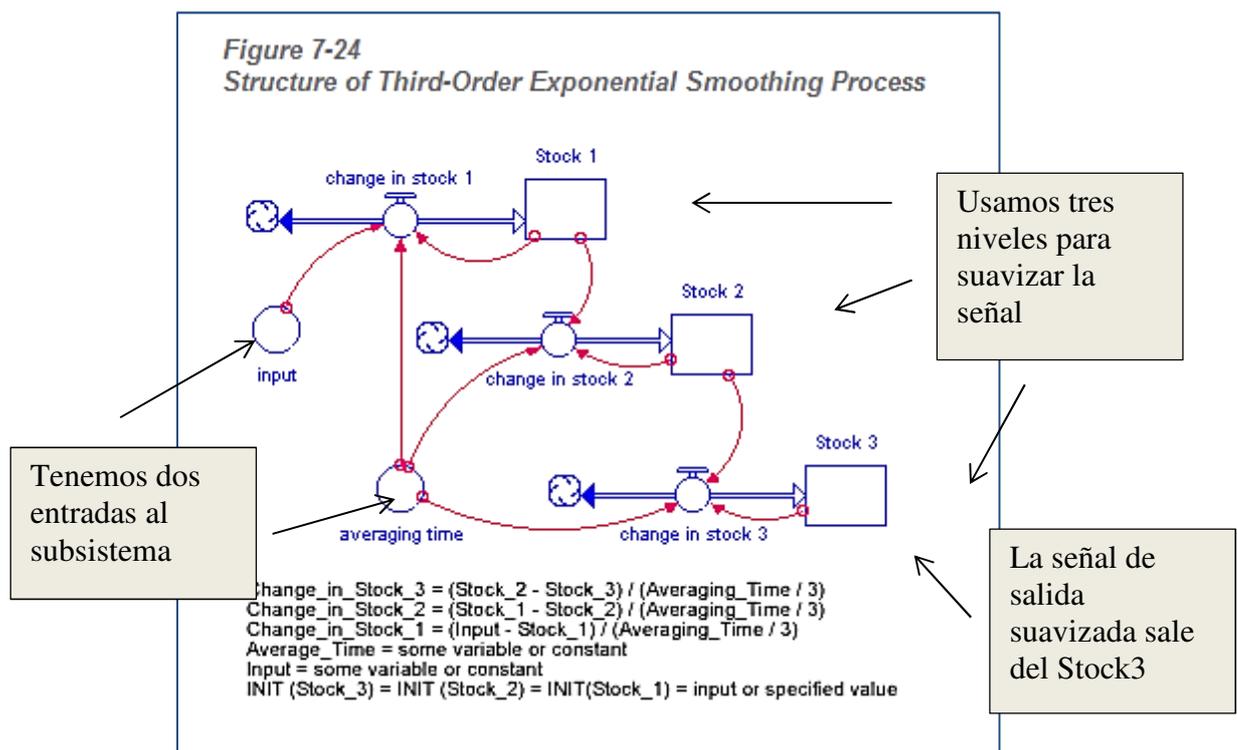


Figura 4.51.- Estructura equivalente en Stella al smooth3.

Construcción de un retraso de 3er nivel en Simulink, para ello creamos un subsistema con 2 entradas y una salida y situamos en su interior tres stocks

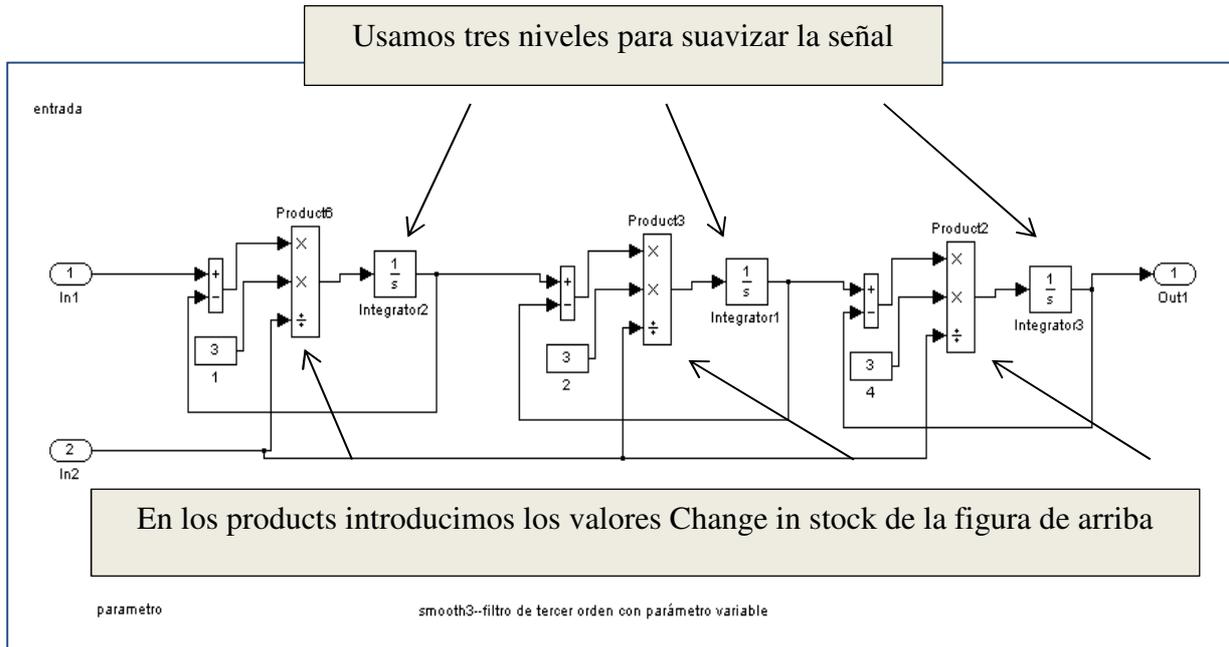


Figura 4.52.- Subsistema en Simulink para crear un smooth3

4.6.4 Construcción de un bloque condicional

Veamos un bloque condicional utilizando diagramas de Forrester sacados del W3 en Stella. Elegimos para tal fin el ala derecha del flujo que sale del capital industrial. La depreciación industrial es igual al capital industrial dividido por la vida útil del capital industrial. Aquí los autores nos dan la oportunidad a los usuarios de cambiar de política a partir de cierto año y alargar el periodo de vida útil del capital industrial. La estructura que contiene el bloque condicional es *s_avg_life_ind_cap_54*

```

s_avg_life_ind_cap_54 = if (time > t_policy_year_150) then
p_avg_life_ind_cap_2_54
else
p_avg_life_ind_cap_1_54

```

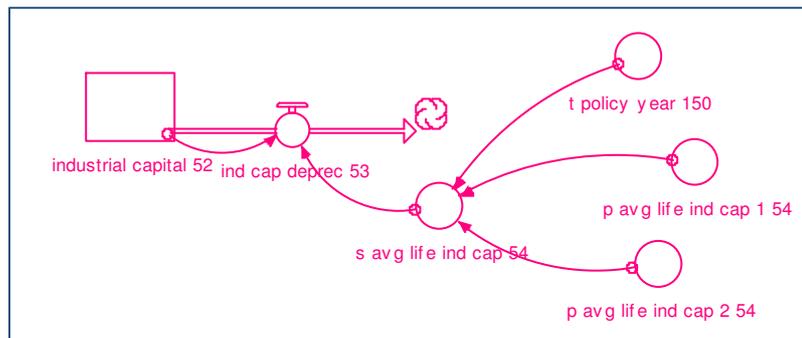


Figura 4.53.- Estructura de un bloque condicional en Stella

Esta estructura tiene tres entradas y una salida. Veamos cómo construirla en Simulink, para ello nos valemos de un subsistema, 4 entradas y una salida. Tenemos una entrada más que en Stella para meter el time, otra para meter el umbral *t_policy_year* y otras dos más, una para el caso $\text{time} < t_policy_year$ y otra para $\text{time} > t_policy_year$. Además el subsistema también hay que construirlo,

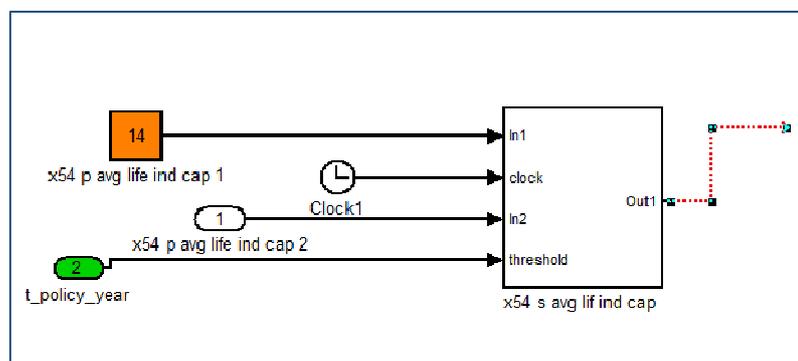


Figura 4.54.- Estructura de un bloque condicional en Simulink.



Hagamos doble click en el subsistema para ver qué tiene dentro y qué proceso sigue, ya que es algo más complejo de programar que en Stella. Lo primero que hacemos es restar la señal de tiempo que nos da el reloj, con el tiempo de referencia, si es menor que cero vamos por el lazo de arriba y cogemos el valor de la entrada 1 y si es mayor que cero, vamos por el lazo de abajo cogiendo la opción 3. Las estructuras if1 y else se mezclan en una única señal antes de sacar una única señal out1 fuera del subsistema.

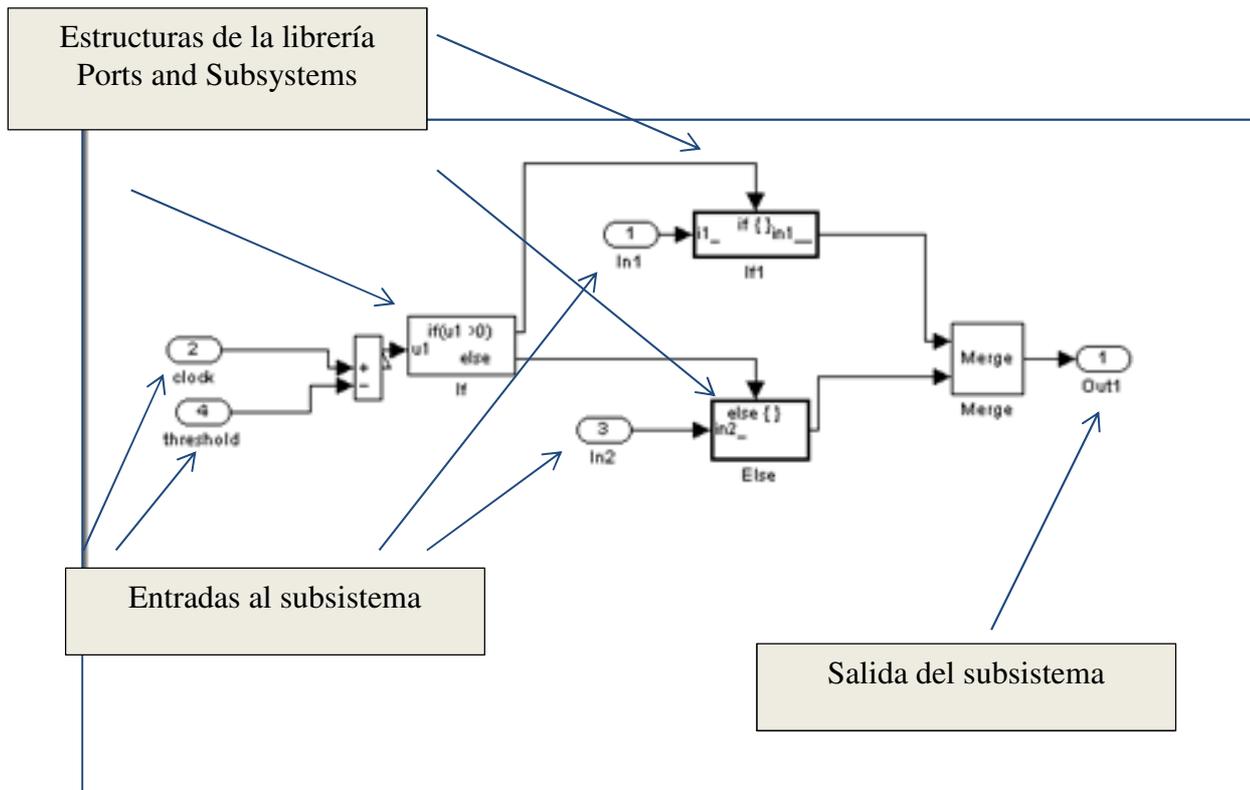


Figura 4.55.- Estructura interior de un subsistema condicional.



5 CONSTRUCCIÓN DEL WORLD3 EN SIMULINK



ANÁLISIS AUTOMÁTICO DE MODELOS COMPLEJOS
UTILIZANDO HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA
ARTIFICIAL PARTIENDO DEL EJEMPLO DEL WORLD3





Vamos a construir el World3 en Simulink. Crearemos un nuevo modelo al que llamaremos **simuworld3.mdl**, los pasos a dar son los siguientes:

1. Especificaremos los mismos parámetros de simulación en ambos programas
2. Haremos un estudio de la Jerarquía de sistemas y subsistemas del World 3 en Stella.
3. Definiremos y segmentaremos los esquemas en Stella, definiendo las entradas y salidas de cada subsistema así como el nivel de profundidad o número de subsistemas que a su vez contiene cada subsistema. Para cada subsistema, definiremos un subsistema nuevo en su interior por cada stock. Hemos reconocido 15 subsistemas
4. Crearemos en Simulink los mismos subsistemas que hemos reconocido en Stella.
5. Con el World 3 en Stella haremos 15 modelos independientes. Las variables procedentes de otros subsistemas las cambiaremos por valores constantes, para que puedan funcionar de forma autónoma.
6. Uno a uno, iremos traduciendo cada subsistema a Simulink.
7. Después de cada traducción, haremos correr ambas versiones de cada subsistema y calibraremos los resultados, de Stella y Simulink para ver que dan los mismos resultados y así validar la traducción.
8. A medida que vayamos traduciendo subsistemas, iremos agrupando algunos de ellos para calibrarlos en conjunto.
9. Para una mejor comprensión del modelo, empezaremos los primeros experimentos sobre subsistemas agrupados. Utilizaremos los análisis de sensibilidad con el modelo industrial y el de los recursos.
10. Con todos los subsistemas traducidos, procederemos a enlazar todos los subsistemas.
11. Con todos los subsistemas enlazados procederemos a calibrar el conjunto intentando reproducir los escenarios 2 (business as usual) el nº 6 (sólo soluciones tecnológicas) y el 12 (mundo estabilizado).
12. Finalmente, con el cuadro de resumen de escenarios presentado en la tabla 3.4.1 construiremos un gran subsistema que englobe los 15 subsistemas y le pondremos las entradas y salidas necesarias para reproducir los escenarios de los libros de los límites del crecimiento más las que consideremos necesarias para hacer los experimentos deseados.

Con estos doce pasos cumplidos cerramos el capítulo de traducción a Simulink y ya podemos empezar los experimentos en el siguiente capítulo.



5.1 PREPARAR LOS PARÁMETROS DE SIMULACIÓN

En los parámetros de Simulación debemos decirle al programa de simulación que utilizemos el año de comienzo y el de finalización de la simulación, el paso de integración y el método. Para ello, veremos qué parámetros vienen configurados en la versión de Stella y los pondremos igual en Simulink. Empecemos por abrir este cuadro de diálogo en Stella:

En el menú Run, elegimos Run Specs y se nos presenta el siguiente diálogo:

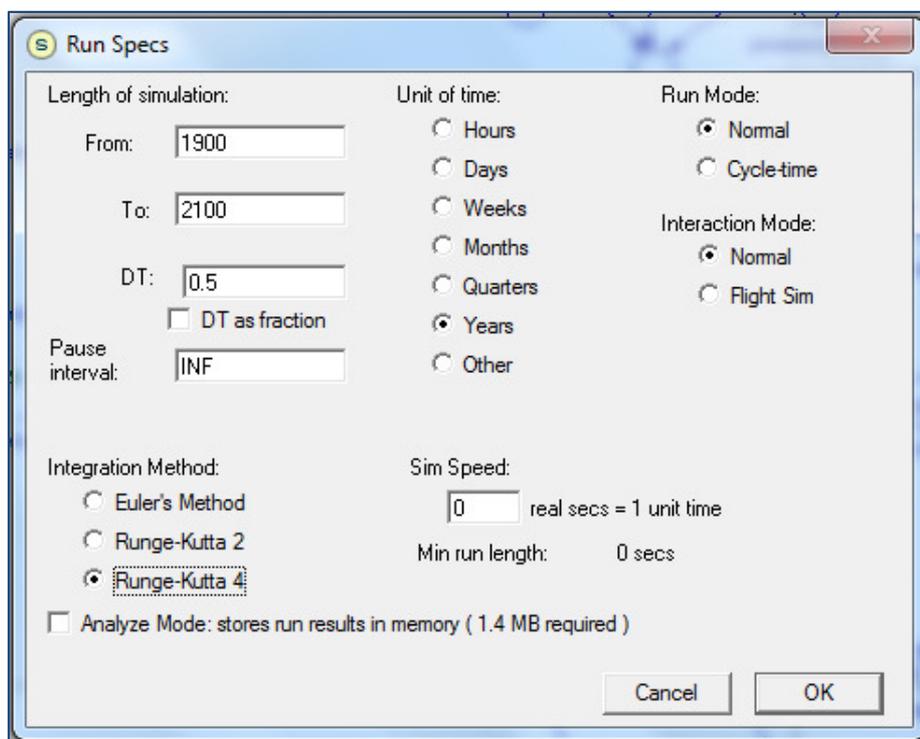


Figura 5.1.- Configuración de parámetros de simulación en Stella

Ahora vamos a configurar Simulink de la misma guisa, para ello vamos al menú Simulations y allí elegimos configuration parámetros y vamos a la siguiente pantalla:

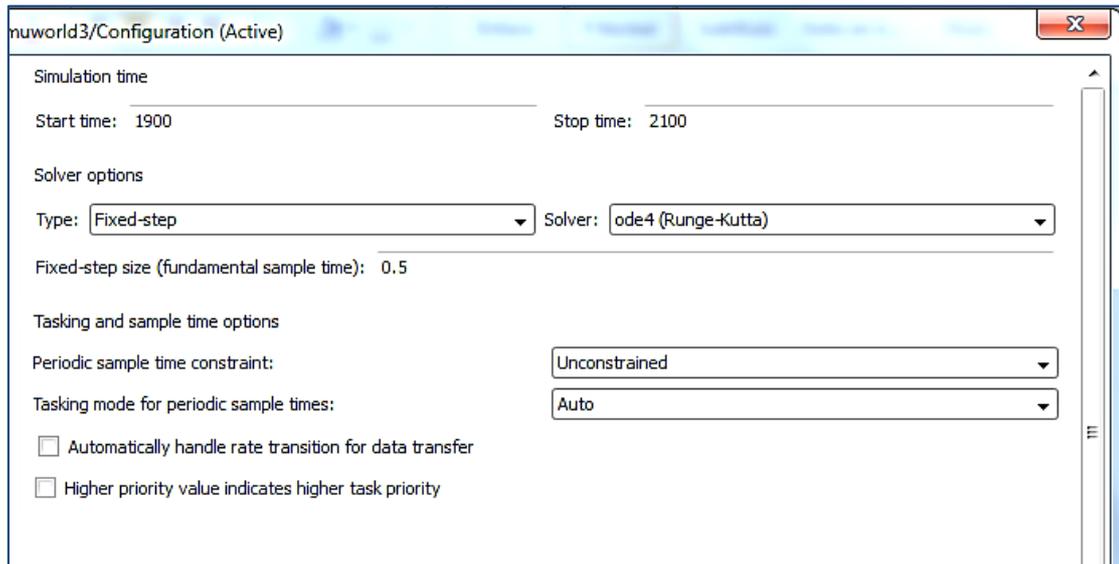


Figura 5.2.- Configuración de parámetros de simulación en Simulink, hemos recortado un poco la pantalla para seleccionar sólo lo que nos afecta para este trabajo

Una vez configurados los parámetros de simulación, tendremos que hacer bastantes ficheros hasta llegar al Simuworld3.mdl definitivo. Por un lado haremos los 15 subsistemas, cada uno será un fichero diferente. Luego, cuando agrupemos varios subsistemas en uno sólo, también haremos otro fichero para esos subsistemas agrupados



5.2 ESTUDIO DE LAS JERARQUÍAS DEL WORLD3-2003 EN ESTELLA.

Una primera aproximación al modelo world3-2003 permite diferenciar 15 subsistemas interconectados. Cada subsistema tiene unos orígenes bien definidos, y controla una parte de la actividad productiva mundial. Las fuentes de datos que alimentan cada subsistema pueden originarse en el propio subsistema (endógenas) o proceder de otro subsistema. Las variables procedentes de otros subsistemas están dibujadas en trazo punteado, mientras que las constantes iniciales están dibujadas en trazo continuo. La mayoría de los subsistemas giran en torno a un nivel o a una o varias cadenas de niveles. No obstante, también hay subsistemas que no contienen esta estructura. A su vez estos 15 subsistemas se pueden incluir en un gran subsistema global. Para construir el SimuWorld3 en Simulink es preciso definir un criterio de niveles:

El primer nivel va a ser el nivel global que abarca todos los subsistemas. A este nivel se conectarán todas las entradas con las que queramos operar o modificar desde el código. También sacaremos de este subsistema todas las variables que queramos analizar con ficheros m-file.

El segundo nivel será el que contenga todos los grandes subsistemas. Nº de Subsistemas = 15. Los subsistemas se conectan entre sí. A la hora de analizar un subsistema para reescribirlo en Simulink lo primero es contar, numerar y nombrar las entradas y las salidas. En la tabla 5.1 hemos preparado este primer análisis.

Los siguientes niveles que se encuentran dentro de los subsistemas pueden ser simples o complejos. Los simples no contienen más subsistemas como por ejemplo los bloques if o los retrasos. Los complejos pueden tener a su vez varios niveles de subsistemas. En el World3, el subsistema que tiene mayores niveles de profundidad y complejidad es el food_production, con 4 niveles de profundidad.



5.3 DEFINICIÓN Y SEGMENTADO DE SUBSISTEMAS

5.3.1 Nivel 1

Definimos un subsistema con x entradas e y salidas y otro subsistema para mandar el time al workspace. Los n° entradas y salidas de momento no importan, las iremos definiendo a medida que vayamos necesitándolas al programar las simulaciones con el código m-file.

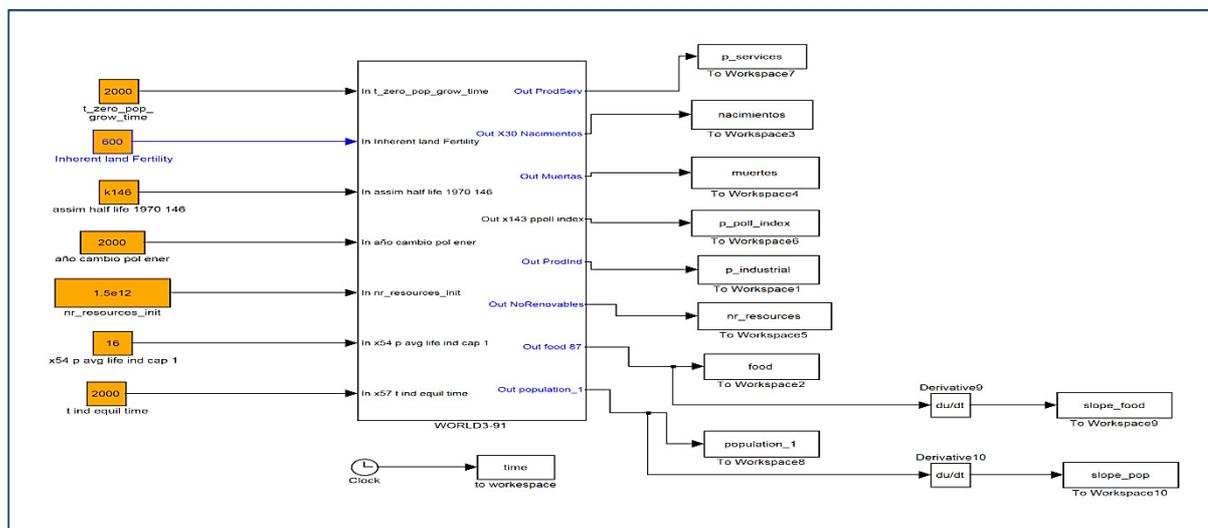


Figura 5.3.- Vista del nivel principal de una aplicación en Simulink:

Entradas->subsistema->salidas y time->workspace

5.3.2 Nivel 2

Vamos a fragmentar el modelo en 15 subsistemas. Cada uno gira alrededor de uno o varios niveles o se agrupan para generar una salida función de otras que pueden estar en otros subsistemas.

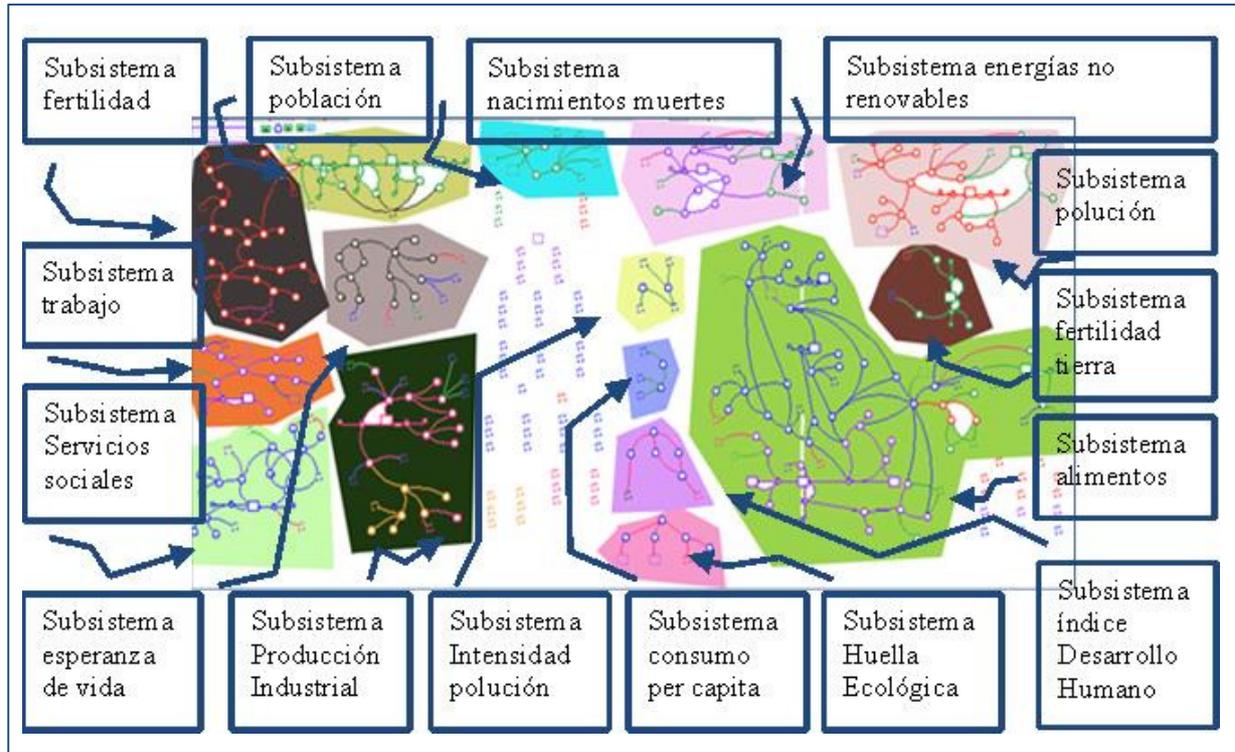


Figura 5.4.- World3-03 segmentado en sus 15 subsistemas

1º Localizamos las entradas procedentes de otros subsistemas en Stella que son fácilmente localizables por estar representados con un trazo punteado, las salidas se van definiendo en los subsistemas precedentes hasta cerrar el círculo. El nivel de profundidad viene definido por el nº de niveles que contiene el subsistema. Cada bloque if o cada bloque smooth suponen nuevos niveles de profundidad.

Subsistem	IdSub	Description
Total Population	Sub1	Población Total del Planeta
Population Age	Sub2	Población Total del Planeta por edades
Human Fertility	Sub3	Tamaño de la familia
Life Expectancy	Sub4	Esperanza de Vida
Jobs	Sub5	Empleos, Utilización Población Activa.



Services	Sub6	Producción de Servicios
Industrial	Sub7	Producción Industrial
Non Renovable	Sub8	Recursos no Renovables
Pollution	Sub9	Contaminación
Land Fertility	Sub10	Fertilidad de la Tierra
Food Production	Sub11	Producción de Alimentos
Ecological Footprint	Sub12	Huella Ecológica
Human Welfare	Sub13	Nivel de Bienestar
Cons Ind pc	Sub14	Consumo Industrial per capita
Poll Intens	Sub15	Intensidad de la Polución

Tabla 5.1.- Definición de los 15 subsistemas

Con este análisis previo ya podemos dibujar los 15 subsistemas con sus correspondientes entradas y salidas.

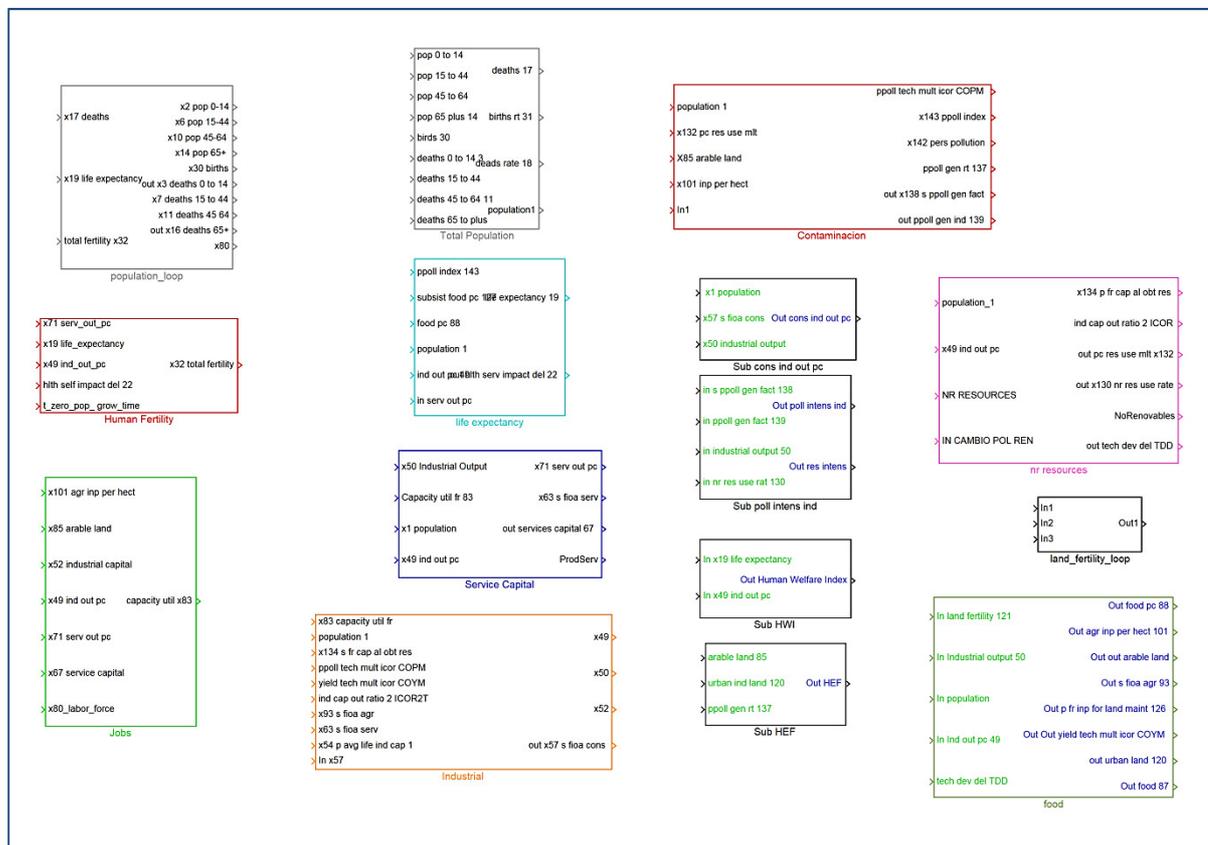


Figura 5.5.- World3-03 segmentado en sus 15 subsistemas en su versión Simulink



ANÁLISIS AUTOMÁTICO DE MODELOS COMPLEJOS
UTILIZANDO HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA
ARTIFICIAL PARTIENDO DEL EJEMPLO DEL WORLD3





5.4 CONSTRUCCIÓN DEL SUBSISTEMA EMPLEO

Seleccionamos el Subsistema Empleo. En un primer análisis vemos que tiene 7 entradas y una salida. Coge 4 datos de otros subsistemas y cede uno a otros subsistemas. Para construirlo y testarlo, vamos a tener que tratarlo independientemente de los otros subsistemas, deberemos sustituir las entradas variables por valores constantes, eligiendo los valores que tienen en el instante $t=0$, que en el modelo World3 se corresponde con el año 1900. Los valores iniciales los que aparecen en la tabla 5.2.

5.4.1 Definición de entradas y salidas

Estudiemos el subsistema empleo definiendo sus entradas y salidas

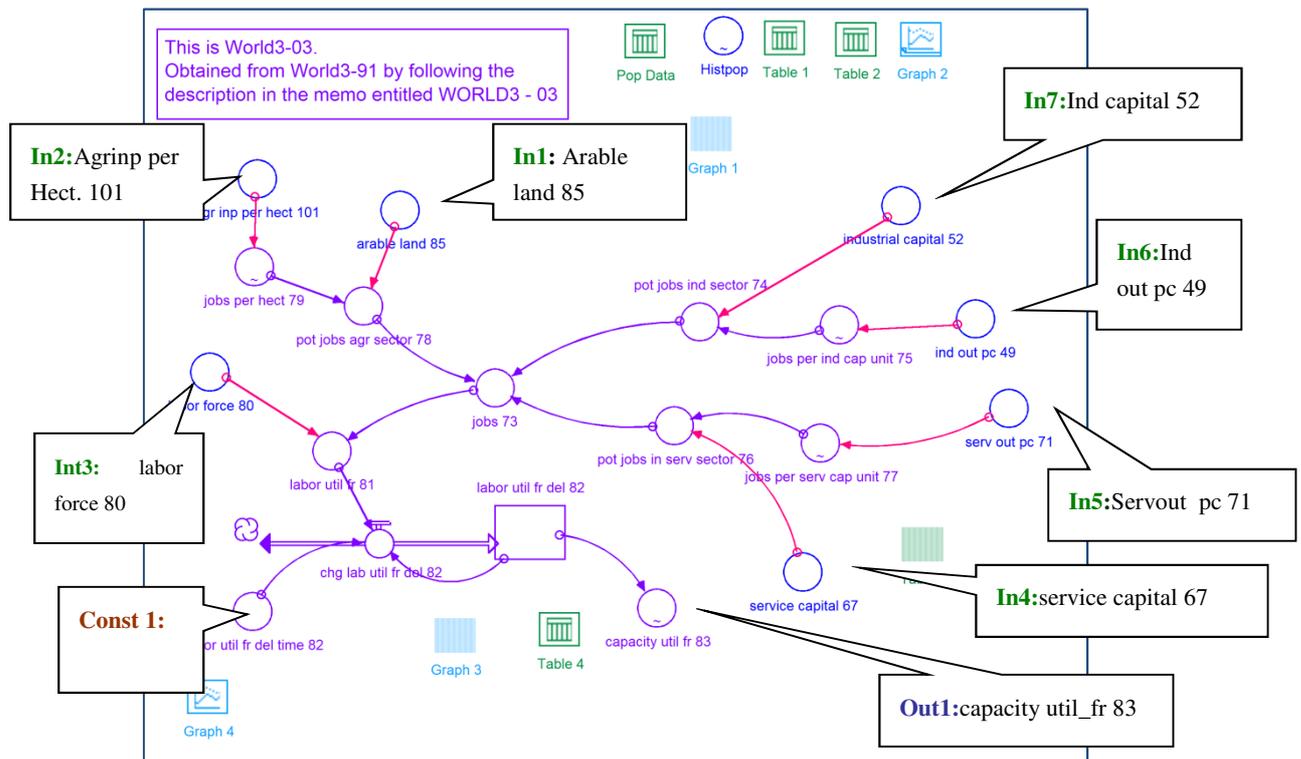


Figura 5.6.- Descripción del subsistema empleo



Tipo de Entrada	Nombre de la Entrada o de la Salida	Valor en t=0 (Año 1900)	Valor en t=200 (Año =2100)	Subsistema del que Procede
Const1	labor_util_fr_del_time_82	2		
Out1	capacity_util_fr_83	1	0.98	
in1	Arable land 85	900e6	900e6	Producción de Alimentos
in2	Agr_inp_per_hect_101	5.33	5.33	Producción de Alimentos
in3	Labor_force_80	667.5e6	667.5e6	Población
in4	Service_capital 67	144e9	144e9	Producción de servicios
in5	Service_out pc 71	90	90	Producción de servicios
in6	Ind_out pc 49	41.56	41.56	Producción Industrial
in7	Ind_capital_ 52	210e9	210e9	Producción Industrial

Tabla 5.2.- Entradas y salidas al subsistema empleo

5.4.2 Subsistema Empleo en Simulink

En primer lugar definimos un subsistema con las 7 entradas y la salida. A continuación de la salida instalamos 2 dispositivos de medida: un display que nos da un valor al final de la simulación y un scope que nos dibuja la función de salida con respecto al tiempo. Para poder calibrar el modelo en Simulink con respecto al modelo en Stella, transformamos las entradas por los valores iniciales que tienen en Stella.

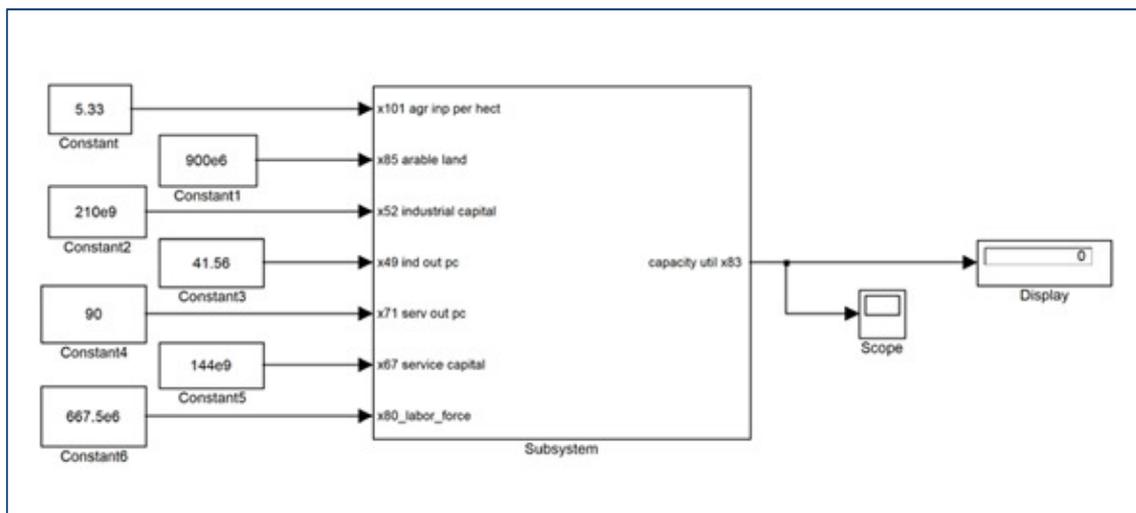


Figura 5.7.- Subsistema empleo en Simulink



En el submodelo en Stella hemos hecho lo mismo: hemos cambiamos las variables de entrada por valores constantes. Una vez construido el modelo en Simulink, los hacemos correr en los dos programas y verificaremos que dan los mismos valores en las variables de salida.

Pero construyamos primero el modelo en Simulink. Haciendo doble click en el subsistema se nos abre otra pantalla y reproducimos con bloques de Simulink el diagrama de Forrester que nos aparece en Stella siguiendo los pasos que ya hemos visto:

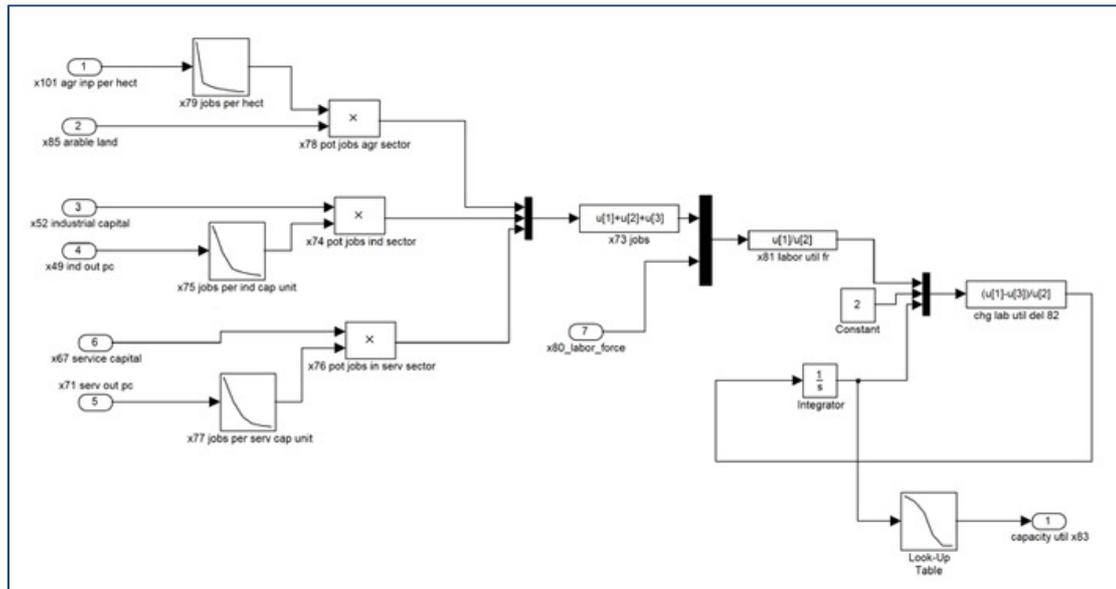


Figura 5.8.- Estructura en Simulink del subsistema empleo.

5.4.3 Calibrado del subsistema

Para comprobar si hemos construido bien el subsistema, tenemos que comparar los resultados obtenidos en ambos programas. Para ello seleccionamos las variables a comparar. Las variables que más nos preocupan son las que van a ser cedidas a otros subsistemas. En este caso la variable que va a salir al exterior va a ser capacity_util_83. Es importante que establezcamos idénticos parámetros de simulación tanto en Stella como en Simulink. Vamos a pedir a ambos programas que nos generen datos cada diez años, por lo tanto el paso de integración lo estableceremos fijo y con valor 10. También deberemos eliminar el resto de subsistemas del modelo Stella, es decir, borramos todos los subsistemas y grabamos el fichero con otro nombre, lo más lógico es guardarlo con el nombre empleo.stm. Esta operación deberemos hacerla con los 15 subsistemas, o sea que tendremos en nuestro directorio de trabajo de simulaciones Stella15 ficheros, cada uno con el nombre del subsistema.

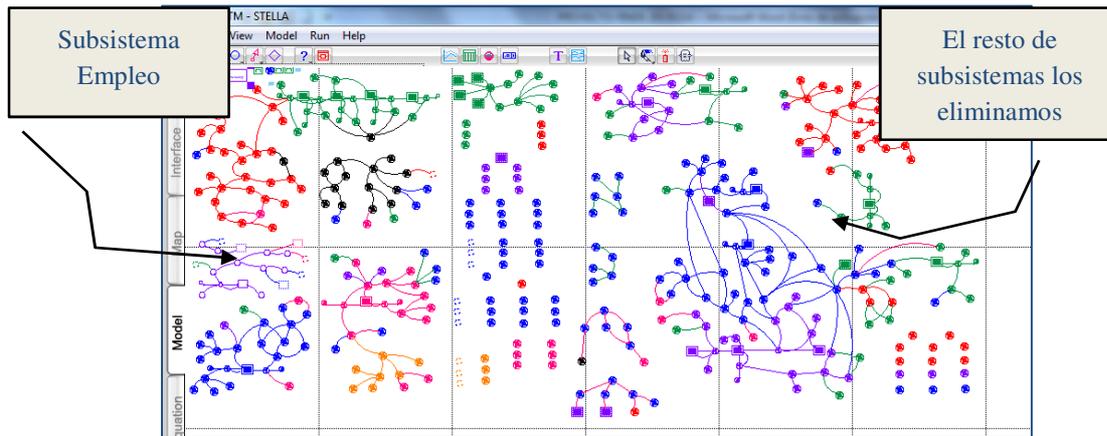


Figura 5.9.- Estructura en Simulink del subsistema empleo.

Los pasos para igualar los parámetros de simulación los hemos visto en el punto 5.1. Lo que haremos ahora será llevar los valores de Simulink y de Stella a una hoja de cálculo para poder compararlos. Para exportar los datos a Excel escribimos el siguiente código en un archivo m-file:

```
clear
sim('empleo')
d=[tout, yout]
xlswrite('empleo.xls', d, 'Datos', 'A1')
```

Este código nos lleva los datos de capacity_util_x83 cada 10 años, que es el paso de integración que elegimos en el panel de especificaciones de simulación de Simulink.

Para el caso de Stella, es más sencillo, ya que tenemos un acceso directo para generar tablas en una cinta de opciones debajo del menú. Configuramos la tabla para que nos saque el valor de capacity_util_x83 cada 10 años con una precisión del tipo free float.

Después de ejecutar las dos simulaciones y de llevar los resultados a la hoja de cálculo, podemos estimar la precisión conseguida:



Año	capacity util fr x83		%Error
	Simulink	Stella	
1900	1,000000	1,000000	0,00%
1920	0,982815	0,982906	-0,01%
1940	0,982815	0,982906	-0,01%
1960	0,982815	0,982906	-0,01%
1980	0,982815	0,982906	-0,01%
2000	0,982815	0,982906	-0,01%
2020	0,982815	0,982906	-0,01%
2040	0,982815	0,982906	-0,01%
2060	0,982815	0,982906	-0,01%
2080	0,982815	0,982906	-0,01%
2100	0,982815	0,982906	-0,01%

Tabla 5.3.- Reultados de la variable de salida capacity_util_fr_83

Para un subsistema sencillo en el que no existen bloques condicionales, este calibrado puede ser suficiente, pero para uno más complejo en el cual existan estos bloques, en los que la función que nos dé la salida depende del valor de la entrada sólo sabemos que el subsistema se comporta bien en los rangos próximos a los valores de la entrada. Como hemos visto en el ejemplo del subsistema empleo, el valor de la salida permanece constante durante toda la simulación. Esto es así porque las entradas son constantes. Para afinar el calibrado y aproximarnos al comportamiento que va a tener el subsistema una vez que trabaje interconectado vamos a hacer que las entradas cojan el valor que tienen cada año en el modelo real, pero para que no sea tan laborioso, apuntaremos datos cada 20 años.

Veamos cuáles son los valores en los que se mueven labour_force_80, agr_inp_per_hect_101, ind_out_pc_49, serv_out_pc_71, arable_land_85, services_capital_67 e industrial_capital_52 en el escenario2

año	arable land 85	service capital 67	industrial capital 52	labor force 80
1900.0	900.000.000.000.000	1,44E+17	2,10E+17	667.500.000.000.000
1920.0	982.184.095.741.387	2,16E+17	4,21E+17	809.079.255.174.028
1940.0	1.083.256.682.176.630	3,94E+17	8,48E+17	965.729.828.317.641
1960.0	1.257.597.180.634.720	7,60E+17	1,71E+18	1.340.287.870.637.720
1980.0	1.488.777.509.963.150	1,48E+18	3,34E+18	1.907.271.346.414.210
2000.0	1.733.998.971.334.280	2,79E+18	6,06E+18	2.645.812.629.363.840
2020.0	1.902.735.586.814.210	4,65E+18	9,60E+18	3.328.663.511.604.440
2040.0	1.816.733.831.803.950	6,37E+18	1,25E+19	3.651.598.167.990.800
2060.0	1.784.341.491.128.330	4,32E+18	8,62E+18	2.727.728.323.184.860
2080.0	1.755.376.772.096.440	1,74E+18	4,46E+18	1.612.480.687.181.530
Final	1.720.030.982.388.220	8,29E+17	2,60E+18	1.443.826.008.337.350



Tabla 5.4.- Valores en los que se mueven labour_force_80, agr_inp_per_hect_101, ind_out_pc_49, serv_out_pc_71, arable_land_85, services_capital_67 e industrial_capital_52 en el escenario2

año	agr inp per hect 101	in out pc 49	serv out pc 71
1900.0	5.333.333	41.562.500	90.000.000
1920.0	11.238.037	70.616.297	114.175.497
1940.0	20.381.347	118.718.257	174.285.569
1960.0	35.218.619	171.515.284	240.762.790
1980.0	58.893.719	238.682.206	334.241.553
2000.0	94.433.384	319.491.172	464.415.448
2020.0	174.172.088	410.111.292	626.903.821
2040.0	388.754.920	459.064.522	791.421.967
2060.0	299.840.669	284.592.211	790.114.063
2080.0	107.695.326	194.116.624	535.009.095
Final	28.629.638	107.151.643	265.389.562

Tabla 5.5.- Valores en los que se mueven serv_out_pc_71, arable_land_85, services_capital_67 e industrial_capital_52 en el escenario2

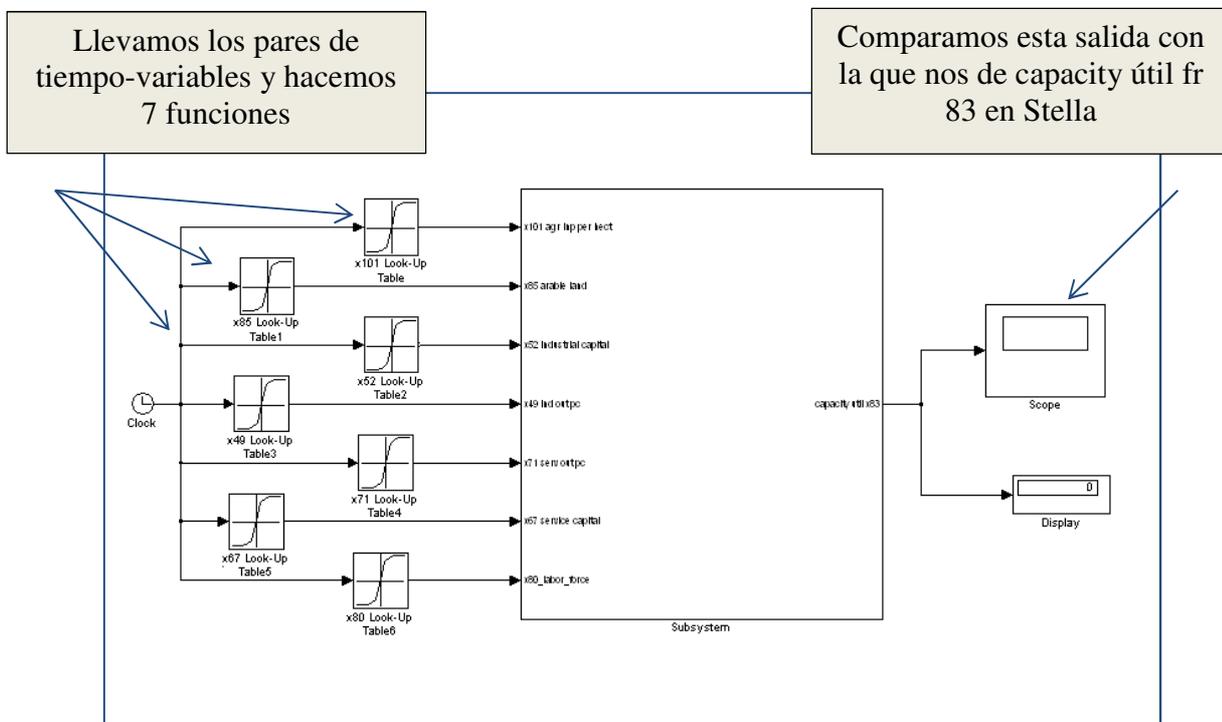


Figura 5.10.- Montaje del subsistema empleo con entradas variables



5.5 CONSTRUCCIÓN DEL SUBSISTEMA INDUSTRIAL

Elegiremos ahora un subsistema más complejo, el subsistema industrial. Es un sistema altamente interrelacionado. En su interior se cuecen 4 parámetros de vital importancia para el gran sistema mundial. Se trata de:

- la fracción consumida de la producción industrial,
- el capital industrial,
- la producción industrial y
- la producción industrial per cápita.

Este subsistema incide notablemente en la producción de alimentos, en la producción de servicios y en la contaminación, incidiendo todos ellos en la población que también interactúa con la producción industrial, facilitando a ésta la mano de obra imprescindible para todos los procesos industriales, tanto los automáticos como en los manuales.

A su vez el sistema fabril bebe del de los recursos no renovables y del tecnológico para configurar la eficiencia del capital que en combinación con el propio capital industrial determinará la producción industrial. Veamos algunas de sus interacciones utilizando algunas figuras del libro de “*Los límites del crecimiento*” en su edición de 1992.

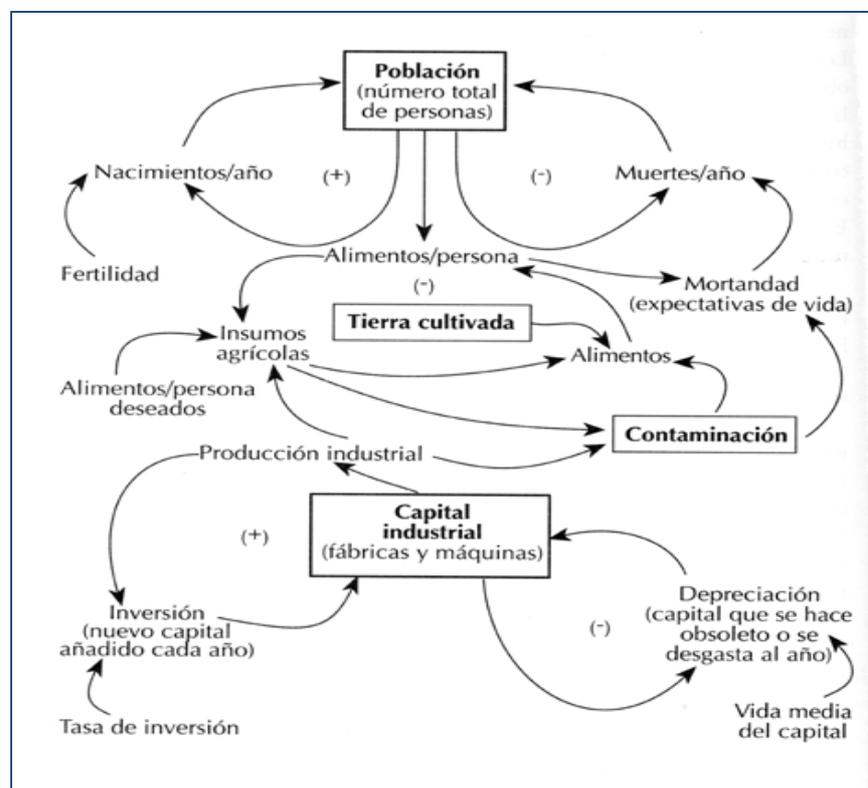


Figura 5.11.- Interacción de la Producción Industrial con la Población, la producción de Alimentos y la



contaminación.

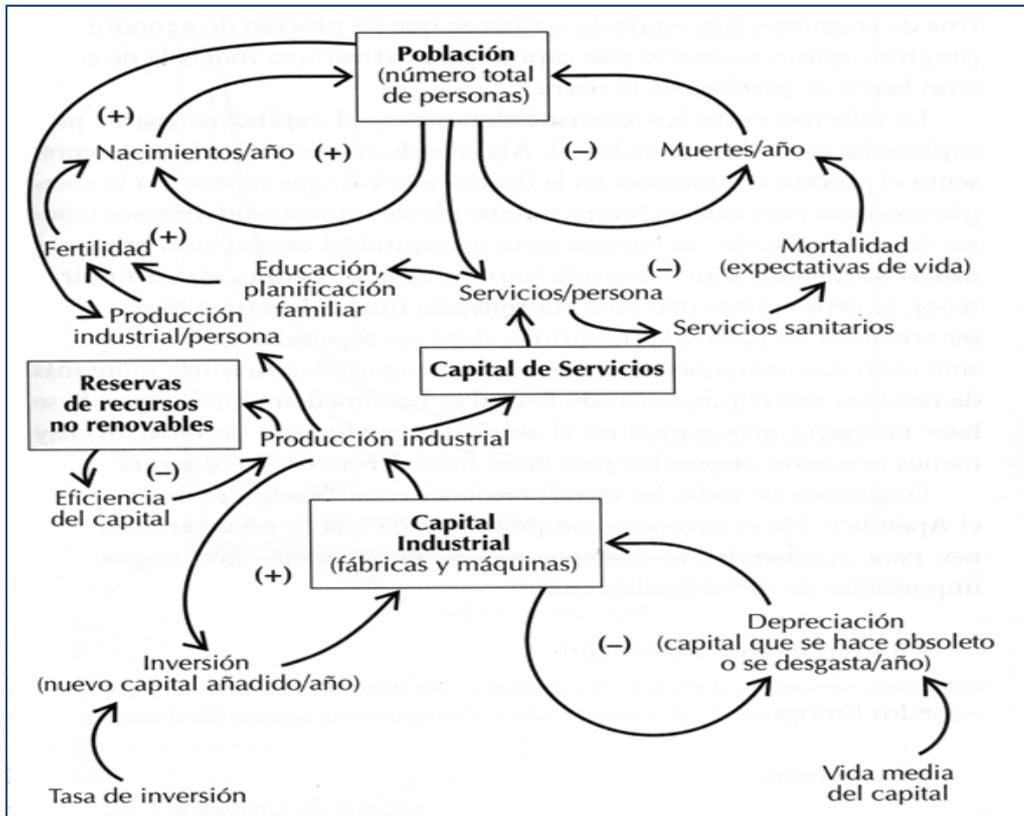


Figura 5.12.- Interacción de la Producción Industrial con la Población, el stock de recursos no renovable y la producción de Servicios.

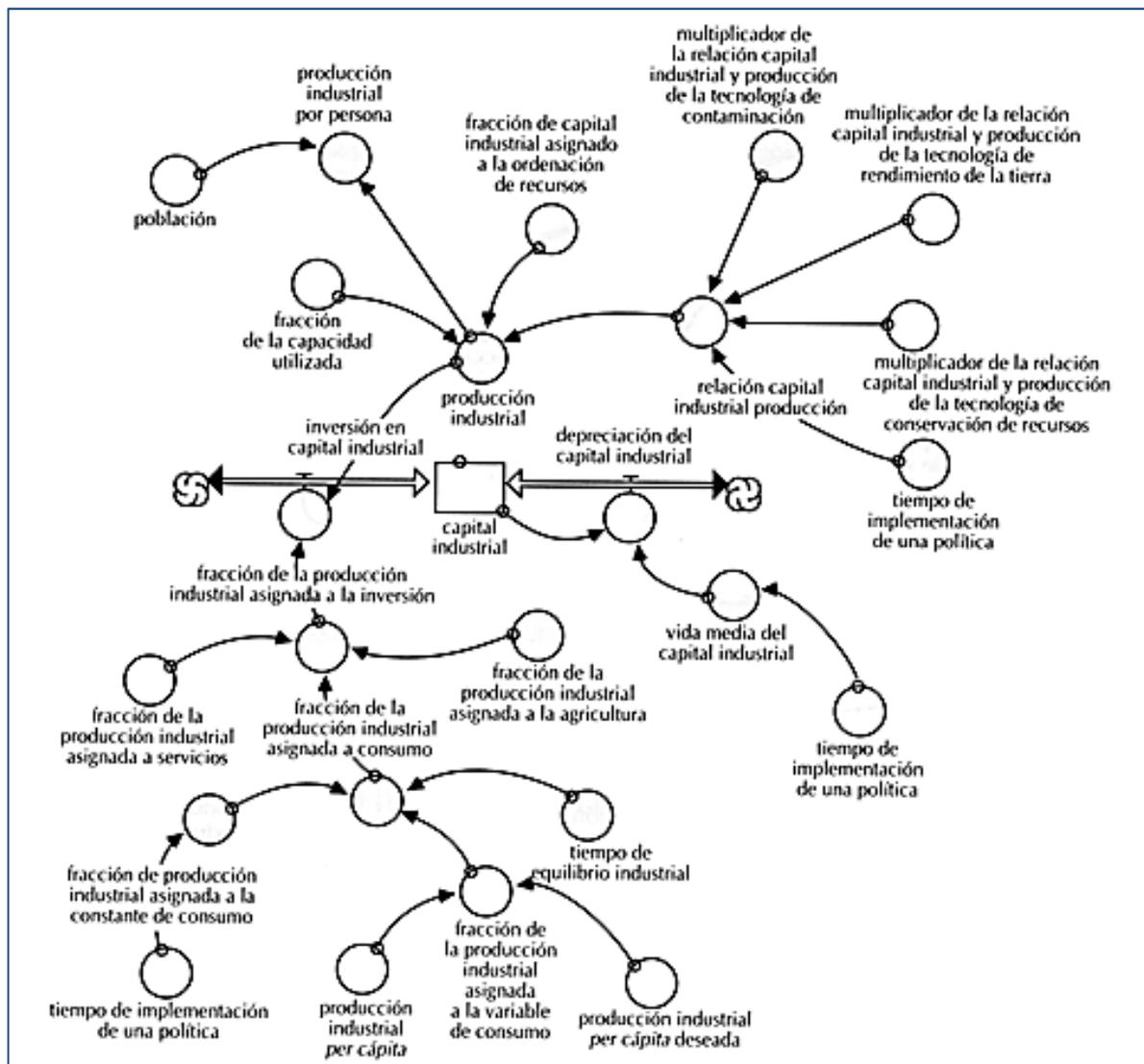


Figura 5.13.- Recorte del libro “Los límites del crecimiento” donde quedan reflejadas las influencias en el subsistema industrial.

Otra novedad con respecto al subsistema empleo es que en este subsistema ya podemos elegir políticas. Nos encontramos con la constante t_policy_year , que inicialmente tiene el valor 4000, con objeto de que en las simulaciones sin cambio de políticas (Business as usual) no entren políticas alternativas. También es un sistema altamente retroalimentado: por un lado tenemos una retroalimentación negativa por el lado de la depreciación del capital industrial y otras dos positiva por el lado de la inversión.

El juego de políticas que permite este subsistema son 2, una para prolongar la vida útil de los equipos e instalaciones industriales a partir de cierto año (t_policy_year) y otra para evaluar el impacto de una hipotética decisión global de detener el crecimiento de la producción industrial ($t_ind_equil_time$).

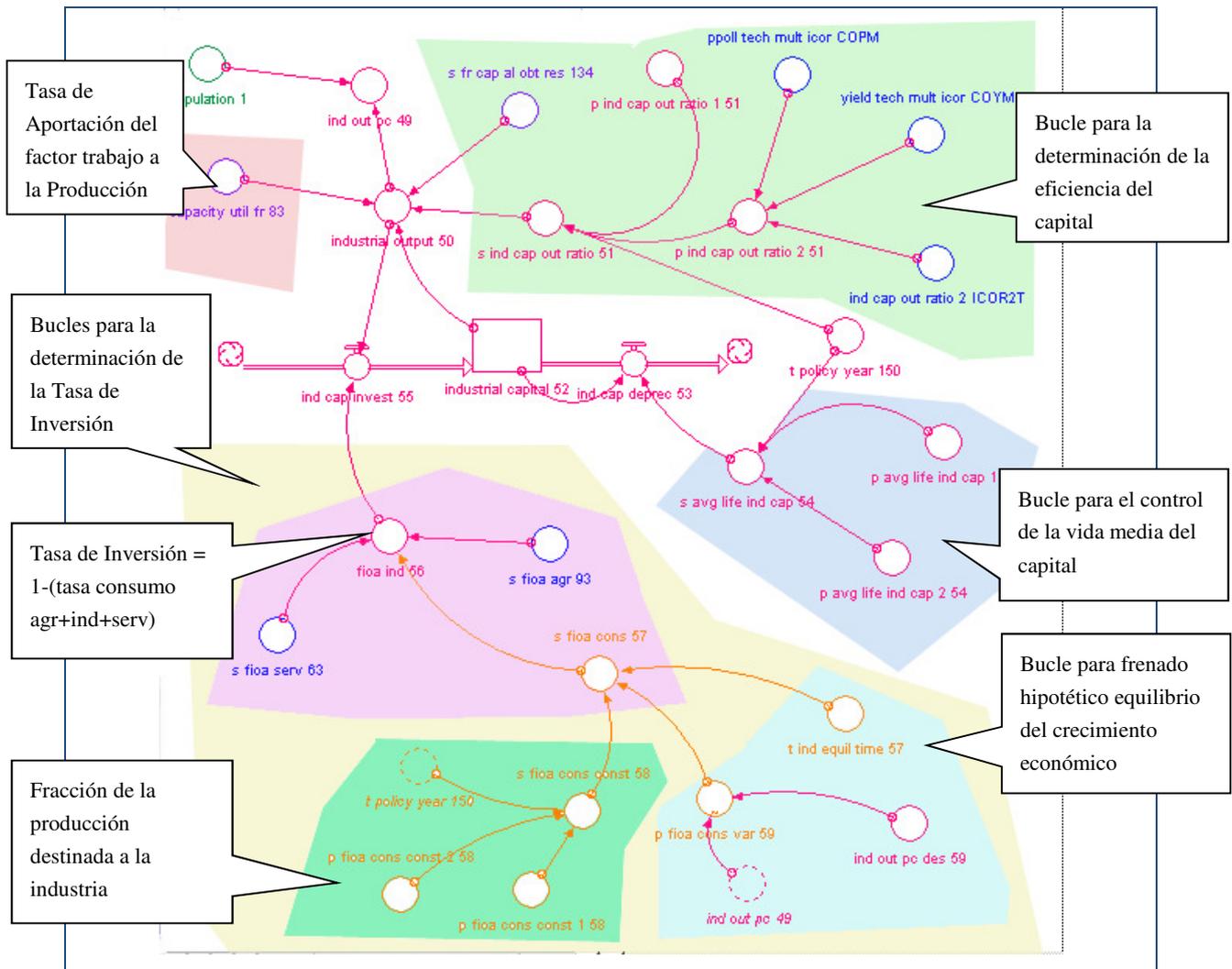


Figura 5.14.- Descripción de las áreas del subsistema industrial.

5.5.1 Definición de entradas y salidas

Veamos un recorte del subsistema en Stella con bocadillos describiendo todas las estructuras que componen este subsistema. He subrayado en verde las entradas, en rojo las constantes y en azul oscuro las salidas hacia otros subsistemas.

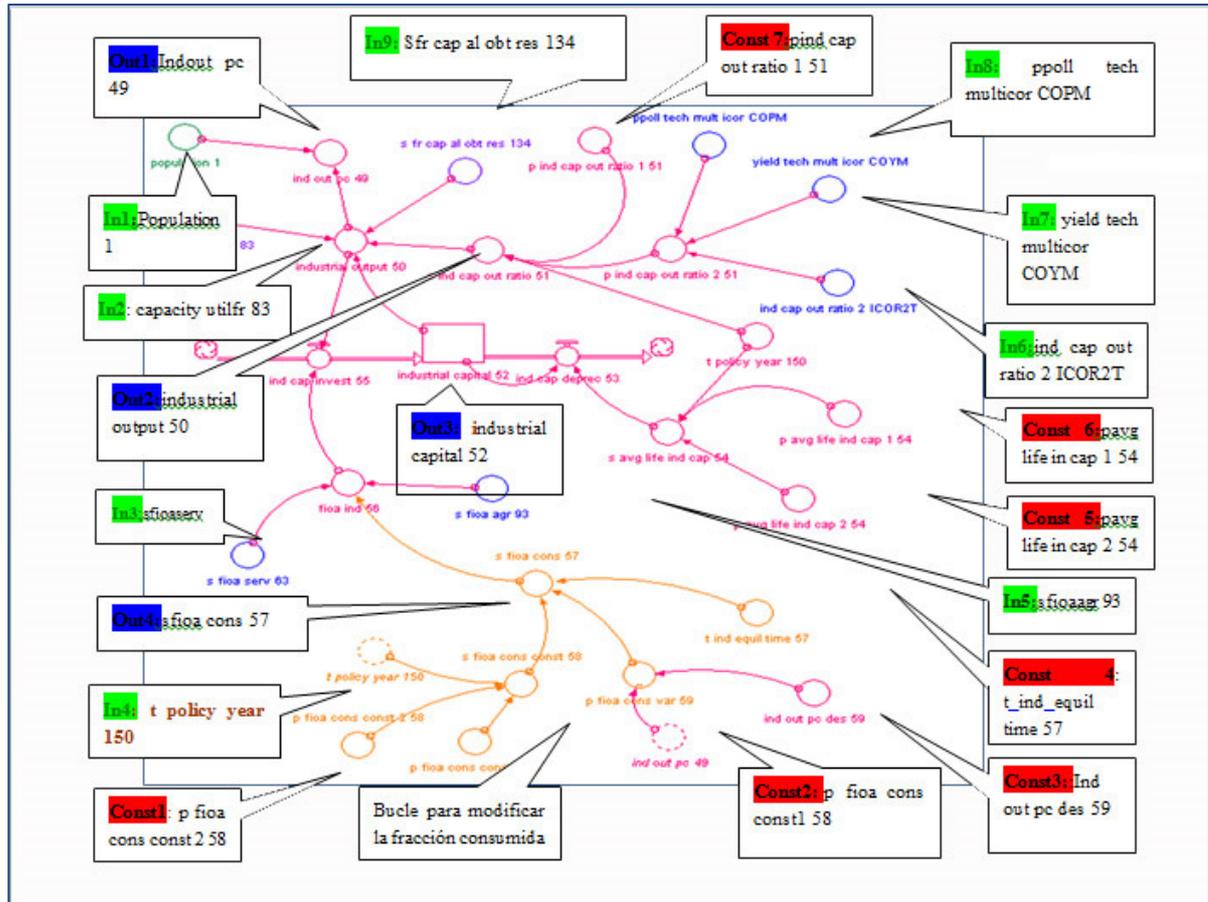


Figura 5.15.- Descripción de las variables de entrada y salida del Subsistema Industrial



Veamos ahora una tabla con los valores de las entradas y salidas que deberemos llevar al modelo traducido.

Tipo de Entrada	Nombre de la Entrada o de la Salida	Valor en t=0 (Año 1900)	Valor en t=200 (Año =2100)	Subsistema del que Procede
Const1	p_fioa cons const 2 58	0.43		
Const2	Pfioa cons const 1 58	0.43		
Const3	Ind out pc des 59	400		
Const4	Tindequil time 57	4000		(*)
Const5	Pavg life in cap 2 54	14		
Const6	Pavg life in cap 1 54	14		
Const7	Pind cap out ratio 1 51	3		
Out1	Indout pc 49			
Out2	industrial output 50			
Out3	industrial capital 52			
Out4	Sfioa cons 57			
In1	Population 1	1.3e9		Población
In2	Capacity utilfr 83	1		Empleos
In3	Sfioaserv 63	0.11		Servicios
In4	Tpolicyyear 150	4000		Global(*)
In5	Sfioaagr 93	0.11		Alimentos
In6	ind cap out ratio 2 ICOR2T	3		Recursos no Renovables
In7	yield tech multicolor COYM	1		Alimentos
In8	ppoll tech multicolor COPM	1		Contaminación
In9	Sfr cap al obt res 134	0.05		Recursos no Renovables

Tabla 5.6.- Tabla con los valores de las variables de entrada en el año 1900 (*) Fecha de referencia para manejar alternativas políticas

5.5.2 Subsistema Industrial en Simulink

En primer lugar definimos un subsistema con las 7 entradas y la salida. A continuación de la salida instalamos 2 dispositivos de medida: un display que nos da un valor al final de la simulación y un scope que nos dibuja la función de salida con respecto al tiempo. Para poder calibrar el modelo en Simulink con respecto al modelo en Stella, transformamos las entradas por los valores iniciales que tienen en Stella.

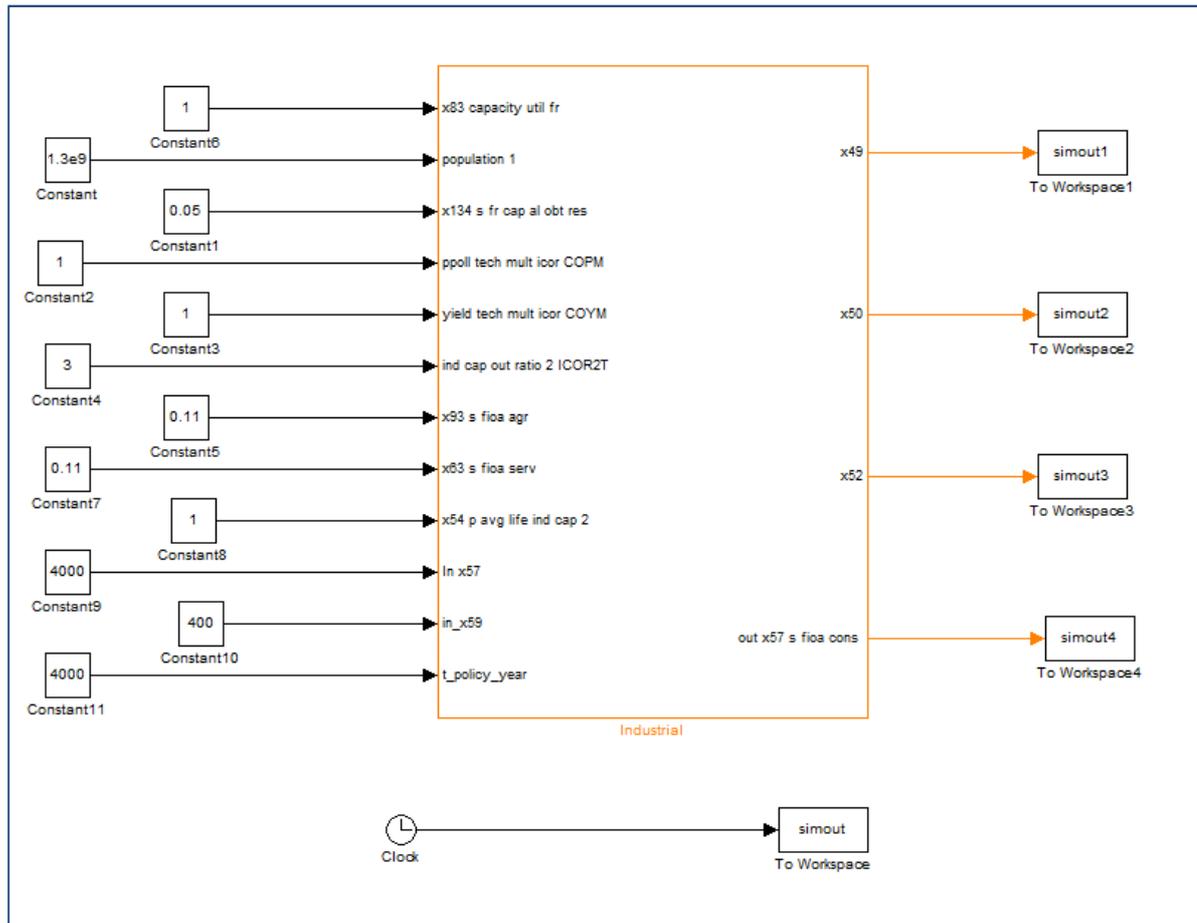


Figura 5.15.- Aspecto final del subsistema industrial traducido a Simulink

En el submodelo en Stella hemos hecho lo mismo, hemos cambiamos las variables de entrada por valores constantes. Una vez construido el modelo en Simulink, los hacemos correr en los dos programas y verificaremos que dan los mismos valores en las variables de salida.

Pero construyamos primero el modelo en Simulink. Haciendo doble click en el subsistema se nos abre otra pantalla y reproducimos con bloques de Simulink el diagrama de Forrester que nos aparece en Stella siguiendo los pasos que ya hemos visto.

El subsistema aparece completamente construido en la figura inferior. En la figura inferior, en él aparecen en naranja los valores de entrada constantes, en azul oscuro, las variables de salida y en azul claro el stock principal del capital industrial.

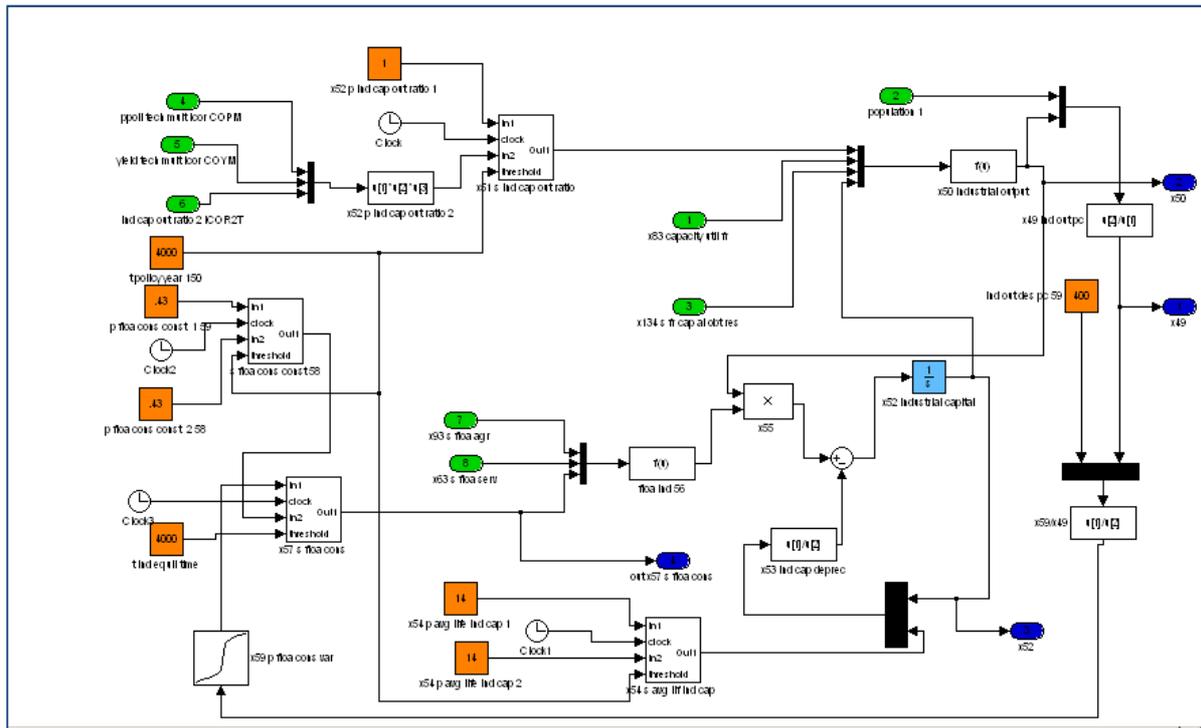


Figura 5.16.- Estructura del subsistema industrial en simulink

5.5.3 Calibrado del subsistema con entradas constantes

Para comprobar si hemos construido bien el subsistema, tenemos que comparar los resultados obtenidos en ambos programas. Para ello seleccionamos las variables a comparar. Las variables que más nos preocupan son las que van a ser cedidas a otros subsistemas: `ind_out_pc_49`, `industrial_output_50`, `industrial_capital_52` y `s_fioa_cons_57`.

Año	Valores en Stella		Valores en Simulink		%Error	
	Industrial output	Industrial capital	Industrial output	Industrial capital	Industrial output	Industrial capital
1900	6,65E+10	2,10E+11	6,65E+16	2,10E+11	0,00%	0,00%
1920	1,46E+11	4,62E+11	1,46E+17	4,62E+11	0,00%	0,00%
1940	3,22E+11	1,02E+12	3,22E+17	1,02E+12	0,00%	0,00%
1960	7,07E+11	2,23E+12	7,07E+17	2,23E+12	0,00%	0,00%
1980	1,56E+12	4,91E+12	1,56E+18	4,91E+12	0,00%	0,00%
2000	3,42E+12	1,08E+13	3,42E+18	1,08E+13	0,00%	0,00%
2020	7,52E+12	2,38E+13	7,52E+18	2,38E+13	0,00%	0,00%
2040	1,65E+13	5,22E+13	1,65E+19	5,22E+13	0,00%	0,00%
2060	3,64E+13	1,15E+14	3,64E+19	1,15E+14	0,00%	0,00%
2080	8,00E+13	2,53E+14	8,00E+19	2,53E+14	0,00%	0,00%
2100	1,76E+14	5,56E+14	1,76E+20	5,56E+14	0,00%	0,00%



Tabla 5.7.- Calibrado del subsistema industrial aislado tanto en stella como en Simulink, con su porcentaje de error.

5.5.4 Calibrado del subsistema con entradas variables

Para un subsistema sencillo en el que no existen bloques condicionales, este calibrado puede ser suficiente, pero para uno más complejo en el cual existan estos bloques, en los que la función que nos dé la salida depende del valor de la entrada sólo sabemos que el subsistema se comporta bien en los rangos próximos a los valores de la entrada. Como hemos visto en el ejemplo del subsistema empleo, el valor de la salida permanece constante durante toda la simulación. Esto es así porque las entradas son constantes. Para afinar el calibrado y aproximarnos al comportamiento que va a tener el subsistema una vez que trabaje interconectado vamos a hacer que las entradas cojan el valor que tienen cada año en el modelo real, pero para que no sea tan laborioso, apuntaremos datos cada 10 años.

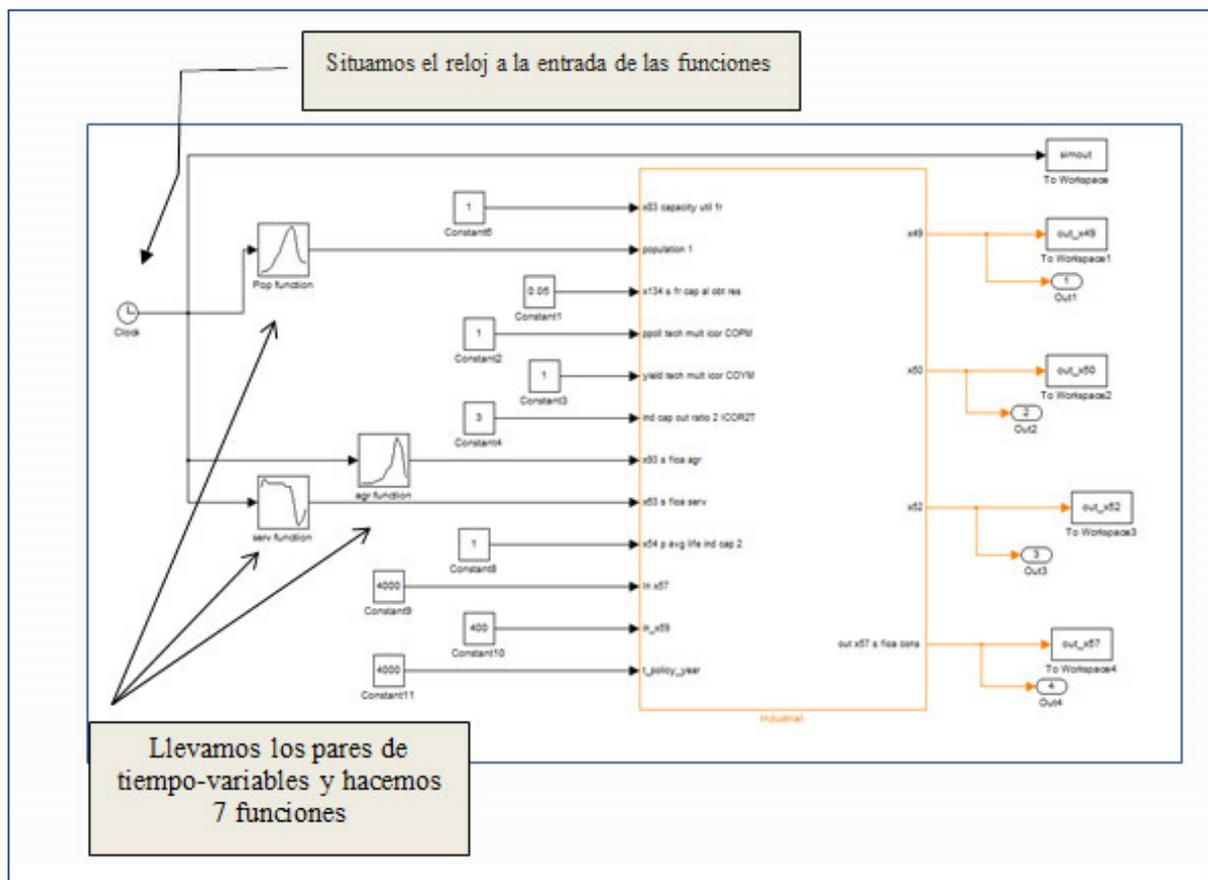


Figura 5.17.- Subsistema industrial en Simulink con las entradas variables.

Modificaremos las entradas de la población y los porcentajes s_{fioa_agr} y s_{fioa_serv} , para lo que construiremos tres funciones tiempo-valor con los valores del escenario2. Lugo compararemos los resultados del modelo en Simulink con los del escenario2 de Stella.



time	Valores Stella		Valores Simulink		%Error	
	industrial capital 52	industrial output 50	industrial capital 52	industrial output 50	industrial capital 52	industrial output 50
1900.0	2,10E+11	6,65E+10	2,10E+11	6,65E+10	0,00%	0,00%
1920.0	4,20E+11	1,33E+11	4,20E+11	1,33E+11	0,00%	0,00%
1940.0	8,53E+11	2,70E+11	8,53E+11	2,70E+11	0,00%	0,00%
1960.0	1,73E+12	5,49E+11	1,73E+12	5,49E+11	0,00%	0,00%
1980.0	3,31E+12	1,05E+12	3,31E+12	1,05E+12	0,00%	0,00%
2000.0	5,92E+12	1,87E+12	5,92E+12	1,87E+12	0,00%	0,00%
2020.0	9,33E+12	2,96E+12	9,33E+12	2,96E+12	0,00%	0,00%
2040.0	1,18E+13	3,47E+12	1,18E+13	3,47E+12	0,00%	0,00%
2060.0	8,28E+12	1,49E+12	8,28E+12	1,49E+12	0,00%	0,00%
2080.0	4,32E+12	6,19E+11	4,32E+12	6,19E+11	0,00%	0,00%
Final	2,53E+12	3,29E+11	2,53E+12	3,29E+11	0,00%	0,00%

Tabla 5.8.- Calibrado del subsistema industrial con entradas variables.



5.6 SIMULACIÓN DE POLÍTICAS USANDO M-FILES

Vamos a empezar a ensayar el modelo. Primero vamos a crear un fichero m-file para poder simular políticas como un eventual alargamiento de la vida útil de las máquinas e instalaciones industriales, el año en que se toma la decisión oscilará entre el 1998 y el 2018.

Escribiremos un código que introduzca valores en el modelo y haga una serie de simulaciones, en las que los valores de t oscilarían entre 1998 y 2018, y la vida media del capital industrial se alargará de 14 a 28. Correremos 100 simulaciones. El código es el código 1 y se encuentra en el anexo1

El resultado de ejecutar este código fue la siguiente gráfica:

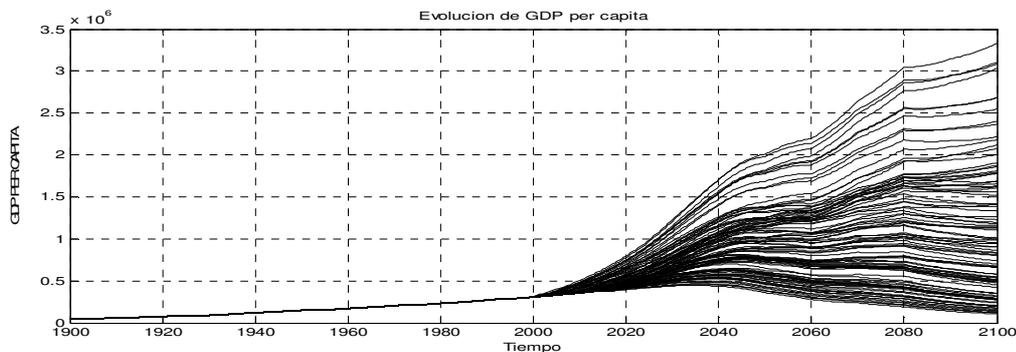


Figura 5.18.- Resultado de ejecutar una simulación sobre el subsistema industrial en el que se hace variar la vida media del capital industrial entre 14 y 28

5.6.1 Introducción a las correlaciones y al análisis de sensibilidad con el subsistema industrial

Vista esta gráfica, uno se puede plantear lo siguiente:

- Se puede apreciar que x_{49} se hace más alto cuanto antes se inicie el cambio de política y cuanto más alto sea el periodo de amortización.
- ¿Cuál es la correlación entre tiempo y máximo valor de la producción industrial per cápita x_{49} ,
- ¿Cuál es la correlación entre la amortización del capital industrial y el máximo valor de la producción industrial per cápita x_{49} ?

Para ello vamos a escribir otro código que nos relacione esos valores. Por un lado calcularemos el incremento porcentual del alargamiento del periodo de amortización y el del adelanto de la política y por otro el del máximo valor de x_{49} obtenido. Luego graficaremos estos porcentajes en un diagrama 3d y vemos qué combinaciones han sido las que nos han dado mayor valor de x_{49} .

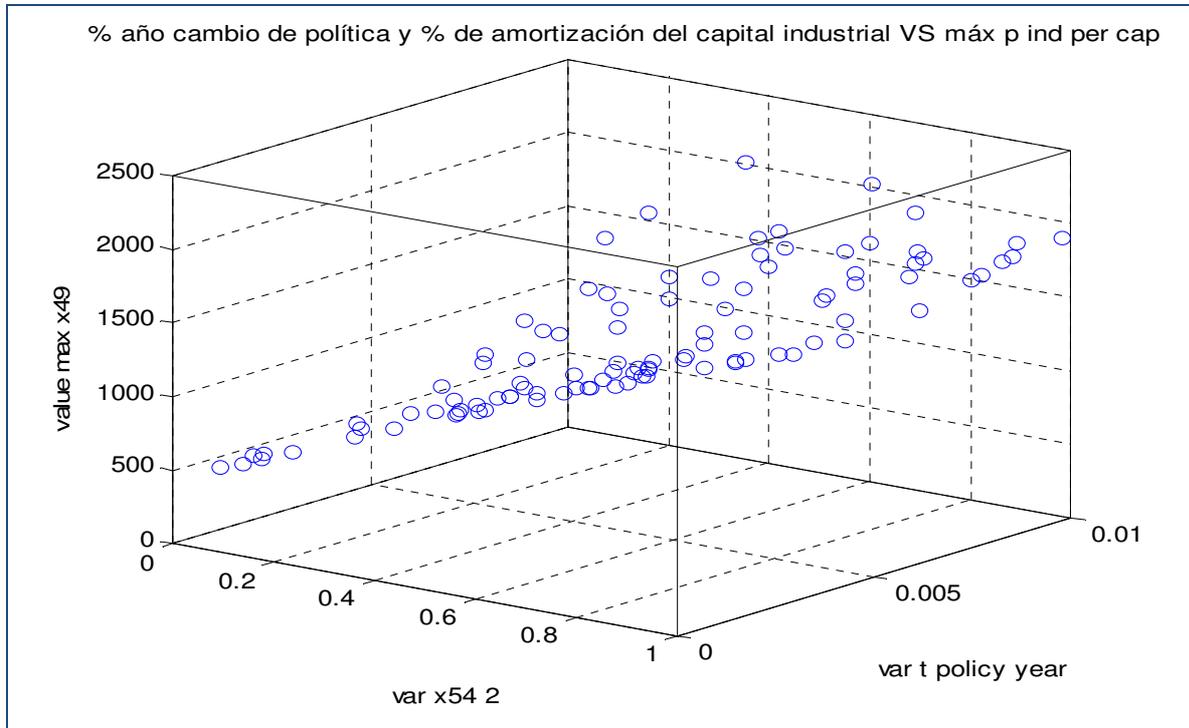


Figura 5.19.- Vista 3d donde vemos la relación entre el alargamiento del periodo de amortización del capital industrial y el máximo x49 obtenido.

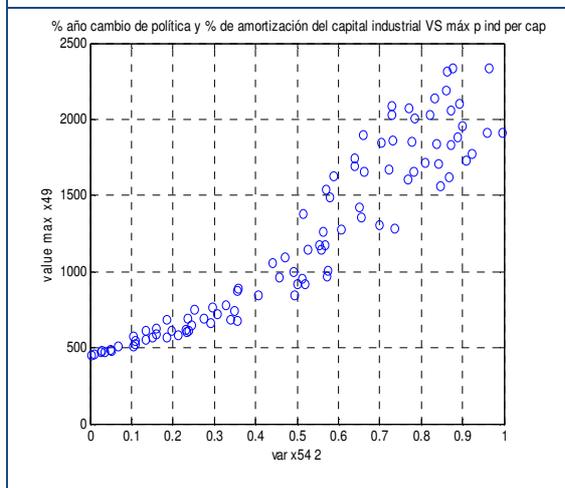


Figura 5.20.- Vista lateral del plotado 3d donde vemos la relación entre el alargamiento del periodo de amortización del capital industrial y el máximo x49 obtenido.

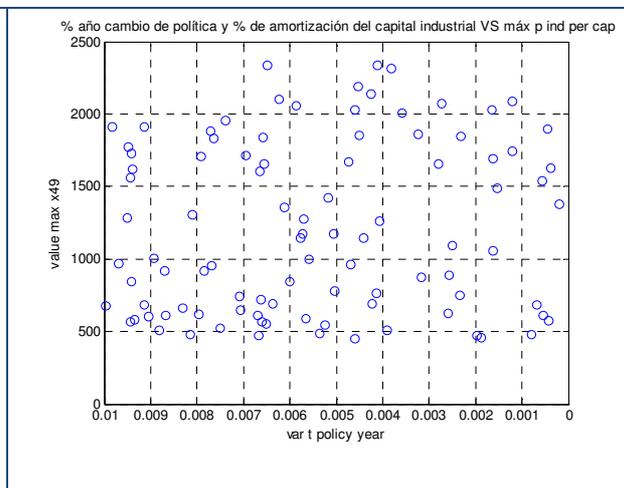


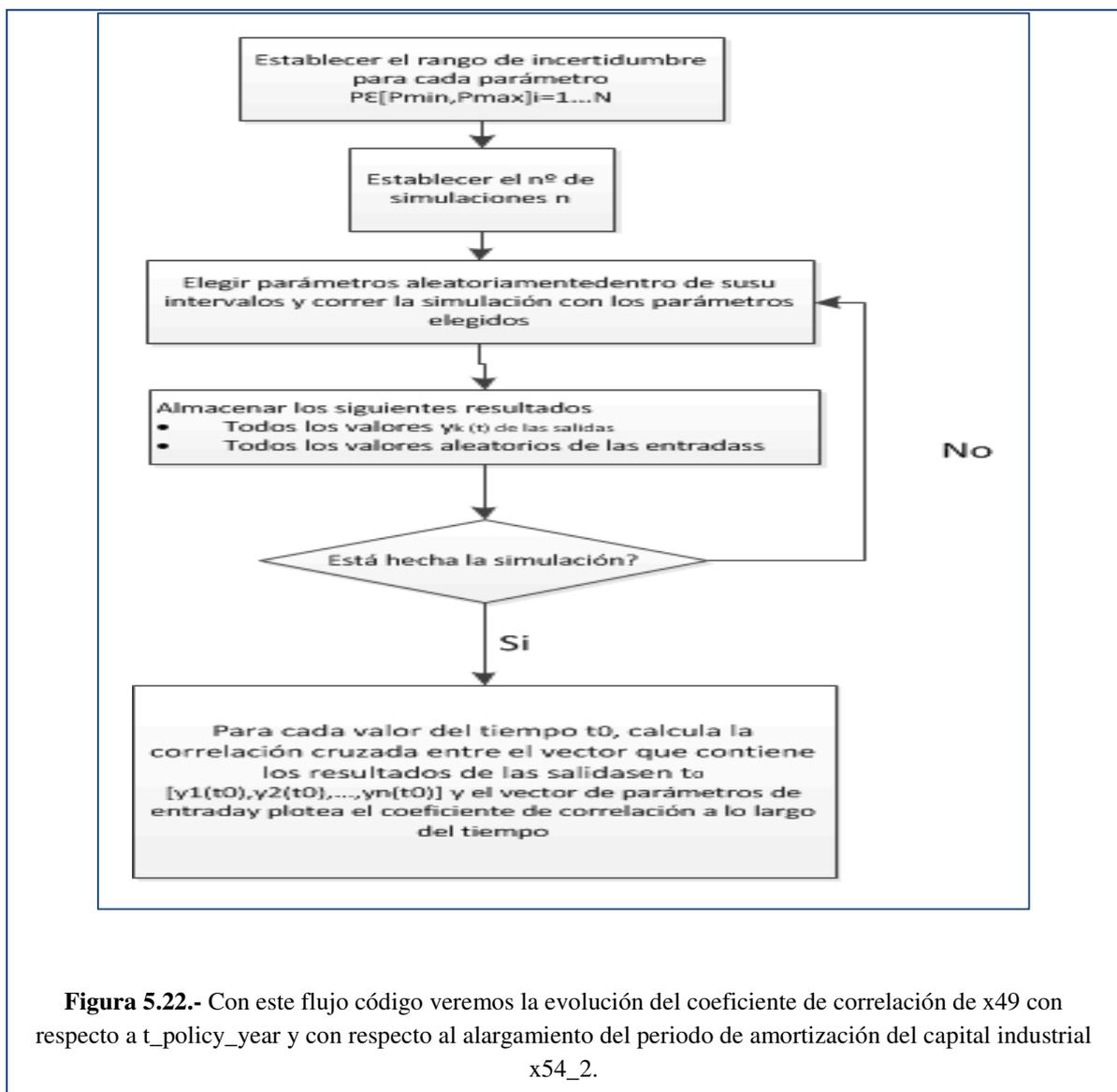
Figura 5.21.- Vista lateral del plotado 3d donde vemos la relación entre el año de cambio de política y el máximo x49 obtenido.



5.6.2 Avanzando un poco más las correlaciones. Uso de la función corrcoef.

En probabilidad y estadística, la **correlación** indica la fuerza y la dirección de una relación lineal y proporcionalidad entre dos variables estadísticas. Se considera que dos variables cuantitativas están correlacionadas cuando los valores de una de ellas varían sistemáticamente con respecto a los valores homónimos de la otra: si tenemos dos variables (A y B) existe correlación si al aumentar los valores de A lo hacen también los de B y viceversa. La correlación entre dos variables no implica, por sí misma, ninguna relación de causalidad.

El coeficiente de correlación nos dice cómo de buena es la relación. Valores próximos a 1 ó -1 nos dirán que la correlación es buena. Según las gráficas del epígrafe anterior parece que entre x_{49} y x_{54} hay una evidente correlación, sin embargo entre el año de cambio de política no parece en este caso tan buena. Intentemos poner un número a estas estimaciones, veamos cómo de buena es la correlación utilizando la función corrcoef y ploteando sus resultados. El esquema de flujo del código sería el siguiente:



Pero veamos las suposiciones que vamos a hacer en este experimento, ya que hay más políticas en el subsector. En efecto, también podemos limitar la fracción de la producción industrial consumida, por lo que sobrarán más recursos más recursos para invertirlos en reinversión y ampliar el capital industrial.

Ahora vamos a combinar un aumento de la amortización de la vida útil del capital con un equilibrado de la fracción consumida del capital. Para ello Meadows y compañía sitúan un nivel de renta deseada en 400. Cuando activamos este ramal del world3, la producción industrial_pc se compara con la deseada, y el resultado de este cociente se introduce en una tabla gráfica que nos devuelve el valor de la fracción consumida del capital para conseguir el nivel de renta industrial deseada.

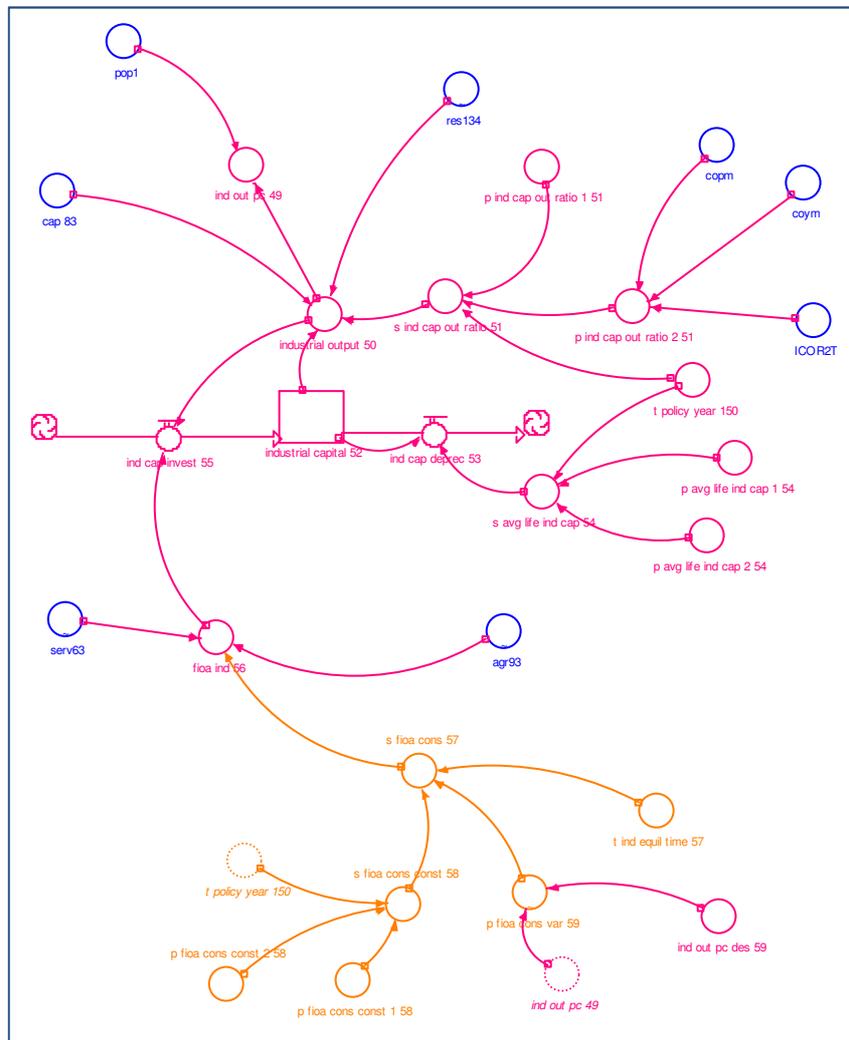


Figura 5.23.- Recorte del subsistema industrial.

Por un lado vamos a introducir más capital con la reinversión, y por otro vamos retirar menos capital alargando el periodo de amortización.



$$\underline{\text{Ind cap invest 55}} = \text{fioa_ind_56} * \text{industrial_output_50}$$

$$\underline{\text{Fioa ind 56}} = (1 - \text{agr93} - \text{serv63} - \text{s_fioa_cons_57})$$

$$\underline{\text{Ind cap deprec 53}} = \text{industrial_capital_52} / \text{s_avg_life_ind_cap_54}$$

Para modificar el alargamiento del periodo de amortización del capital industrial, modificamos t_policy_year entre 1998 y 2008 alargándolo entre 14 y 28 y por otro la fracción consumida modificando $t_ind_equil_time$, también entre 1998 y 2008 y por otro $ind_out_pc_des$, entre 350 y 450, y veamos que coeficiente de correlación hay entre modificar estos valores y el valor de la producción industrial per cápita obtenida. El código de esta. El código es el código 3 del Anexo1.

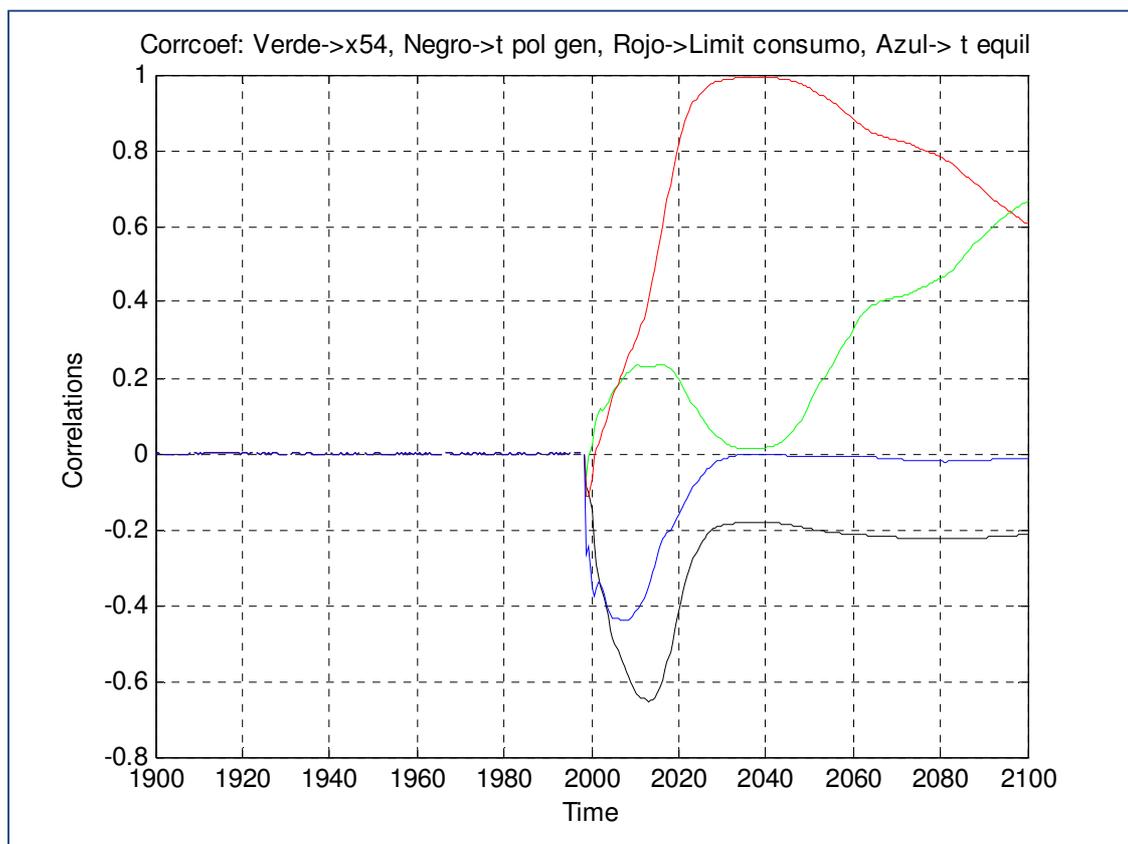


Figura 5.24.- Análisis de las correlaciones entre t_policy_year (negro), la fracción consumida de la producción industrial (rojo), $t_ind_eqil_time$ (azul) y el alargamiento de la vida útil del capital industrial (verde).

5.6.3 Conclusiones al experimento

Podemos ver que introducir límites al consumo tiene una relación positiva próxima a 1 desde 2030 a 2050, mientras que en este periodo la incidencia del alargamiento en la vida útil del capital industrial casi no tiene influencia. ¿Será por esto que este último lazo no está contemplado en ningún escenario como dijimos en el punto 3.3.14. Por otra parte, el año de cambio de políticas (azul y negro) tiene una incidencia inversa, o sea cuanto más se retrase la toma de decisiones, menos crece la producción industrial per cápita.



Hay más factores influyentes en la producción industrial, en efecto. Como hemos visto en el punto [3.3.6](#), la mejora en la eficiencia en la obtención de recursos limitará la proporción de capital industrial destinada a la obtención de recursos según la expresión:

$$\text{Industrial_output} = \text{industrial_capital_52} * \frac{(1 - \text{s_fr_cap_al_obt_res_134})}{\text{s_ind_cap_out_ratio_51}} * \text{capacity_util_fr_83}$$

Siendo `s_fr_cap_al_obt_res_134` el parámetro que viene del subsector energético. Para hacer el experimento de correlación entre este parámetro y `x49`, vamos a ir aguas arriba hasta el subsistema energético. En el siguiente punto vamos a ensamblar el subsistema industrial y el energético y los vamos a aprobar conjuntamente. Y haremos los experimentos sobre las variables que dan valor a `s_fr_cap_al_obt_res_134`.



5.7 ANÁLISIS ENERGÍA - PRODUCCIÓN INDUSTRIAL

La función de Producción depende del Capital Industrial, de un índice tecnológico y de la fracción máxima de Población Activa destinable a producción (normalmente 1 o más, salvo epidemias, guerras...)

industrial_output_50 =

$$\text{industrial_capital_52} * \frac{(1 - \text{s_fr_cap_al_obt_res_134})}{\text{s_ind_cap_out_ratio_51}} * \text{capacity_util_fr_83}$$

Nombre Variable	Proviene	Varía de
s_fr_cap_al_obt_res_134	Nr Resources	0-1
s_ind_cap_out_ratio_51	Nr Resources	3-....

Tabla 5.9.- Rangos de variación de las variables compartidas por el subsistema industrial y el subsistema energético

s_ind_cap_out_ratio_51 viene de 3 subsistemas y sería igual a:

s ind cap out ratio 51 =

$$\text{ind_cap_out_ratio_2_ICOR2T} * \text{yield_tech_mult_icor_COYM} * \text{ppoll_tech_mult_icor_COPM}$$

Vayamos ahora al subsistema energía:

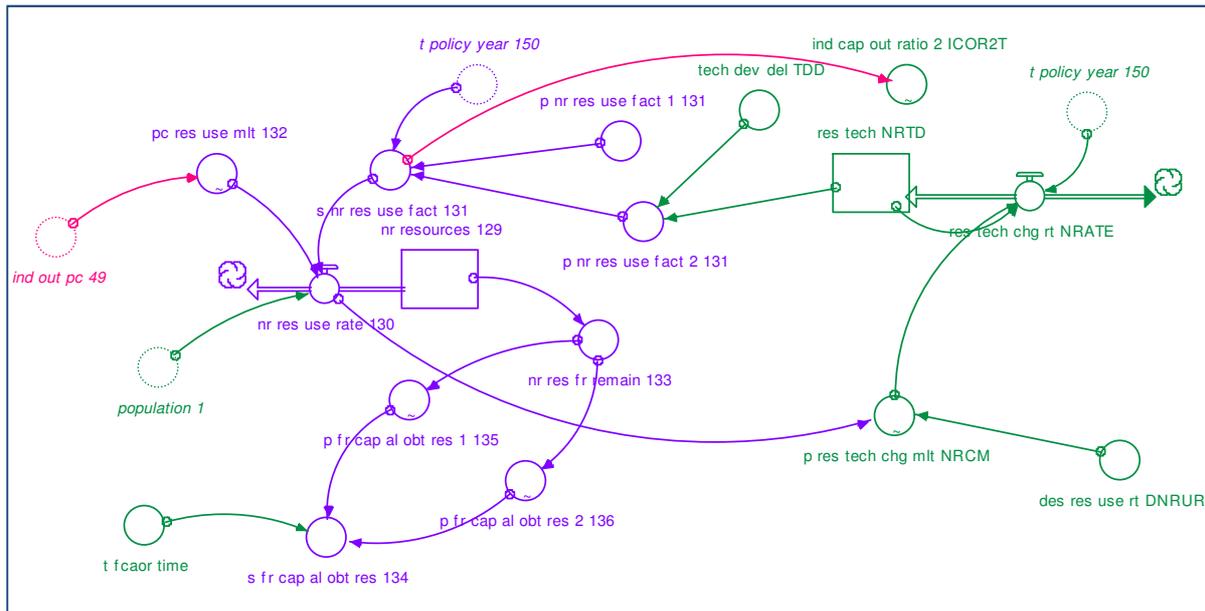


Figura 5.25.- Recorte del subsistema energía

Las políticas son: t_fcaor_time y t_policy_year . T_fcaor_time nos cambia el $s_fr_cap_al_obt_res_134$ que es el coste en capital de la extracción de recursos no renovables. Para ello cambia la relación entre recursos restantes – coste de la obtención de recursos.

A medida que los yacimientos de petróleo, gas, uranio o carbón se van agotando, resulta más costoso extraer cada unidad de producción. Pero en la opción 2 ciertas mejoras tecnológicas han permitido retrasar este aumento en el precio, que no empieza a manifestarse hasta que hemos consumido el 70% de los recursos

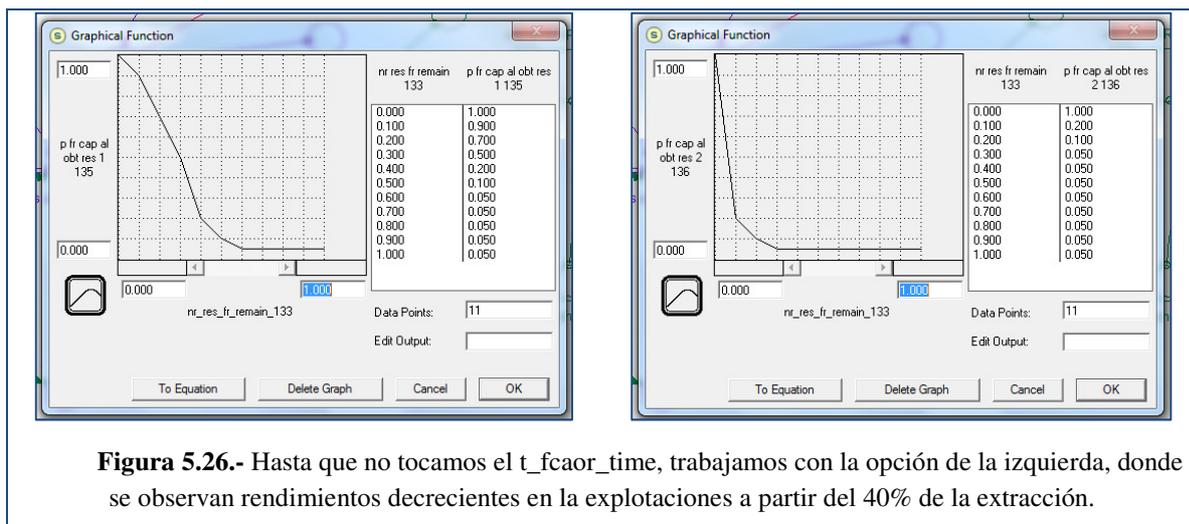


Figura 5.26.- Hasta que no tocamos el t_fcaor_time , trabajamos con la opción de la izquierda, donde se observan rendimientos decrecientes en la explotaciones a partir del 40% de la extracción.

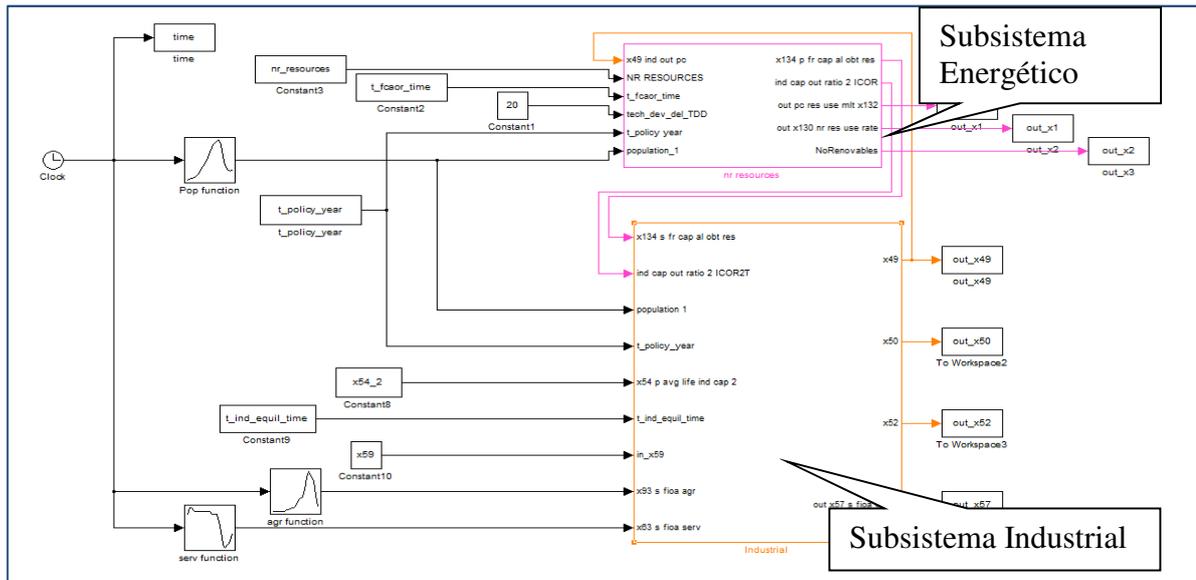


Figura 5.27.- Subsistemas industrial y energía acoplados.

Vamos a acoplar al subsistema industrial el subsistema *recursos no renovables*. Los otros subsistemas como el subsistema *polución*, el subsistema *agrícola* y el *empleos*. Todos estos sistemas en su conjunto determinarían el gran subsistema que podríamos denominar *Producción*. Hemos visto que en el subsistema industrial teníamos tres entradas variables procedentes de otros tres subsistemas que hemos considerado constantes en una primera instancia y que posteriormente hemos introducido variables con funciones temporales extraídas del modelo completo. Queremos ahora conocer mejor estos subsistemas para seleccionar los parámetros más críticos de cada subsistema para cuando hagamos el análisis global. Por ahora hemos visto que influyen mucho ajustar bien la producción industrial per cápita deseada y la vida media del capital industrial. La vida media del capital industrial se ajusta temporalmente con el parámetro “Tiempo de implementación de una Política” que también se usa para ajustar el “Multiplicador de la relación capital industrial y producción de la tecnología de contaminación”, el “Multiplicador de la relación capital industrial y producción de la tecnología del rendimiento de la tierra” y el “Multiplicador de la relación capital industrial y producción de la tecnología de conservación de recursos”.

5.7.1 Correlaciones entre las políticas energéticas y de limitación del consumo con la producción industrial per cápita

Vamos a repetir el experimento anterior, añadiendo t_{fcaor_time} y $p_res_tech_chg_mlt_NRCM$, que como ya vimos en el escenario 6 la cambiamos a -0.03. En el experimento, la haremos variar entre 0 y -0.05. El código de dicho experimento está en el anexo 1 y es el código4

Descripción de la Variable	Nombre	Oscila entre
----------------------------	--------	--------------



		en Stella
Tiempo de implementación de una Política		1998,2018
	t policy y ear 150	
Tiempo de tecnología de extracción de recursos		1998,2018
	t fcaor time	
Multiplicador de la tasa de cambio de tecnologías de conservación de recursos		0, -0.05
	p res tech chg mlt NRCM	

Tabla 5.10.- Rangos de variación de las entradas t_policy_year_150, t_fcaor_time, p_res_tech_chg_mlt_NRCM

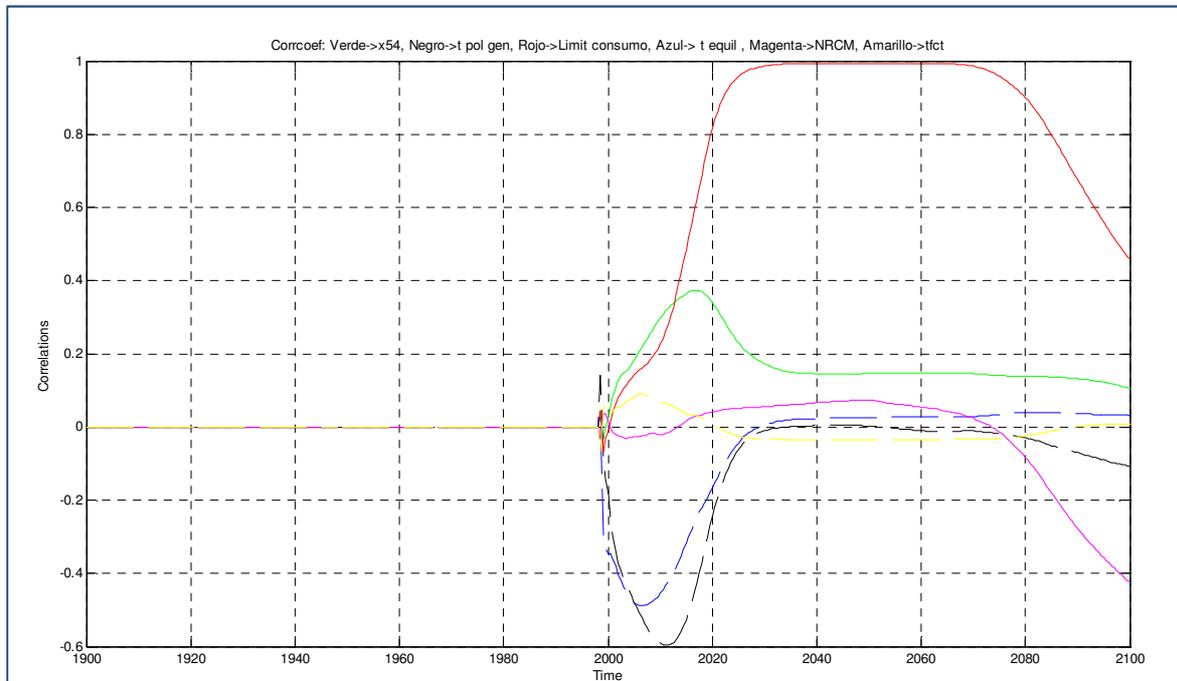


Figura 5.28.- Correlaciones entre el alargamiento de la vida del capital industrial (Verde), Año de cambio de la política general (negro), limitaciones al consumo (rojo), año de inicio de la limitación al consumo (azul), mejoras en la eficiencia energética (magenta) y año de implantación de políticas de aprovechamiento de los recursos no renovables restantes (amarillo)

5.7.2 Conclusiones al experimento

Hemos reproducido en este experimento parte de los escenarios 6 y 9. En el escenario 6 se mejoran las tecnologías de extracción y se mejora también la eficiencia energética, y en el escenario 9 se introducen las políticas estabilizadoras de producción. Con este pequeño juego de correlaciones, lo que queremos ver es qué políticas tienen más incidencia en el PIB per cápita. En principio, sólo sobre estos dos subsistemas agrupados, no podemos saberlo, ya que como hemos visto, estamos metiendo forzados valores de otros subsistemas, pero nos sirve esta práctica para el diseño de los experimentos que



hagamos sobre el modelo global. Pensemos que estamos metiendo la población con los valores del escenario2 sin tener en cuenta las modificaciones que sobre la población puedan efectuar las políticas que hemos introducido en el experimento.



6. MONTAJE COMPLETO DE LA APLICACIÓN. CÓMO USAR SIMUWORLD3.





6.1 SELECCIÓN DE ENTRADAS Y SALIDAS

Tal y como hemos visto en los montajes de los modelos industrial e industrial-energía los modelos presentan una estructura como esta:

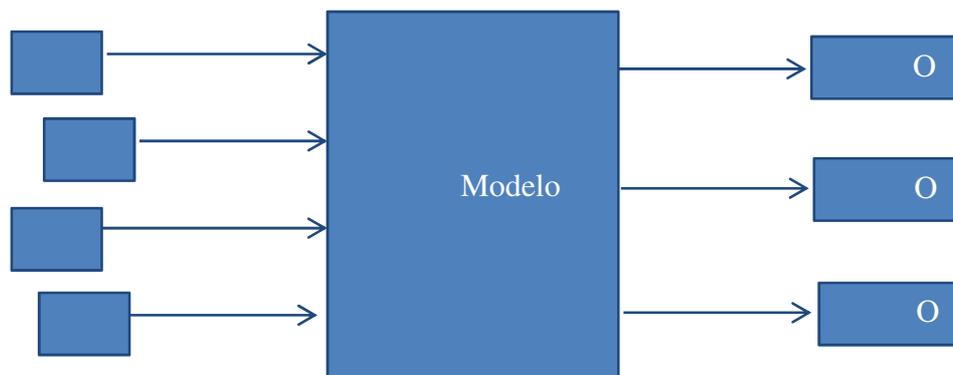


Figura 6.1.- Vista esquemática de la estructura que tendrá simuworld3.mdl

In_1, In_2, \dots, In_n se corresponden con las n entradas que podemos querer cambiar para simular políticas y escenarios. Estas entradas pueden ser de tres tipos: Tiempos de implementación de políticas, Tiempos de retrasos en la aplicación de políticas y constantes modificables para cambio de políticas. Las salidas $out_1, out_2, \dots, out_m$ serán las m variables que queremos graficar. La selección de estas entradas y salidas depende de lo que queramos hacer con el modelo. Lo primero que queremos hacer es evidentemente, calibrarlo. Para ello, vamos a generar algunos escenarios con simuworld3 al igual que hicimos en el [capítulo 3](#). Por lo tanto, las entradas a incluir serán las que vienen en la [tabla resumen](#) del epígrafe de conclusiones de este capítulo. Reproducimos ahora esta tabla:

Escenario	Escenario base	Subsistema	Año de cambio	Variable o función a modificar	Valor en escenario 1	Nuevo valor
Escenario1						
Escenario2	Escenario1	Recursos	1900	nr_resources_129	1e12	2e12
Escenario3	Escenario2	Contaminación	1995	p_ppoll_tech_chg_mlt_POLGM	0	-0.03
				t_policy_year	4000	1995
Escenario4	Escenario3	Escenario3 + Alimentos	1995	p_yield_tech_chg_mlt_LYCM	0	0.02
Escenario5	Escenario4	Escenario4 + Alimentos	1995	t_air_poll_time	4000	1995
				t_land_life_time	4000	1995



Escenario6	Escenario5	Escenario5 + Recursos	1995	p_res_tech_chg_mlt_NRCM t_fcaor_time	0 4000	-0.03 1995
Escenario7	Escenario6	Todos los de Escenario6	1995	Tech_dev_del_TDD	20	5
Escenario8	Escenario2	Fertilidad	1995	des_compl_fam_size_38 t_zero_pop_grow_time	Calculado 4000	2 1995
Escenario9	Escenario8	Industria	1995	ind_out_pc_des_59 t_ind_equil_time	400 4000	350 1995
Escenario10	Escenario6 + Escenario8	Todos los de Escenario6 y Escenario 9	1995			
Escenario11	Escenario10	Todos los de Escenario 10	1975	t_policy_year t_land_life_time t_fcaor_time t_zero_pop_grow_time t_ind_equil_time	4000	1975
Escenario12	Escenario10	Todos los de Escenario 10	2015	t_policy_year t_land_life_time t_fcaor_time t_zero_pop_grow_time t_ind_equil_time	4000	2015
Escenario13	Escenario10	Todos los de Escenario 10	1975	t_policy_year t_land_life_time t_fcaor_time t_zero_pop_grow_time t_ind_equil_time ind_out_pc_des_59	4000 400	1975 700
Vida media del capital industrial	Escenario2	Sector Industrial	1995	t_policy_year p_avg_life_ind_cap_2_54	4000 14	1995 15
Vida media del capital servicios	Escenario2	Sector Servicios	1995	t_policy_year p_avg_life_serv_cap_2_69	4000 20	1995 22



Eficiencia en la gestión de servicios	Escenario2	Sector Servicios	1	t_policy_year p_serv_cap_out_ratio_2_72	4000 1	1995 0,9
Políticas más restrictivas de natalidad	Escenario2	Fertilidad	1	t_pop_equil_time t_fert_cont_eff_time_45	4000	1995
Mejora en el rendimiento de los insumos agrícolas	Escenario2	Alimentos	1	t_policy_year p_avg_life_agr_inp_2_100	4000 2	1995 1

Tabla 6.1.- Reproducción de la tabla 3.1

Resumiendo, tenemos las siguientes opciones:

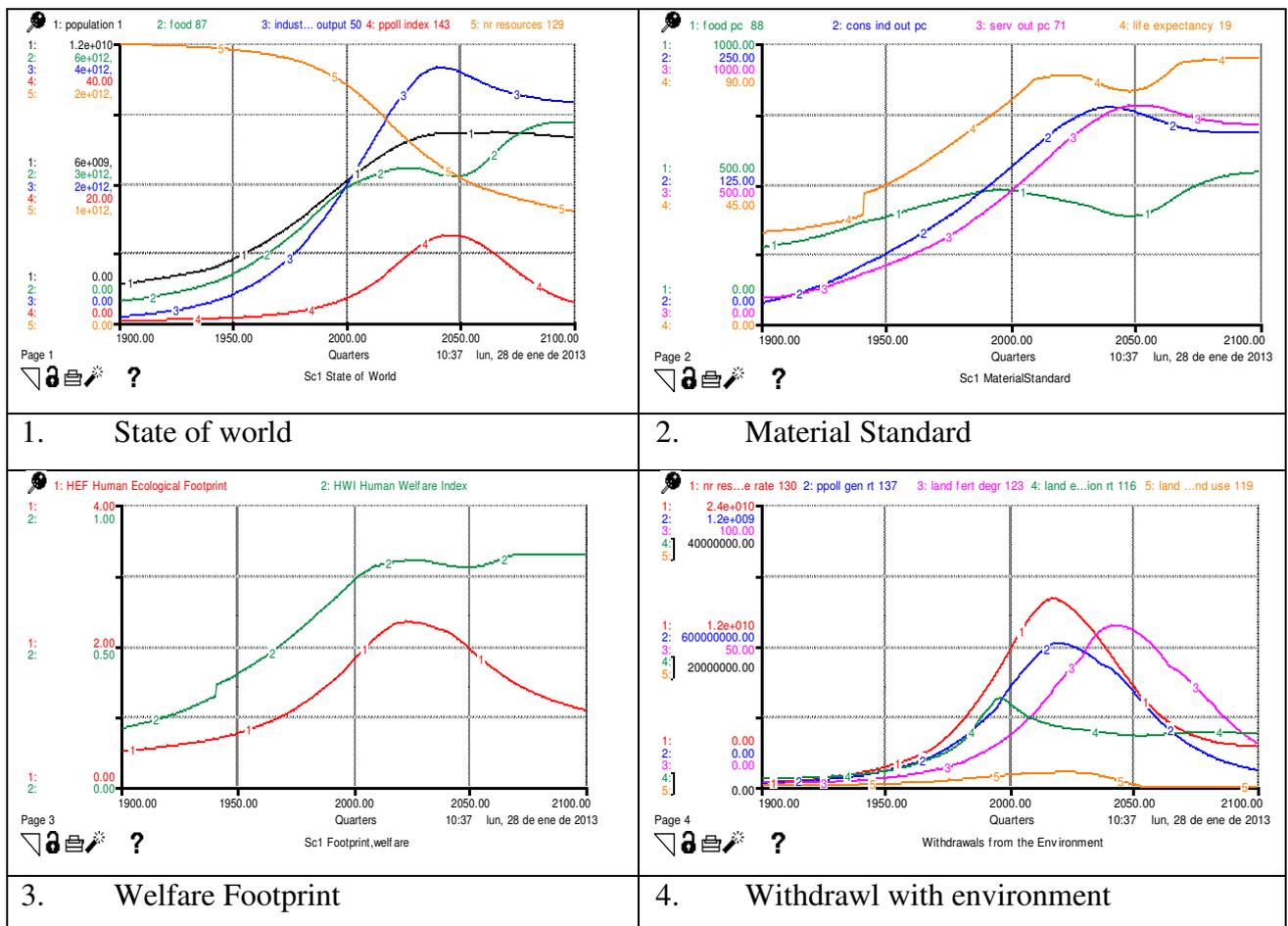
Parameters	Value of base escenario	Normal value	Lowestvalue	Highestvalue
Año en la aplicación de las políticas				
1 t_policy_year	4000	1995	1975	2025
2 t_airpoll_time	4000	1995	1975	2025
3 t_land_life_time	4000	1995	1975	2025
4 t_fcaor_time	4000	1995	1975	2025
5 t_zero_pop_grow_time	4000	1995	1975	2025
6 t_ind_equil_time	4000	1995	1975	2025
7 t_fert_cont_eff_time	4000	1995	1975	2025
Retrasos				
8 in TDD	20	20	5	20
Asignación de recursos				
9 NR_Renovables	1e12	2e12	1e12	2e12
10 p_avg_life_agr_inp	2	2	1	3

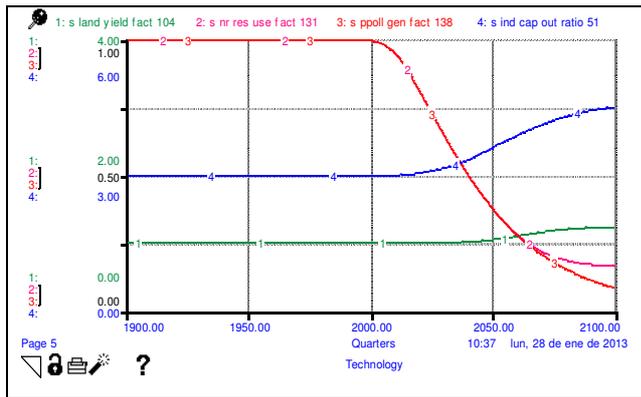


11	chgmt POLGFM	0	-0.03	-0.06	0
12	p yield tech chg_mlt LYCM	0	0.02	0	0.04
13	p_res_tech_chg_mlt_NRCM	0	-0.03	-0.06	0
14	des_compl_fam_size_38	2	2	1	3
15	ind_out_pc_des_59	400	400	350	700
16	p_avg_life_ind_cap_2_54	14	14	14	16
17	p_avg_life_serv_cap_2_69	20	20	18	22
18	p_serv_cap_out_ratio_2_72	1	1	0.5	1.5

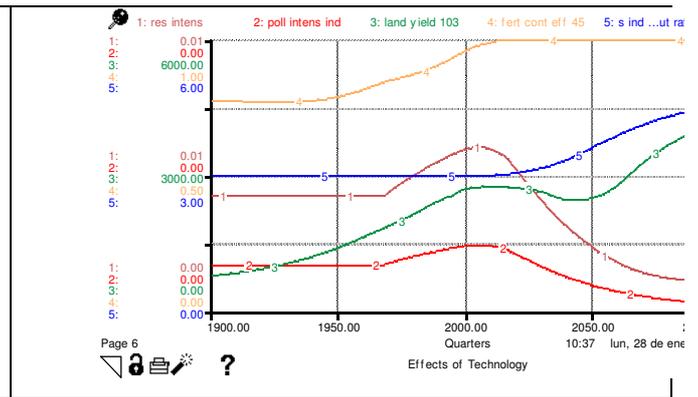
Tabla 6.2.- Rangos de variación de los valores utilizados para cambiar escenarios.

Por el lado de las salidas, en el capítulo3 hemos reproducido sólo algunas de las posibilidades, veamos ahora todas para ver cuántas salidas debemos proporcionarle al sistema. Para ello, veamos las gráficas que proporciona la aplicación en Stella, para cualquier escenario. Abramos cualquier escenario, por ejemplo, el escenario6 y veamos todas la gráficas que contiene y luego apuntamos todas salidas obtenidas.

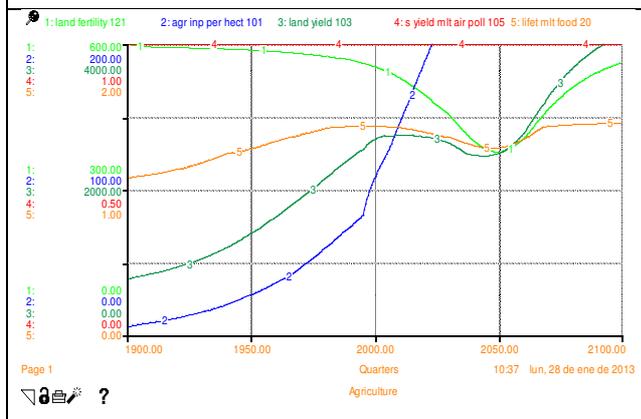




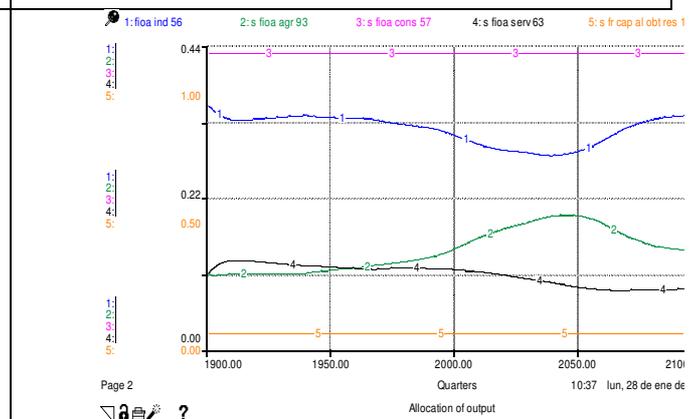
5. Tecnology



6. Effects of Tecnology



7. Agriculture



8. Allocation of output

Figuras 6.2.- Vista de 8 de las gráficas que trae la versión World3-03 en stella

Hagamos ahora el cuadro resumen con todas las salidas. Creemos una tabla en la que apuntaremos el nombre de la variable, y el número por el que la tenemos que dividir para que quepan todas en la misma gráfica:



<i>Num Salida</i>	<i>Identificador de la variable</i>	<i>Figura</i>	<i>Dividir entre</i>	<i>Color</i>
1	Population_1	State of world	1.2e10	b
2	Food_87		6e12	g
3	Industrial_output_50		4e12	b
4	Ppoll_index_143		40	r
5	Nr_resources_129		2e12	y
6	Food_pc_88	Material Standard	1000	g
7	Cons_ind_out_pc		250	b
8	Serv_out_pc_71		1000	m
9	Life_expectancy_19		90	y
10	HEF_Human_Ecological_footprint	Footprint, welfare	4	r
11	HWI_Human_Welfare_Index		1	g
12	Nr_res_use_rate_130	Withdrawals with environment	2.4e10	r
13	Ppoll_gen_rt_137		1.2e9	b
14	Land_fert_degr_123		100	m
15	Land_erosion_rt_116		4e7	g
16	Land_rem_urb_ind_use_119		4e7	Y
17	S_land_yield_fact_104	Tecnology	4	g
18	S_nr_use_fact_131		1	m
19	S_ppoll_fact_131		1	b
20	S_ind_cap_out_ratio		6	r
21	Res_intens	Effects of tecnology	0.01	m
22	Poll_intens_ind		2e-4	r
23	Land_yield_103		6000	g
24	Fert_cont_eff_45		1	y
25	S_ind_cap_out_ratio_51		6	b

Tabla 6.3.- Descripción de las gráficas del grupo1 que trae el World3-03. Los valores de salida están divididos por un valor para poderlas encajar todas en los mismos ejes.



La distribución World3-03 nos presenta otra gráfica con dos hojas

<i>Num Salida</i>	<i>Identificador de la variable</i>	<i>Figura</i>	<i>Dividir entre</i>	<i>Color</i>
1	Land_fertility	Agriculture	600	g
2	Agr_inp_per_hect		200	b
3	Land_yield		4000	g
4	S_yield_mlt_air_poll		1	r
5	Lifet_mlt_food		2	y
6	Fioa_ind	Allocation of output	0.44	b
7	S_fioa_agr		0.44	g
8	S_fioa_cons		0.44	m
9	S_fios_serv		0.44	k
10	S_fr_cap_al_obt_res		1	y

Tabla 6.4.- Descripción de las gráficas del grupo2 que trae el World3-03. Los valores de salida están divididos por un valor para poderlas encajar todas en los mismos ejes.



6.2 PRESENTACIÓN DEL MODELO TOTALMENTE CONSTRUÍDO Y DEL FICHERO BÁSICO PARA EJECUTARLO

El fichero con el modelo totalmente construido se llama simuworl3 y tiene la estructura expuesta al principio del capítulo: 18 entradas, un subsistema y 33 salidas, aparte de la estructura time-workspace.

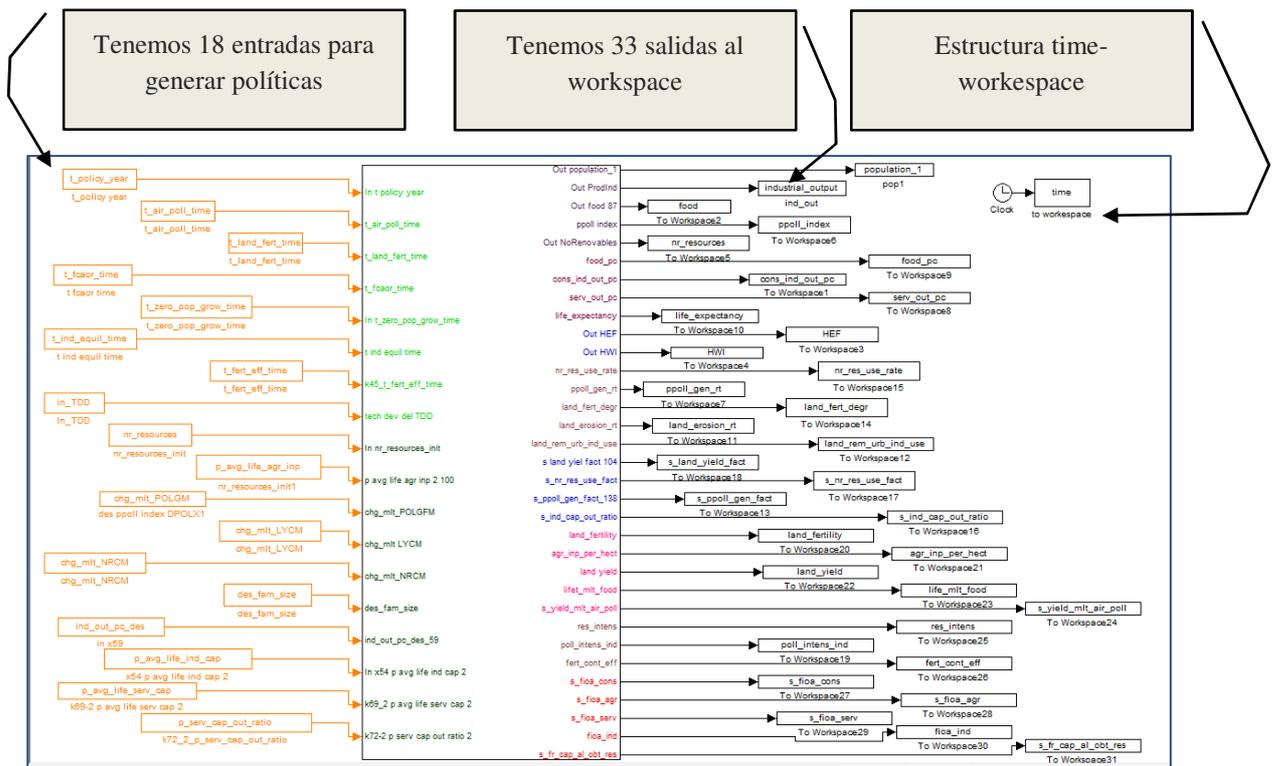


Figura 6.3.- Vista de la página principal del World3-03 ya traducido a Simulink.

El m-file básico para hacerlo correr tendrá la siguiente estructura:

1. Declaración de variables y sus valores
2. Ejecución del modelo
3. Generación de 6 figuras como las de la versión stella
4. Generación de hoja de cálculo con los valores de las salidas

El m-file básico se denominará smw3_basico.m y su código se encuentra en el anexo con el nombre código4.

Presento a continuación un recorte del mismo para una mejor comprensión de su estructura y posibilidades de uso.



```
clear
%Ponemos todos los tiempos en 4000
para la simulación del escenario1 y los
%vamos cambiando según el escenario que
queramos recrear
t_policy_year=[4000];
t_air_poll_time=[4000];
...
%inicialmente los retrasos son de 20 años
in_TDD=[20];
%Parámetros que cambiamos en las políticas
nr_resources=[1e12];
p_avg_life_agr_inp=[2];
chg_mlt_POLGM=[0];
chg_mlt_LYCM=[0];
...
%x29 se usa para comparar los recursos
restantes con los recursos iniciales
x29=nr_resources;
sim('simuworld3');
figure
plot(time, population_1/1.2e10, 'k',
time, food/6e12, 'g',
time, industrial_output/4e12, 'b',
time, ppoll_index/40, 'r',
time, nr_resources/2e12, 'y');
AXIS([1900 2100 0 1])
..
%-----
d=[time, HEF, HWI]
xlswrite('simuworld3.xls', d, 'Datos', 'A1')
```

Elegimos la política que queremos ejecutar modificando el valor de 4000 a un valor entre [1900 2100]

Cambiamos el parámetro afectado por una política

Corremos una vez la simulación

Graficamos los resultados, los dividimos por cierto valor para normalizarlos a [0 1]

Llevamos los resultados de los parámetros elegidos a una hoja Excel para compararlos con los valores de la versión en stella



6.3 CALIBRANDO EL ESCENARIO 1 CON LOS VALORES DE HWI y HEF

Para ejecutar este escenario no hace falta modificar nada en el fichero smw3_basico.m. El fichero nos generará 8 gráficas idénticas a las que trae el modelo en Stella y aparte nos genera una Excel con el histórico de HWI y HEF que compararemos con el resultado de estas dos variables en Stella, calculando su error, tal como hicimos en el capítulo 5.

Time	Valores Simulink		Valores Stella		%Error	
	HEF	HWI	HEF	HWI	HEF	HWI
1900	0,50	0,20	0,50	0,20	0,00%	0,00%
1920	0,57	0,23	0,57	0,23	0,00%	0,00%
1940	0,67	0,34	0,67	0,34	0,00%	0,00%
1960	0,85	0,43	0,85	0,43	0,00%	0,00%
1980	1,17	0,57	1,17	0,57	0,00%	0,00%
2000	1,77	0,75	1,77	0,75	0,00%	0,00%
2020	2,40	0,79	2,40	0,79	0,00%	0,00%
2040	1,57	0,42	1,57	0,42	0,00%	0,00%
2060	1,20	0,25	1,20	0,25	0,00%	0,00%
2080	1,05	0,18	1,05	0,18	0,00%	0,00%
2100	0,99	0,15	0,99	0,15	0,00%	0,00%

Tabla 6.5.- Calibrado del World3-03 completo traducido a Simulink. Hemos utilizado los valores de Huella ecológica e índice de desarrollo humano para comparar ambos modelos, ya que al depender de muchos valores anteriores, pensamos que eran adecuadas para el calibrado del modelo y porque más adelante serán utilizadas para los experimentos de inteligencia artificial.



6.4 CALIBRANDO EL ESCENARIO 10

Veamos en qué consistía el escenario10 y qué parámetros había que modificar para llegar a él. Veremos también cómo modificar el fichero smw3_basico.m para generar este escenario con Simulink. Compararemos las 8 gráficas de Stella y de Simulink y también las salidas de HEF y HWI de forma numérica para ver el porcentaje de error.

6.4.1 Descripción del escenario

En este escenario se ponen en marcha las decisiones del escenario 6 más las decisiones del escenario 8, es decir, tamaño de familia de 2 hijos, renta media 350\$ y tecnologías para mejorar el rendimiento del suelo, prevención de la erosión, limitar el impacto de la contaminación así como mejoras en la eficiencia energética y tecnologías para mejorar el rendimiento decreciente de las explotaciones mineras. Estimamos el tiempo de implantación de estas tecnologías en 20 años.

Escenario	Escenario base	Subsistema	Año de cambio	Variable o función a modificar	Valor en escenario 1	Nuevo valor
Escenario1						
Escenario2	Escenario1	Recursos	1900	nr_resources_129	1e12	2e12
Escenario3	Escenario2	Contaminación	1995	p_ppoll_tech_chg_mlt_POLGM	0	-0.03
				t_policy_year	4000	1995
Escenario4	Escenario3	Escenario3 + Alimentos	1995	p_yield_tech_chg_mlt_LYCM	0	0.02
Escenario5	Escenario4	Escenario4 + Alimentos	1995	t_air_poll_time	4000	1995
				t_land_life_time	4000	1995
Escenario6	Escenario5	Escenario5 + Recursos	1995	p_res_tech_chg_mlt_NRCM	0	-0.03
				t_fcaor_time	4000	1995
Escenario7	Escenario6	Todos los de Escenario6	1995	Tech_dev_del_TDD	20	5
Escenario8	Escenario2	Fertilidad	1995	des_compl_fam_size_38	Calculado	2
				t_zero_pop_grow_time	4000	1995
Escenario9	Escenario8	Industria	1995	ind_out_pc_des_59	400	350
				t_ind_equil_time	4000	1995
Escenario10	Escenario 6 + Escenario 8	Todos los de Escenario 6 y Escenario 9	1995			

Tabla 6.6.- Pasos a dar para conseguir el escenario 10. Como siempre, partimos del escenario1 y vamos modificando parámetros en cada escenario hasta llegar al 10.



6.4.2 Datos a modificar en smw3_basico.m

Veamos primero los tiempos, el bloque de tiempos debe quedar así:

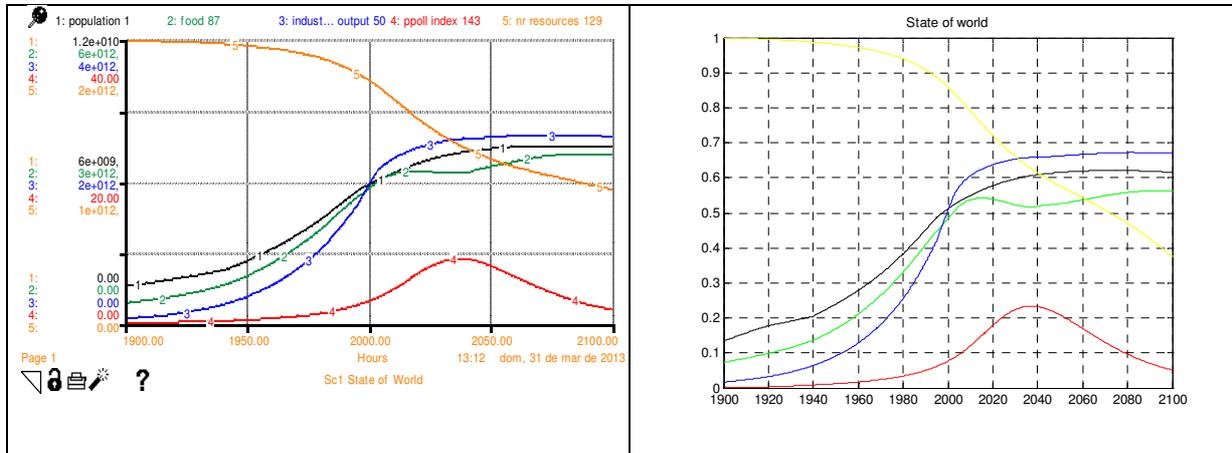
```
t_policy_year=[1995];  
t_air_poll_time=[1995];  
t_land_fert_time=[1995];  
t_fcaor_time=[1995];  
t_zero_pop_grow_time=[1995];  
t_ind_equil_time=[1995];  
t_fert_eff_time=[4000];
```

Y ahora las variables: Cambiamos nr_resources de 1e12 a 2e12, chg_mlt_POLGM de 0 a -0.03, chg_mlt_LYCM de 0 a 0.02, chg_mlt_NRCM de 0 a -0.03 e ind_out_pc_des de 400 a 350. El bloque de parámetros que cambiamos en las políticas debe quedar así:

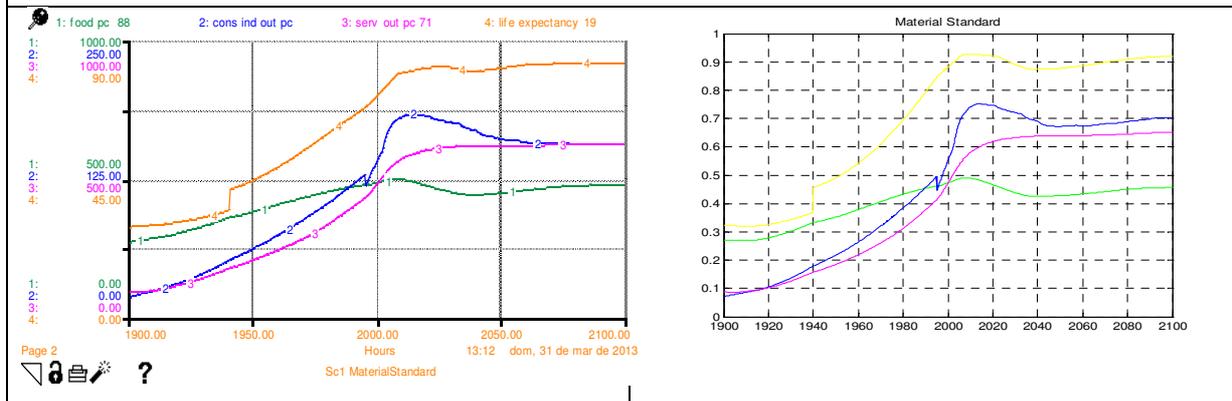
```
nr_resources=[2e12];  
p_avg_life_agr_inp=[2];  
chg_mlt_POLGM=[-0.03];  
chg_mlt_LYCM=[0.02];  
chg_mlt_NRCM=[-0.03];  
des_fam_size=[2];  
ind_out_pc_des=[350];  
p_avg_life_ind_cap=[14];  
p_avg_life_serv_cap=[20];  
p_serv_cap_out_ratio=[2];
```



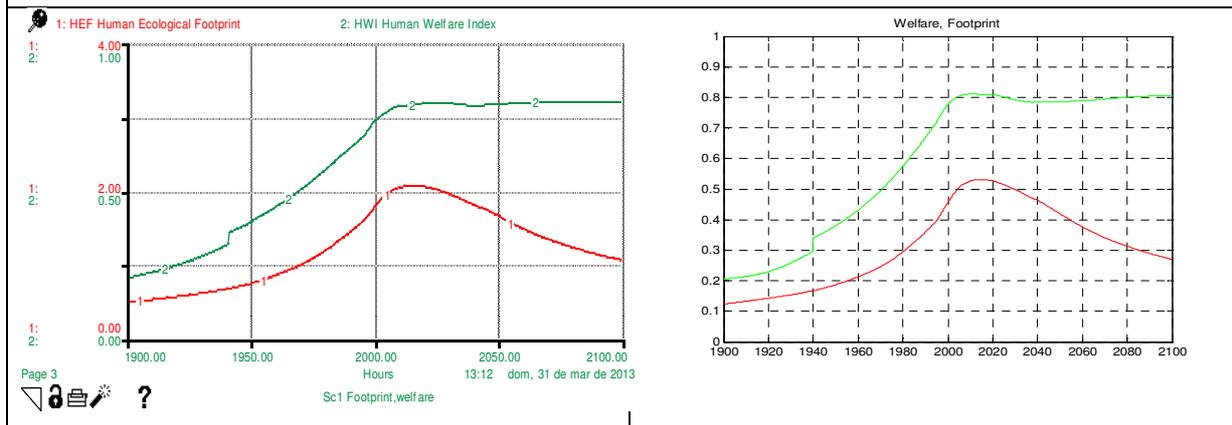
6.4.3 Comparativa de gráficas del escenario 10.



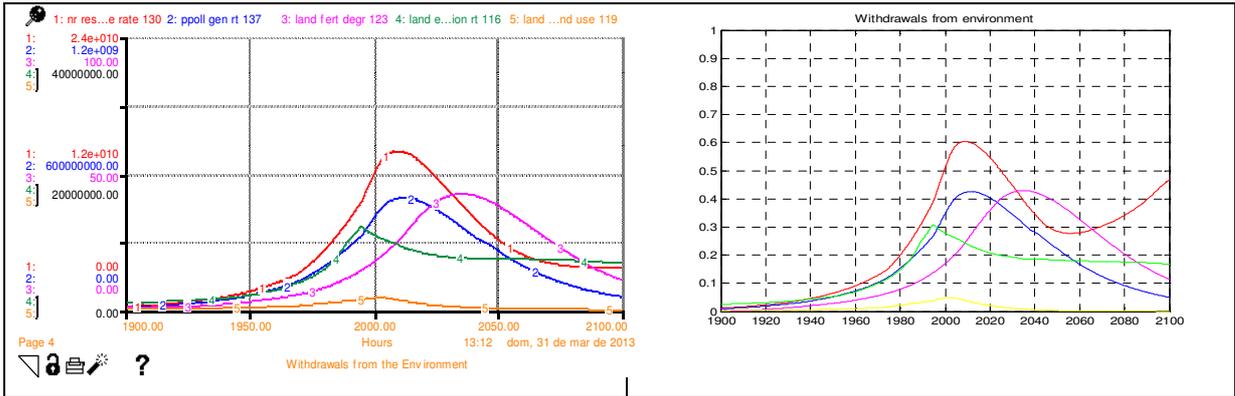
1. Gráfica estado del mundo



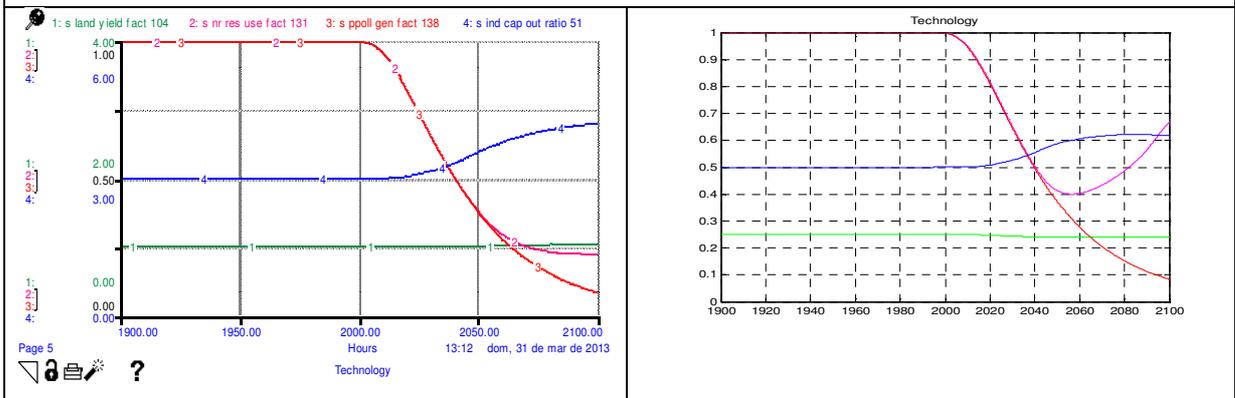
2. Gráfica Material Standard



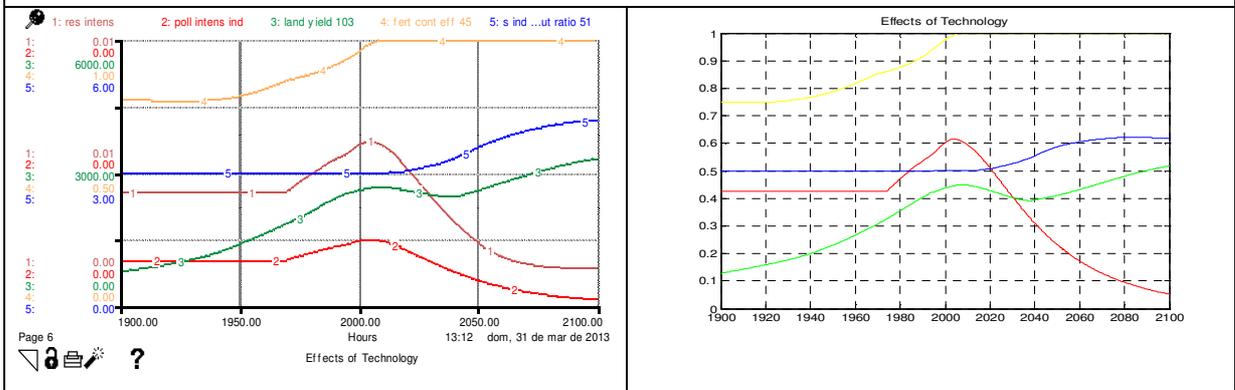
3. Gráfica HEF-HWI



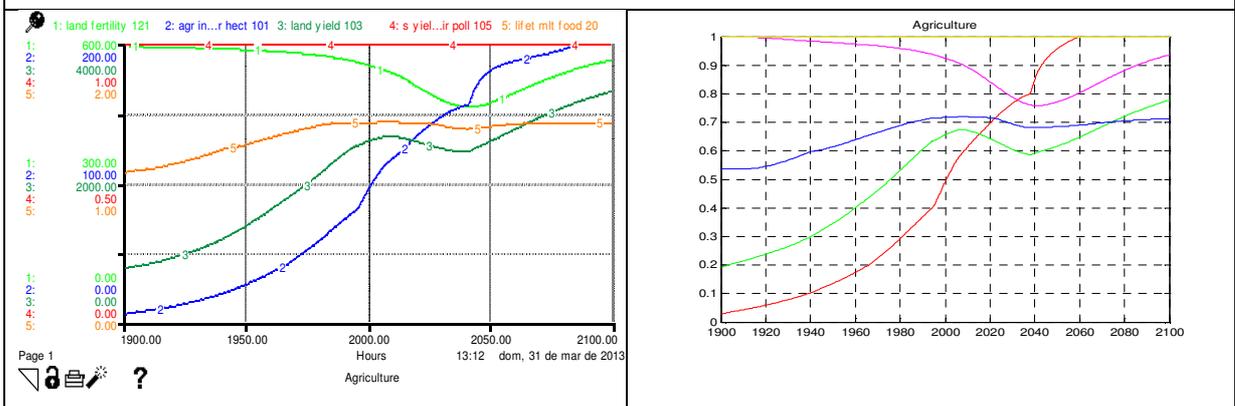
4. Gráfica Withdrawals from environment



5. Gráfica Technology

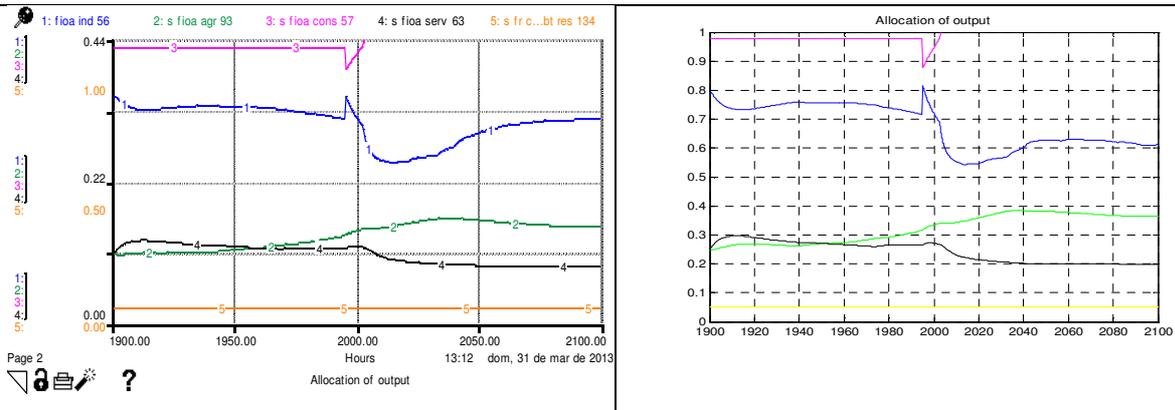


6. Gráfica Effects of technology





7. Gráfica Agriculture



8. Gráfica Asignación de salidas

Figura 6.4.- Comparativa de los resultados del escenario 10 obtenidos con simuworld3 y con Stella.



6.5 *CONCLUSIONES AL MONTAJE COMPLETO DE LA APLICACIÓN*

Hemos montado el World3 completo en Simulink y hemos creado un fichero m-file para poder ejecutar todos los escenarios recreados en el libro Más allá de los límites del crecimiento (Dennis Meadows, Meadows, & Randers, 1992). En este capítulo hemos reproducido los escenarios 1 y 10. El escenario 1 se corresponde con el escenario Business as usual, es decir qué pasaría si todo siguiese igual, y el escenario 10, que es un escenario de sostenibilidad en el que hemos introducido cambios en la tecnología y cambios en las aspiraciones de la humanidad. Estos cambios en la tecnología comprenden cambios en las políticas energéticas, de contención de la contaminación y en la producción de alimentos para mantener la fertilidad del suelo. Los cambios que ha aceptado la humanidad, no sólo sus gobernantes, incluyen cambios en la política reproductiva, aceptando como mucho, dos hijos por familia y una limitación en el nivel de consumo deseado que a partir de ahora no tenderá al infinito, sino que nos quedaremos en un nivel estable en el que se cubran todas las necesidades básicas. Después de comparar los resultados en el modelo simuworld3 y el modelo en stella, hemos visto que los resultados son casi idénticos, salvo algunos picos o saltos bruscos que nos aparecen en simuworld3 como consecuencia de usar un paso de integración fijo.



7. USO DE HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL SOBRE EL WORLD3 USANDO SIMULINK



ANÁLISIS AUTOMÁTICO DE MODELOS COMPLEJOS
UTILIZANDO HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA
ARTIFICIAL PARTIENDO DEL EJEMPLO DEL WORLD3





La dinámica de sistemas y simulación es un proceso muy interesante que ayuda al modelador a conseguir una comprensión más importante de los problemas, pero, cuando el modelo se construye y se ejecuta, el usuario no tiene tantos instrumentos para probar lo que el modelo que realmente muestra. Un puñado de ejecuciones de simulación no da mucha información cuando uno se enfrenta a modelos de gran tamaño con las variables de stock muchas dinámicas no lineales y un alto grado de incertidumbre en los parámetros. En general las herramientas para el análisis de los modelos a gran escala no se han desarrollado muy bien.

El análisis de sensibilidad es la técnica más simple y más ampliamente utilizado para los sistemas de análisis dinámicos. La manera más fácil de hacer un análisis de sensibilidad es establecer un conjunto de parámetros que pueden variar dentro de ciertos rangos y cambiarlos de uno en uno. Un análisis más complejo es variar todos los parámetros al mismo tiempo y trazar todos los resultados juntos. Varios programas de dinámica de sistemas cuentan con herramientas para ello, pero, en estas simulaciones, uno no tiene mucho control sobre los resultados obtenidos. Por ejemplo, uno podría decidir almacenar todos los valores de salida para extraer información estadística pertinente, o uno podría estar interesado en el trazado de los resultados de una manera diferente, o conocer la relación entre un determinado parámetro, y un determinado resultado, y los programas comerciales de dinámica del sistema no permiten estas posibilidades. El hecho de que Matlab sea una plataforma de programación y los programas de usuario permite a las simulaciones todo tipo de manipulaciones posteriores con los datos a un costo muy bajo de programación, ya que la mayoría de los cálculos matemáticos ya están programados en los kits de herramientas

Ford (Ford & Flynn, 2004) utiliza un enfoque pragmático que llama screenig también se centra en detectar qué parte de la estructura del modelo contribuye a la conducta observada, pero no utiliza valores propios o lazos dominantes, y presta más atención a la incertidumbre de los parámetros. Parte del proceso de detección se realizan en Vensim usando la herramienta de sensibilidad, pero otra parte se debe hacer con software personalizado.

Saber qué parte de la estructura del modelo contribuye a los comportamientos observados es interesante porque eso ayuda a lo que Mojtahedzadeh M describe como “creating system stories” o explicaciones correctas de la cantidad de piezas influyentes de la estructura que dan lugar a un comportamiento. Ayudan a los gerentes a entender los sistemas que gestionan. Pero, antes de la construcción de estas explicaciones, el modelador necesita saber cómo su o sus sistemas se comportan realmente. (Mojtahedzadeh, Anderson, & Richardson, 2004)

Esta no es una tarea fácil, ya que la incertidumbre de los parámetros es alta y las posibles variaciones de los valores de los parámetros multiplicados por el número de parámetros da lugar a un número enorme de posibles comportamientos que el modelista tendría que probar con el fin de realmente conocer el modelo.

La Figura 7.1 muestra algunas de las posibilidades y se reproduce el equivalente de código Matlab: ejecutar varias simulaciones con parámetros elegidos al azar, calcula varias características interesantes de esos productos y, por ejemplo, trazar los resultados de las variables de salida de interés todas juntas en un gráfico o diagrama relevante características de la salida contra algunos parámetros. Se puede ver que el esfuerzo de programación es muy bajo.



ANÁLISIS AUTOMÁTICO DE MODELOS COMPLEJOS
UTILIZANDO HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA
ARTIFICIAL PARTIENDO DEL EJEMPLO DEL WORLD3



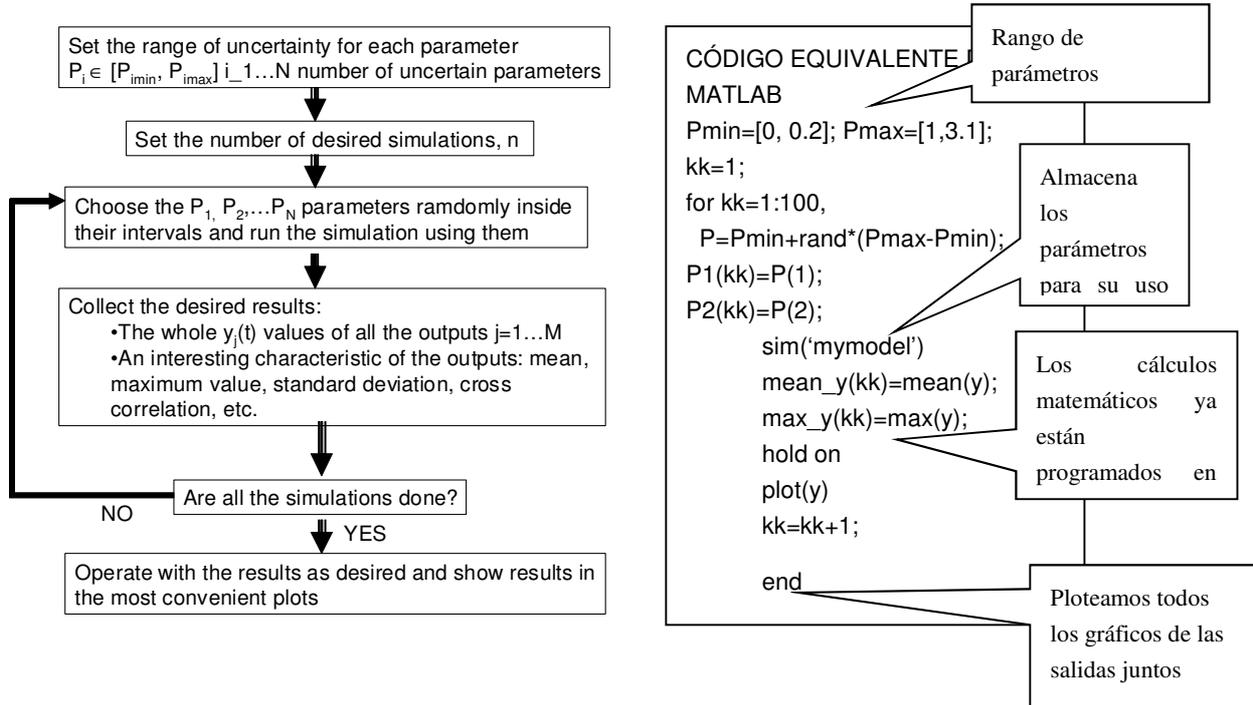


Figura 7.1: Programación de varias simulaciones con parámetros aleatorios. Todas las variables involucradas son almacenadas en variables y matrices para cálculos posteriores y ploteados.



7.1 TRAZADO DE VARIAS SIMULACIONES

7.1.1 Estudio de los rangos de variación

Hemos comenzado nuestro análisis del modelo World3 mediante la programación de los trece escenarios que los autores utilizan en su libro “Más allá de los límites del crecimiento” (Dennis Meadows, Meadows, & Randers, 1992) Comienzan con un escenario base y añaden las políticas, una a una hasta llegar al escenario final que tiene todas las políticas implementadas.

Luego ejecutar simulaciones en las que se consideran todas las combinaciones de escenarios posibles. En nuestras simulaciones los años de aplicación de las políticas varían aleatoriamente entre los años 1995 y 2025 y todos los parámetros utilizados en los escenarios varían en los intervalos observados en la Tabla 7.1 (parámetros 1 a 12 de la tabla 7.1, con una distribución aleatoria uniforme). En la tabla 3 las escalas de trazado se muestran, ya que hemos intentado hacer gráficos similares a los mostrados en el libro.

Parameters		Value of base escenario	Normal value	Lowest value	Highest value
Año en la aplicación de las políticas					
1	t_policy_year	4000	1995	1975	2025
2	t_airpoll_time	4000	1995	1975	2025
3	t_land_life_time	4000	1995	1975	2025
4	t_fcaor_time	4000	1995	1975	2025
5	t_zero_pop_grow_time	4000	1995	1975	2025
6	t_ind_equil_time	4000	1995	1975	2025
7	t_fert_cont_eff_time	4000	1995	1975	2025
Retrasos					
8	in TDD	20	20	5	20
Cambios de políticas					
9	NR_Renovables	1e12	2e12	1e12	2.5e12
10	p_avg_life_agr_inp	2	2	1	3
11	chgmt POLGFM	0	0	-0.06	0
12	p_yield tech chgmt LYCM	0	0	0	0.04
13	p_res_tech_chg_mlt_NRCM	0	0	-0.06	0
14	des_compl_fam_size_38	2	2	1	3
15	ind_out_pc_des_59	400	400	350	700
16	p_avg_life_ind_cap_2_54	14	14	14	16
17	p_avg_life_serv_cap_2_69	1	1	0.5	1.5
18	p_serv_cap_out_ratio_2_72	20	20	18	22

Tabla 7.1.- Estudio de rangos de variación

Vamos a generar las 8 gráficas agrupadas de dos en dos. El código para correr estas simulaciones se haya en el anexo1 y es el código5. El fichero tiene el nombre smw3_vs.m. Vamos a trazar 25 simulaciones con parámetros aleatorios. No sólo aparecen



los trece escenarios antes mencionados, también aparecen las otra políticas reflejadas en el punto [3.3.14](#)

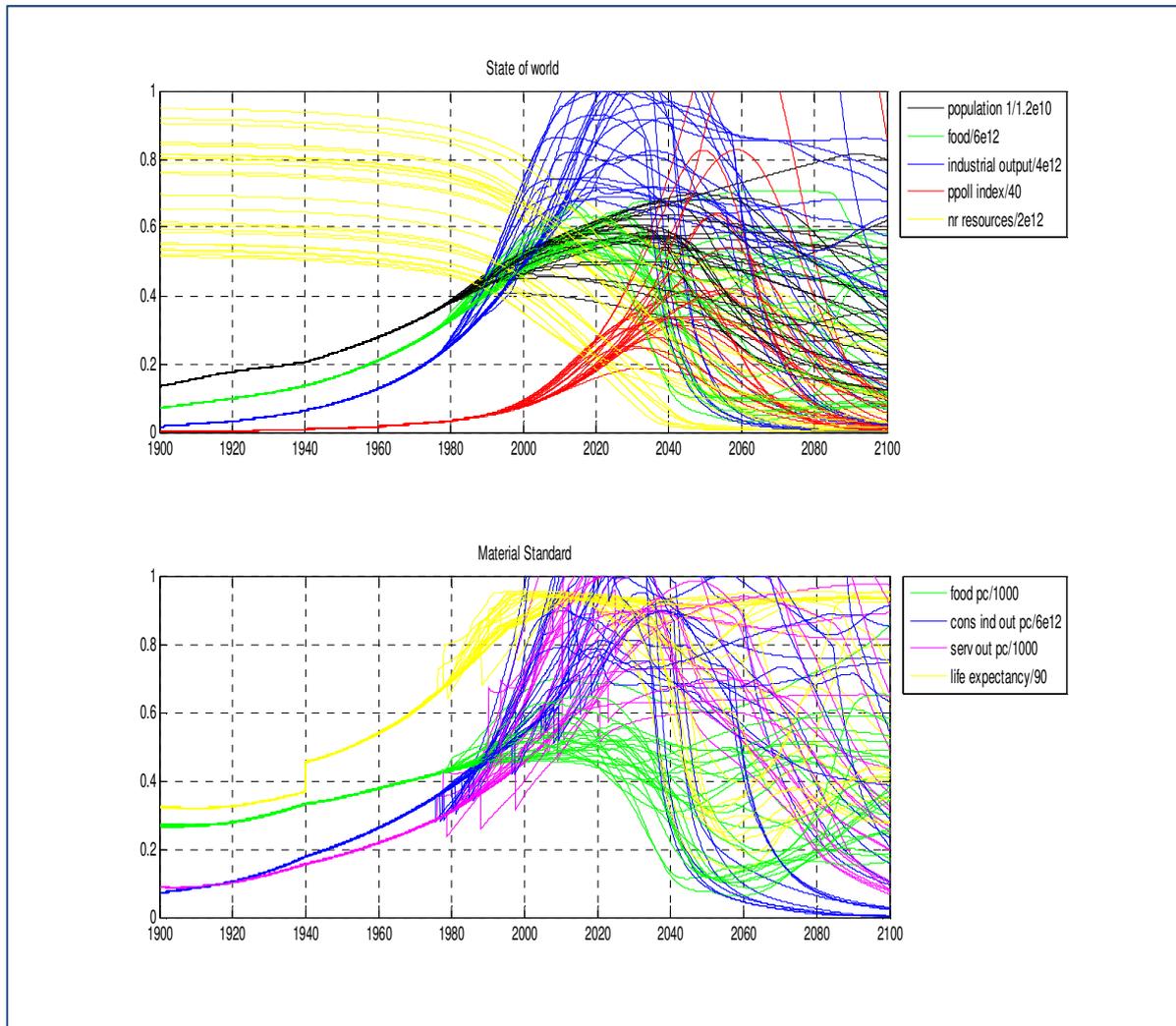


Figura 7.2.- Gráficas de estado del mundo y nivel material de vida

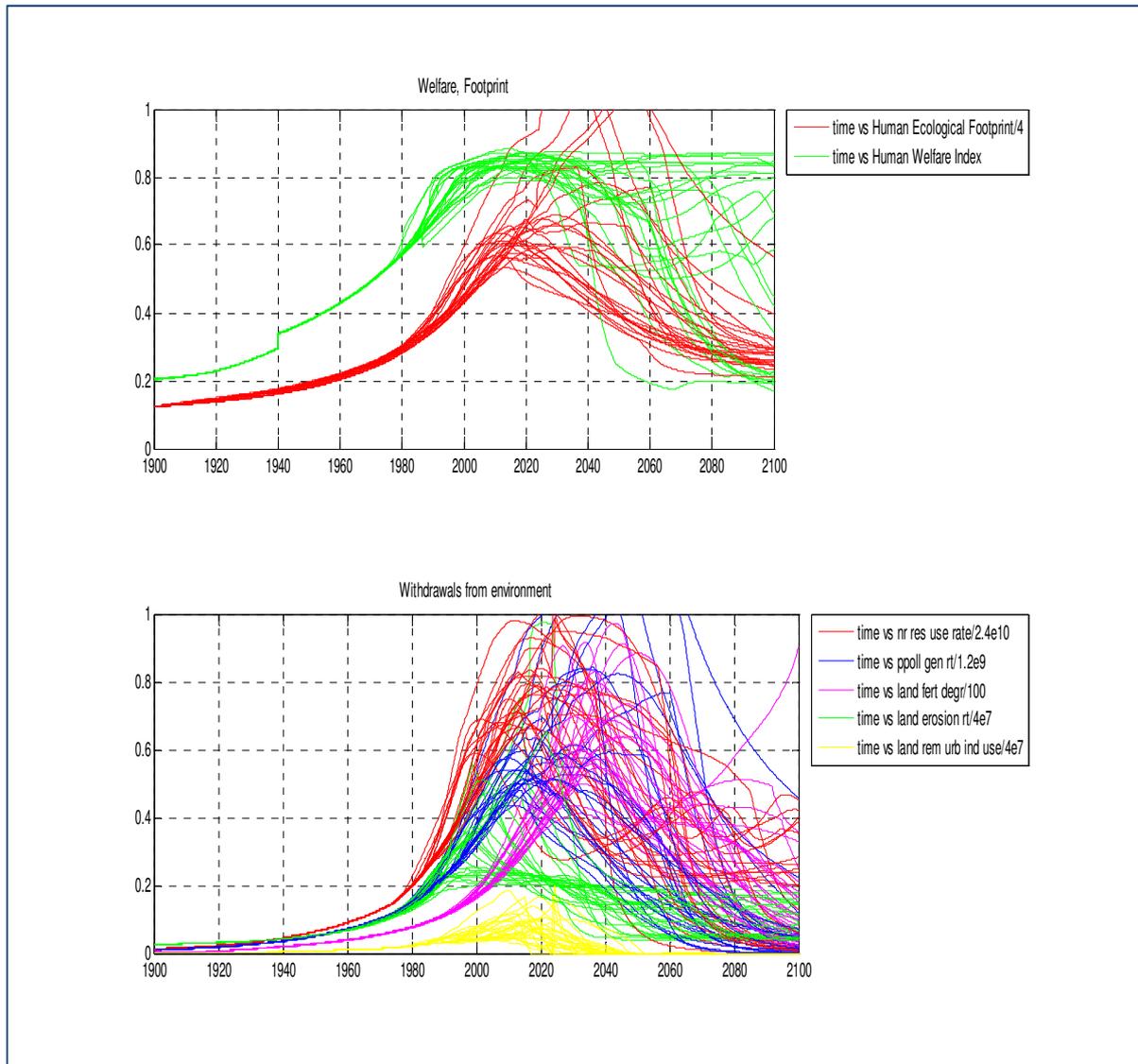


Figura 7.3.- Gráficas de índice humano de bienestar y huella ecológica y recursos retirados del medio ambiente

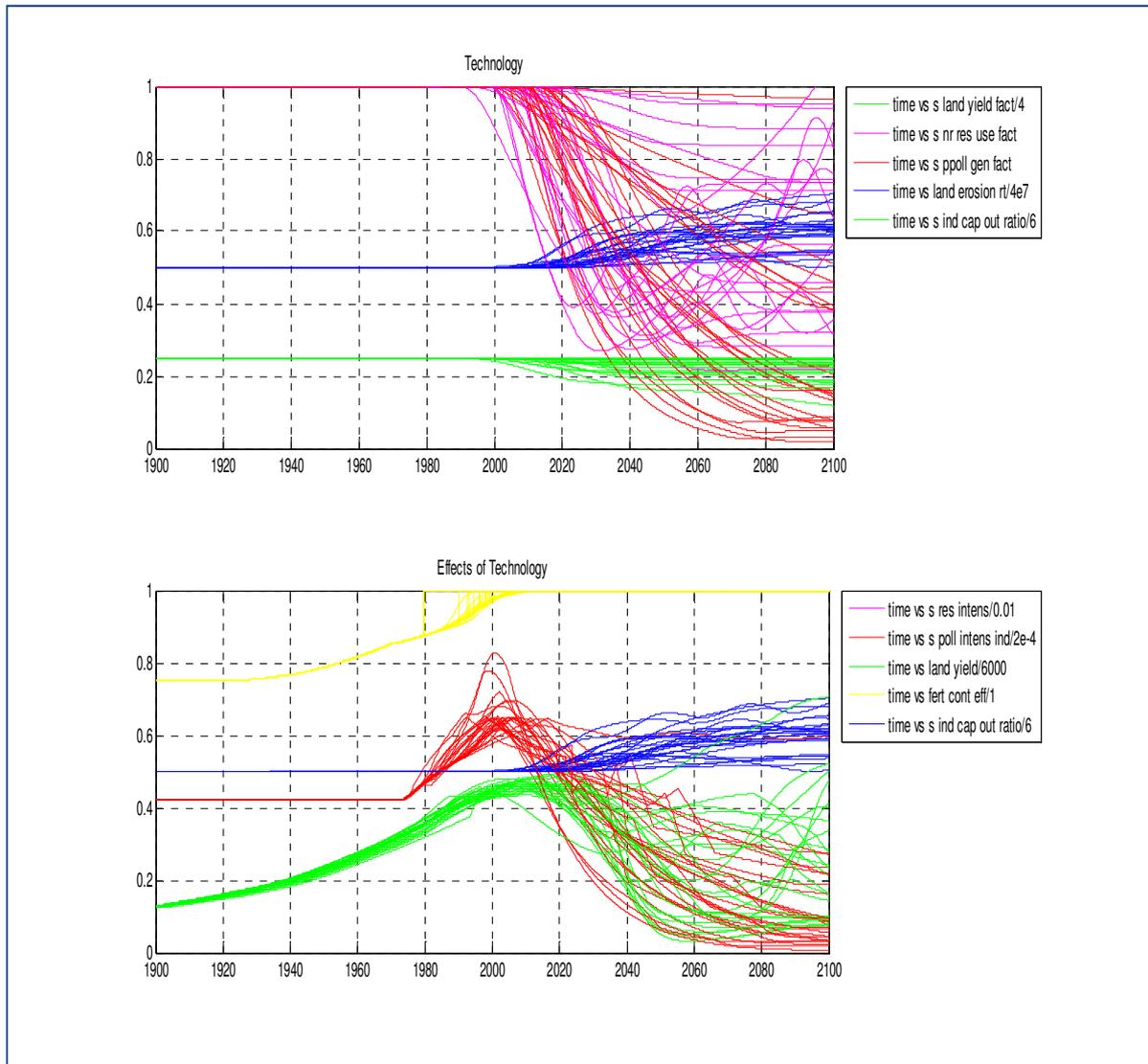


Figura 7.4.- Gráficas de tecnologías y Efectos de las tecnologías

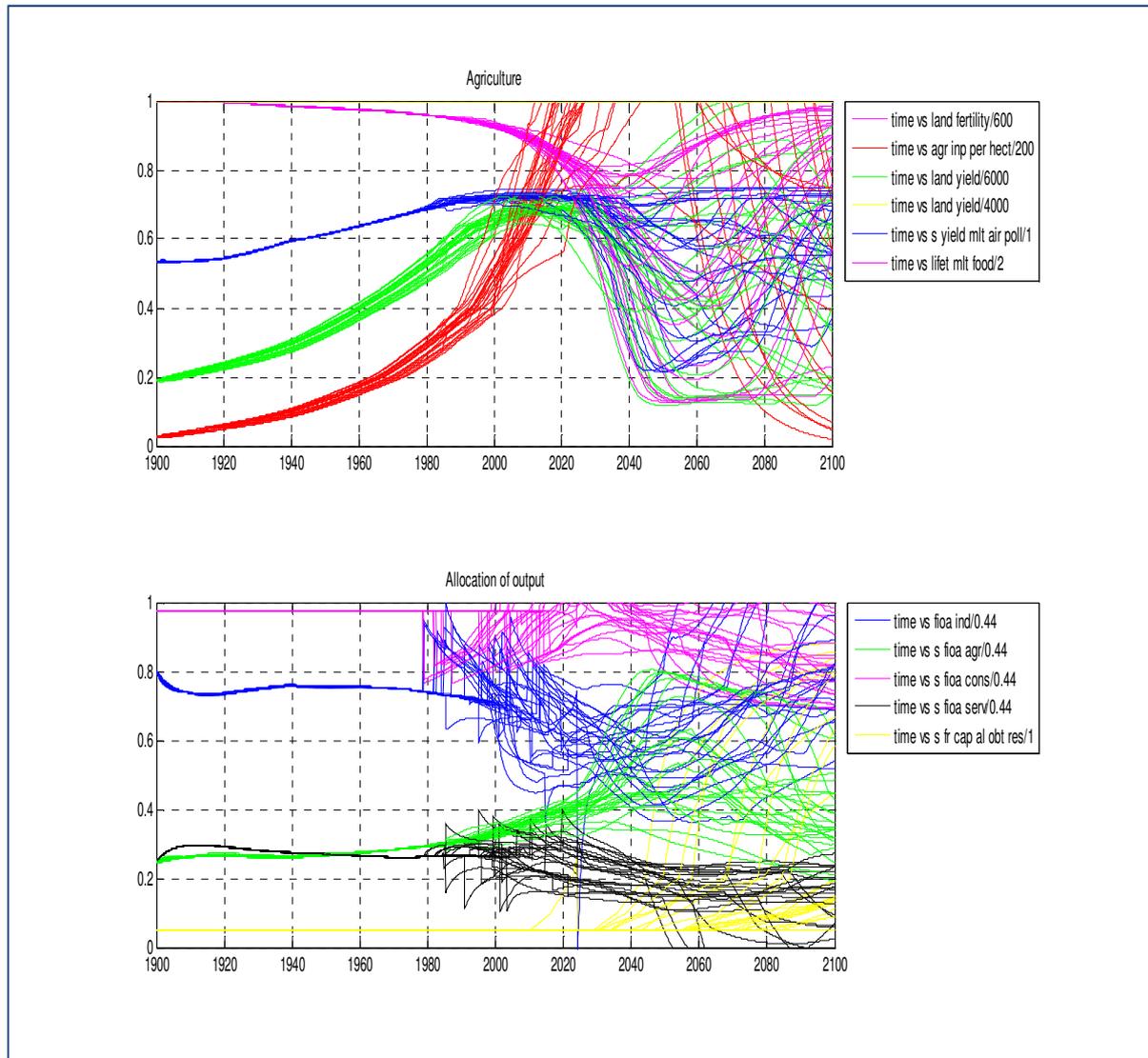


Figura 7.5.- Gráficas de Agricultura y Destinos del capital

7.1.2 Conclusiones del trazado de varias simulaciones

El trazado de varias simulaciones nos permite comprender de un solo vistazo todos los escenarios a la vez. Al ver en una misma gráfica los máximos, los mínimos, las pendientes de las curvas, los saltos bruscos etc. nos introduce en los siguientes objetivos. También se nos puede ocurrir qué políticas debemos emprender para conseguir un alto nivel de bienestar sin comprometer los recursos futuros. En cada gráfica vemos las áreas de curvas que dan simulaciones compatibles con estos objetivos y curvas que dan resultados catastróficos. Quien quiera utilizar el World3 para jugar a la política puede necesitar saber qué políticas tienen más incidencia, es decir con qué decisiones existe una correlación mayor entre el cambio introducido y los resultados obtenidos. El político dispone de unos recursos limitados de capital y dedicar mayor proporción al consumo implica menos recursos para invertir en tecnologías de conservación del suelo y dedicar más recursos al incremento de los rendimientos de los recursos energéticos restantes puede implicar un descenso de los recursos destinables a políticas sociales.



En el siguiente punto haremos un estudio de las correlaciones entre las políticas y los resultados en HWI y HEF y más adelante le diremos al sistema que nos valore con palabras el resultado de una decisión política, utilizando la lógica difusa para interpretar forma verbal la forma de las gráficas.



7.2 *CORRELACIONES*

Las técnicas de filtrado descritas por Ford y Flynn 2004 (Ford & Flynn, 2004), también pueden ser aplicadas a un costo mínimo de programación con Matlab, como puede verse en la figura 7.3, ya que la mayoría de los cálculos matemáticos ya están programados en las cajas de herramientas de Matlab. Esta técnica consiste en calcular la correlación entre los parámetros y la salida de una simulación en cada momento de la simulación.

En la figura 7.4 podemos ver los resultados de estas técnicas aplicadas al World 3. Hemos utilizado como parámetros los tiempos de la aplicación de las políticas enumeradas en la tabla 7.2 (parámetros de 7 a 12 con una distribución uniforme entre 1995 y 2020). La salida es la huella ecológica. El resultado de la evaluación es una estimación de cómo la cantidad de cada uno de los parámetros influye en la salida en cada instante de tiempo. Si el valor de la correlación en el campo ID que significa que, en este último se ha aplicado la política, cuanto más grande es la huella ecológica: por lo tanto, que la política en particular es buena para reducir la huella ecológica.

Este experimento ya fue realizado sobre dos subsistemas agrupados, el de energía y producción industrial. Vamos a repetirlo ahora primero con la huella ecológica y después con el Índice de desarrollo humano. Vamos a utilizar todos los parámetros a la vez tal y como hemos hecho en los experimentos de trazado de varias simulaciones y luego iremos haciendo sucesivos filtrados para determinar cómo y cuánto inciden estas políticas en los resultados y en qué plazos. Comprobaremos luego con ploteados la dispersión o no de las variables representadas.

7.2.1 **Correlaciones entre políticas y huella ecológica**

Veamos primero las correlaciones entre los parámetros de la tabla 7.1 y la huella ecológica. El código para correr esta simulación está en el anexo1 y es el código 6

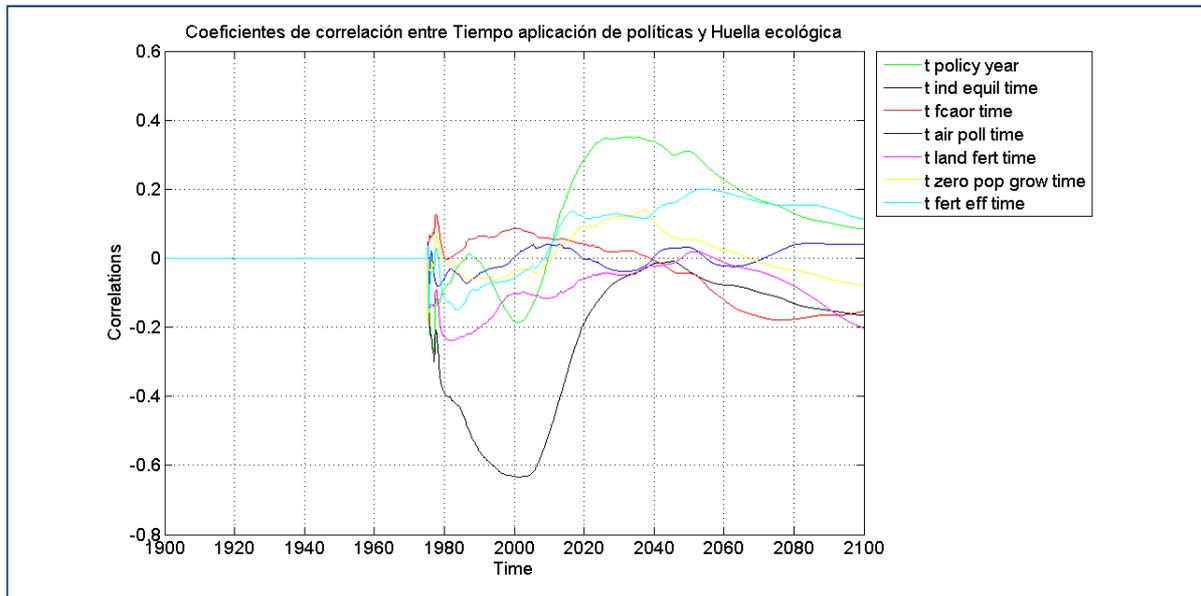


Figura 7.6.- Correlaciones entre el año de cambio de una política y la huella ecológica

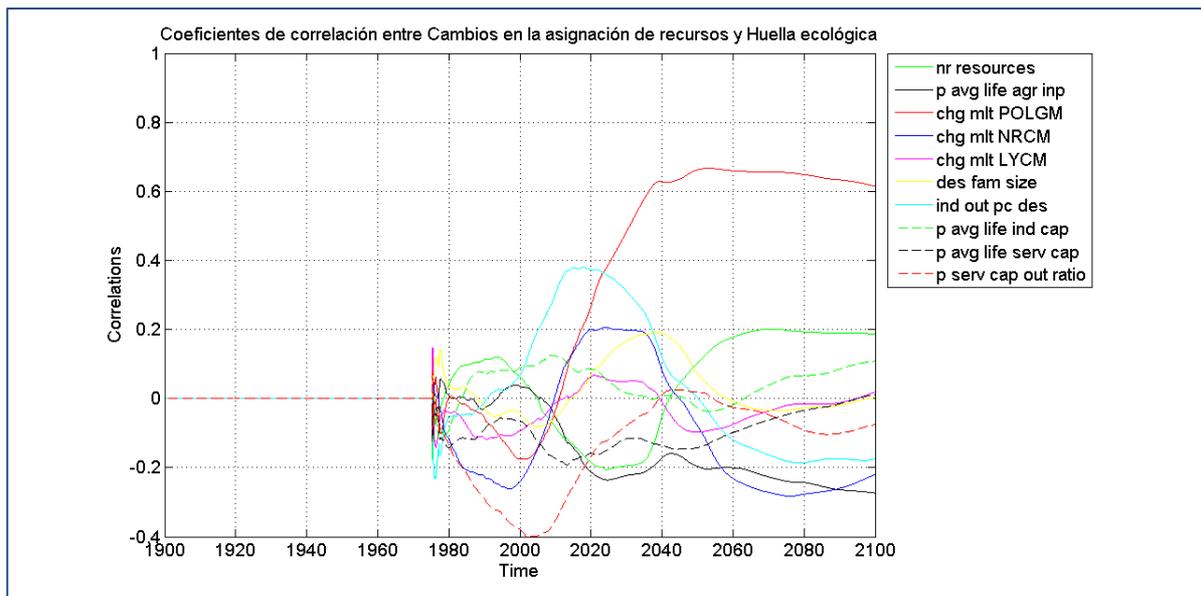


Figura 7.7.- Correlaciones entre el cambio en la asignación de recursos y la huella ecológica

Hemos separado las gráficas en 2 figuras, por un lado tenemos el año de cambio de política y por otro el cambio en la asignación de recursos. Como lo que queremos es que disminuya la huella ecológica, la relación entre un aumento en una variable y una disminución en la huella es inversa.

De la primera gráfica se desprende que retrasar el equilibrado de la producción industrial repercute negativamente en la huella ecológica.

En la segunda gráfica se observa que políticas tendentes a la disminución de la contaminación están muy relacionadas con la disminución de la huella ecológica.



También podemos apreciar la incidencia de limitar el consumo de la producción industrial deseada en la disminución de la Huella ecológica.

7.2.2 Comparando ploteados y parámetros

Uno de los resultados que da más información de un modelo es la programación de varias pasadas variando aleatoriamente los parámetros y ploteando los resultados de la salida en función del valor de los parámetros. Estos gráficos muestran si la salida está correlacionada con el parámetro.

A la vista de la figura 7.7 podemos querer ver otra gráfica que nos diga qué valor máximo de huella ecológica nos da cada valor de producción industrial deseado y cada valor en la reducción del valor `chg_mlt_POLGM` (multiplicador de tasa de cambio de la tecnología de contaminación persistente). Para saber la incidencia real, vamos a lanzar todos los cambios a la vez, pero sólo vamos a recoger los valores de `ind_out_pc_des` y de `chg_mlt_POLGM` en los ejes horizontales y el valor máximo de la huella ecológica en el de ordenadas. Además haremos tres cambios fijos en los años de cambio de esas políticas, una en 1975, otra en 1995 y otra en el 2015.

Los cambios son en `t_policy_year` y `t_ind_equil_time` que sólo adoptarán uno de estos 3 valores, el resto de cambios en las políticas seguirán siendo aleatorios. El código de este experimento el el nº 7 y está en el anexo 1

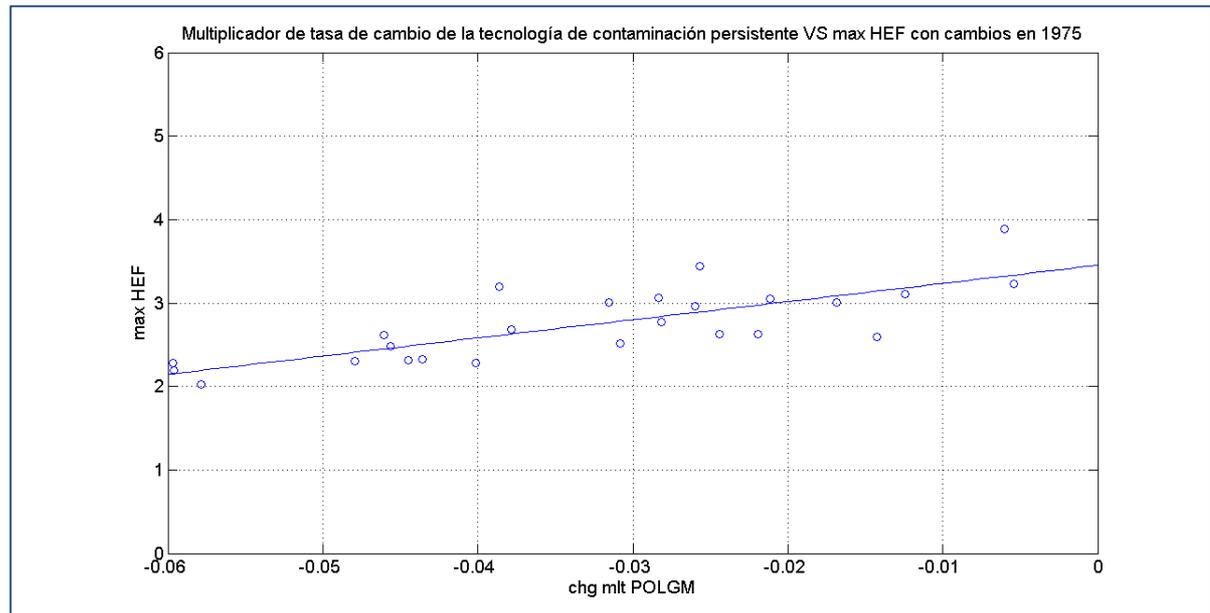


Figura 7.8.- Multiplicador de la tasa de cambio de la tecnología de de contaminación persistente VS max HEF con cambios en 1975

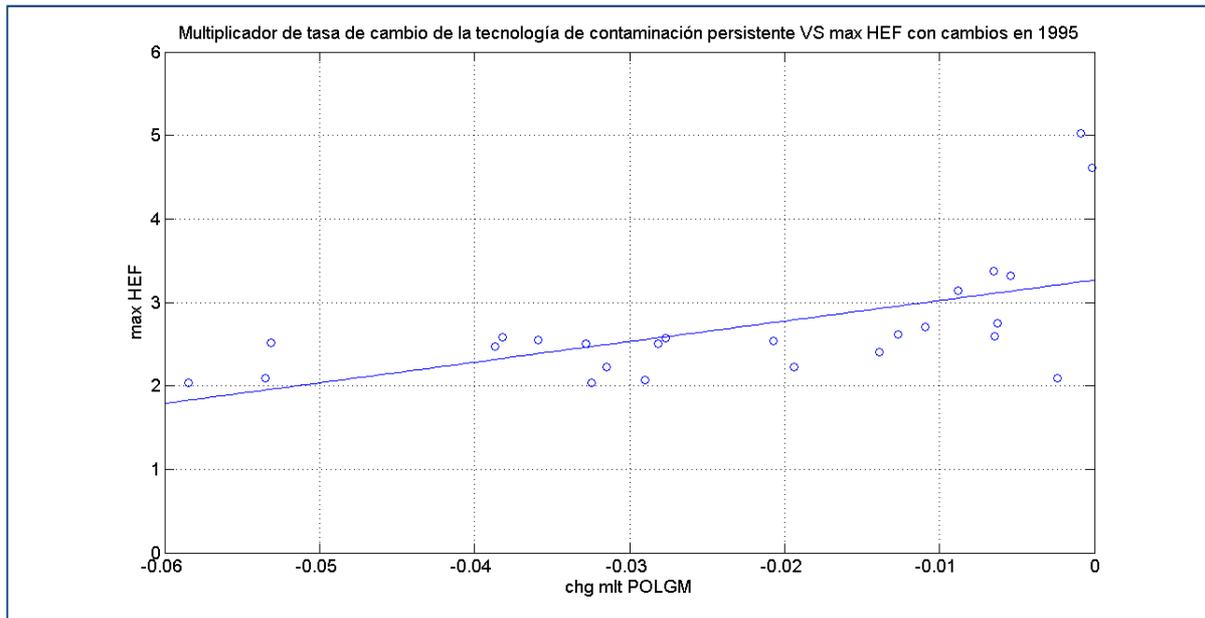


Figura 7.9.- Multiplicador de la tasa de cambio de la tecnología de de contaminación persistente VS max HEF con cambios en 1995

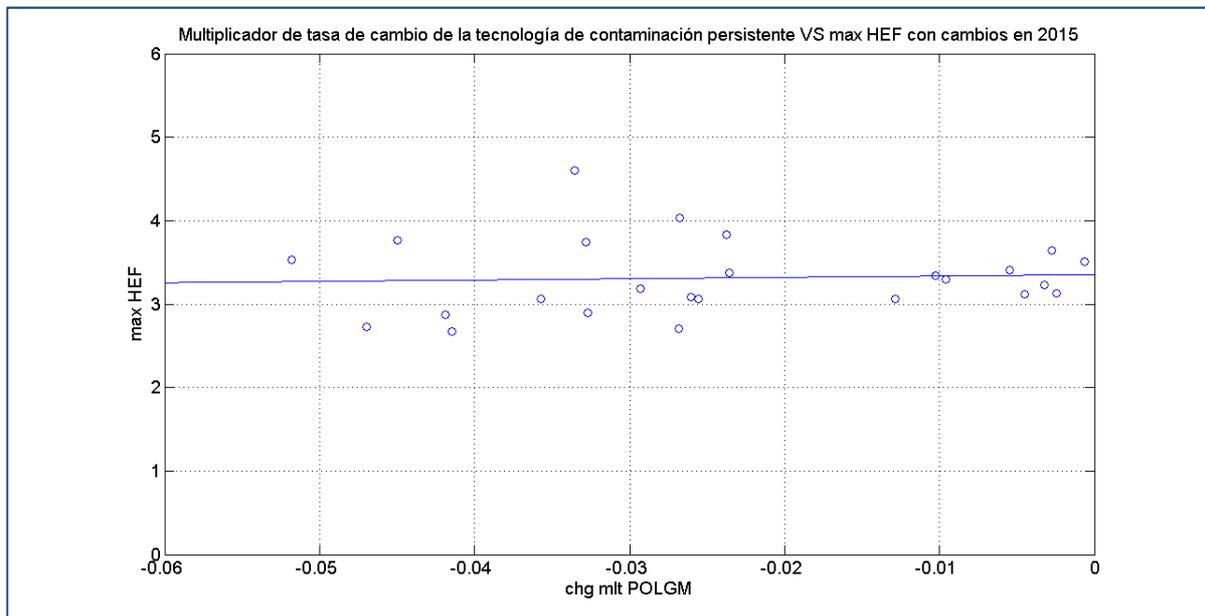


Figura 7.10.- Multiplicador de la tasa de cambio de la tecnología de de contaminación persistente VS max HEF con cambios en 2015.

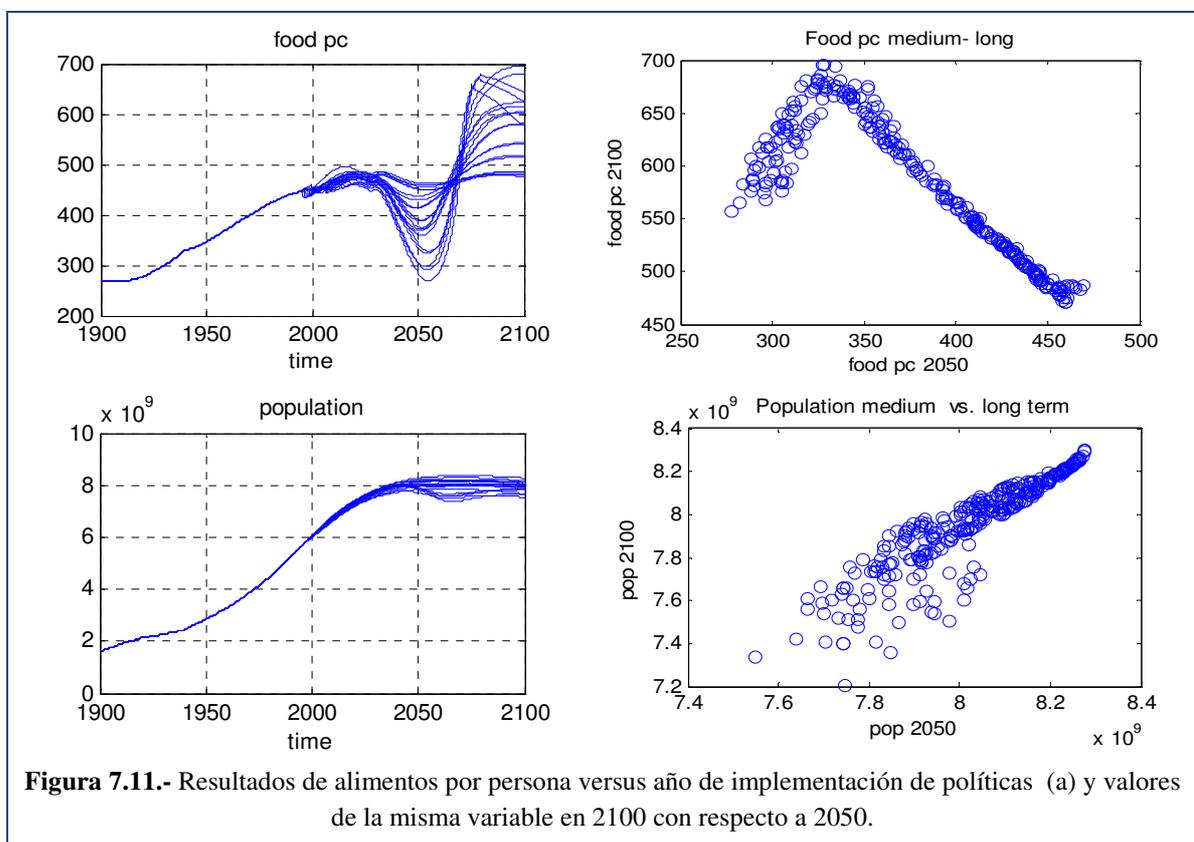
Según las gráficas de coeficientes de correlación, la incidencia de un retraso en la aplicación de políticas destinadas a contener la contaminación tienen una incidencia más positiva en la disminución de la huella ecológica en torno al año 2000, o sea a medida que se retrasa la decisión, el impacto es mayor, pero a partir de estas fechas, los retrasos en la



toma de decisiones provocan menores efectos es decir estas políticas son más ineficaces. Esto lo corroboran las gráficas de planteado de máximos de HEF en función de la intensidad en la aplicación de políticas limitadoras de la contaminación. Vemos que la gráfica que nos da una mayor pendiente entre los máximos de HEF y chg_mlt_POLGM es la de 1995. En 1995 es el año en el que usar más recursos para limitar la contaminación provoca descensos en el máximo de huella ecológica de forma más acusada.

7.2.3 Comparando planteados y salidas

También puede trazar los valores de la salida en instantes de tiempo diferentes para tener una idea de la verdadera forma de las curvas. Por ejemplo, en la figura 9a tenemos los resultados de los alimentos per cápita de varias simulaciones con parámetros aleatorios (los parámetros de 7 a 12 desde 1995 hasta 2020, la distribución uniforme). En esta gráfica se muestran las curvas de todos ellos juntos y no sabemos si la forma normal de las curvas es la de una curva que, o bien se reduce muy fuertemente y luego va hacia arriba a un valor muy alto o si las curvas que terminan muy alto son aquellos cuyo valor medio es moderado. Sacando la gráfica del valor de la curva en medio y en el largo plazo despejamos esta pregunta. Figura 7.8b nos muestran que la mayoría de las curvas que tienen un valor muy alto en el año 2100 tienen un valor muy bajo en el año 2050 tienen un valor muy bajo en el año 2100, por lo tanto, las curvas o bien oscilar bruscamente de la estancia estable. Por otra parte en la figura 10 podemos ver que las curvas de la población no se cruzan, si la población es baja en el mediano plazo es baja en el largo plazo también.





ANÁLISIS AUTOMÁTICO DE MODELOS COMPLEJOS
UTILIZANDO HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA
ARTIFICIAL PARTIENDO DEL EJEMPLO DEL WORLD3





7.3 LÓGICA DIFUSA

7.3.1 Introducción a la lógica difusa

Normalmente, los modelos de dinámica de sistemas son evaluados al mirar las gráficas de las variables de salida. Es el creador de modelos humanos el que decide cuándo o no una curva muestra una "buena", "pobre" o "excelente" respuesta. Si el número de indicadores es alto, sería deseable contar con un procedimiento automático para clasificar la forma de una curva y extraer automáticamente la información deseada. La lógica difusa puede ayudarnos en esto, ya que es una forma de lógica diseñada para imitar el razonamiento humano y su imprecisión.

La lógica difusa se basa en el concepto de un conjunto borroso de resultados. Un conjunto borroso es un conjunto sin un límite nítido y bien definido. Puede contener elementos con sólo un grado parcial de los miembros. Por ejemplo, en una simulación de la población mundial, podríamos decir que si la población humana es por encima 9.000 millones, de habitantes es claramente alto, mientras que por debajo de 5.000 millones es claramente baja, pero ¿qué pasa con las poblaciones de entre 5.000 y 9.000? Podrían ser de "alto", pero no muy "alta" o "alta" sólo a un cierto grado. La lógica difusa se describen las variables en términos de conjuntos borrosos con un grado de pertenencia, en este caso diríamos que la población es de 0,8 "de alta" y 0,2 "baja".

La lógica difusa se divide en tres etapas: fuzzyficación, la aplicación de reglas difusas y defuzzyficación. Fuzzyficación es el proceso de asignación de una variable de entrada (numérica) para un conjunto difuso con una función de pertenencia (un valor entre 0 y 1), (ver figura 11).

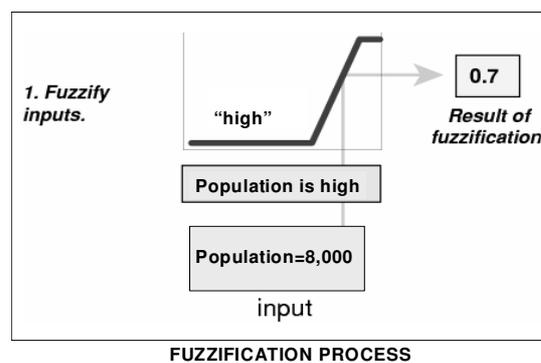


Figura 7.12.- Conjuntos fuzzy y proceso de fuzzyficación. Si la población del mundo es de 8000 millones, por ejemplo, será 0,2 “bajo” y 0,8 “alto”.



La aplicación de las reglas fuzzy se basa en una imitación de la lógica de razonamiento de los lenguajes humanos. Por ejemplo, podríamos aplicar la lógica descrita en la siguiente frase: "si el valor final de la población es baja y la curva de la población tiene una pendiente muy negativa, entonces el resultado de la simulación es una catástrofe" (ver figura 7.10)

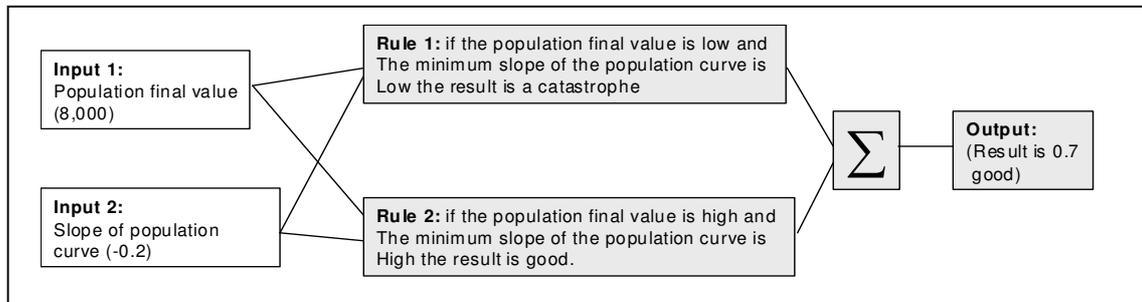


Figura 7.13.- Reglas Fuzzy

La segunda etapa es la aplicación de normas difusas. Los operadores básicos de estas oraciones lógicas son los operadores AND, OR y NOT (como en la lógica convencional), y se aplican utilizando el mínimo y el máximo de los valores de pertenencia, o sea la función del producto o probor (véase la figura 15 para una definición de probor y la figura 14 para una representación de las reglas difusas).

AND operator	Mínimo de la función de membresía
	Producto de las funciones de membresía
OR operator	Máximo de la función de membresía
	Probor operator (probor(a,b)=a+b-a*b)
NOT operator	Complementario (complement(a)=1-a)

Figura 7.14.- Tabla de aplicación de normas fuzzy

El proceso de defuzzyfication asigna un valor numérico a la salida de los conjuntos difusos de salida y las funciones de pertenencia. En las reglas simples, como los que se utilizan en este documento, el resultado de la operación lógica es suficiente.

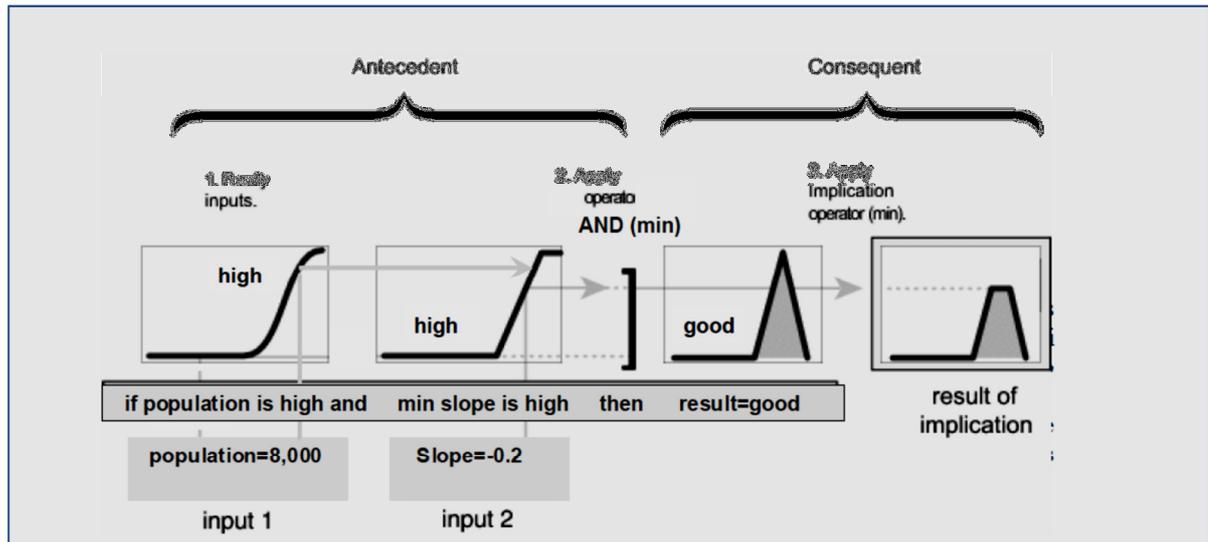


Figura 7.15.- Esquema de defuzzificación.

7.3.2 El uso de la lógica difusa en el World 3

Hemos utilizado la lógica difusa para evaluar la respuesta de los valores de salida de algunas simulaciones del World 3. La curva de la población es la salida que hemos seleccionado para un primer experimento. Diríamos que la curva es un mal resultado (catástrofe) si el valor final de la población es bajo, siendo esta característica la más importante. Pero, el resultado también es malo si el pico de la curva de población se produce muy pronto o si la pendiente final de la población es empinada, lo que significa que la población tiende a disminuir aún más. Por lo tanto, los siguientes valores de la curva de la población se tratan: el valor final, el año en que se alcanza el máximo y la pendiente final de la curva.

No obstante, para trabajar con lógica difusa teniendo en cuenta pendientes de curvas de salida deberemos hacer unas modificaciones a nuestro modelo para que se puedan utilizar estas estructuras.

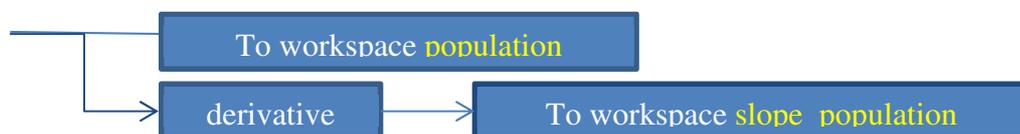


Figura 7.16.- Añadir la estructura derivative a las salidas del simuworld3 con las que queremos usar lógica difusa.

7.3.2.1 Analizando la población

Y la lógica difusa se utiliza es el de la frase:

IF

la población final es baja



OR

0,5 * año del pico de la población es bajo

OR

0.7 * la pendiente final de la curva población es bajo

ENTONCES → EL resultado es una catástrofe

En la figura 13 podemos ver varias curvas de población y los resultados de la aplicación de esta oración. Podemos ver que los resultados tienen diferentes grados de "maldad", que reflejan qué tan cerca están de las características expresadas en la frase difusa. El código Matlab de resultados se basa fundamentalmente en las funciones de la caja de herramientas difusa de Matlab, por lo tanto, sólo una etapa breve de la programación y el conocimiento de los algoritmos que se necesita.

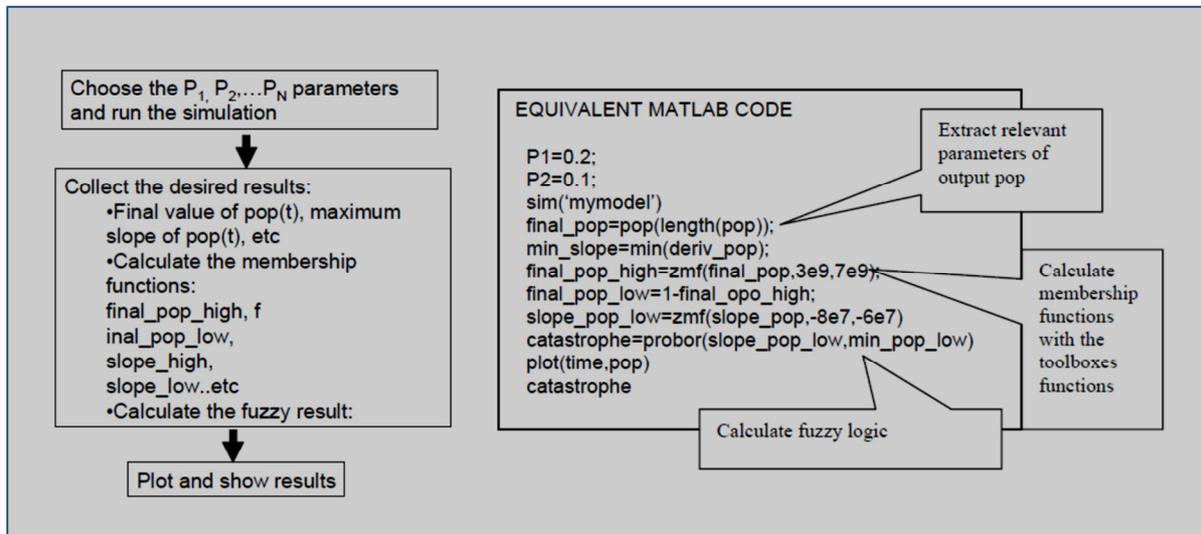
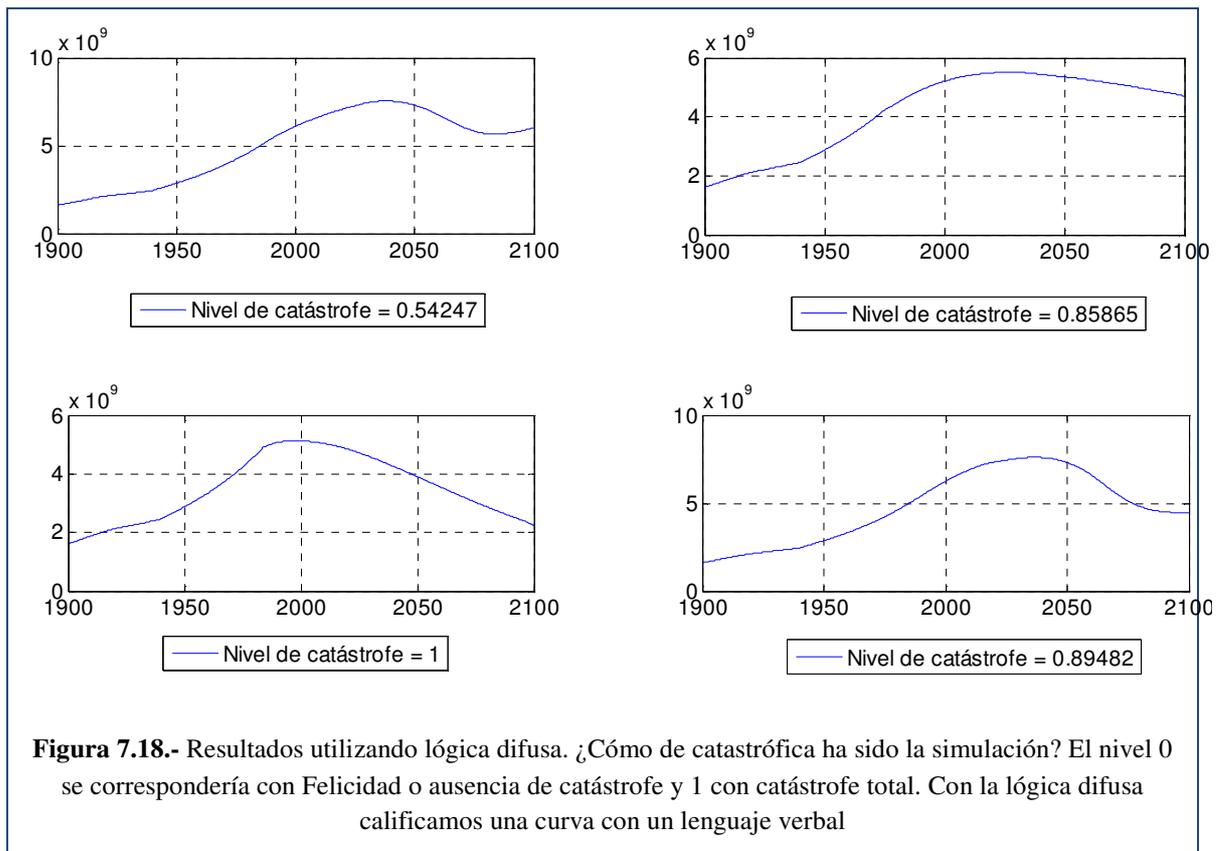


Figura 7.17.- Proceso de fuzzyficación, diagrama de flujo y estructura del código.



7.3.2.2 Un paso más analizando Huella Ecológica e Índice de Desarrollo Humano

Vamos a hacer un experimento más complejo. Ya que podemos crear un código que nos diga si una simulación es buena o mala sobre una curva, vamos ahora a lanzar unas decenas de simulaciones y vamos a ver qué políticas han resultado positivas sobre ciertas curvas. Para saber que políticas son positivas para el conjunto de la humanidad, vamos a seleccionar las curvas de Huella ecológica y de Índice de bienestar. Cuando ambas sean positivas consideraremos que la política ha sido acertada. Veamos cómo haremos esto.

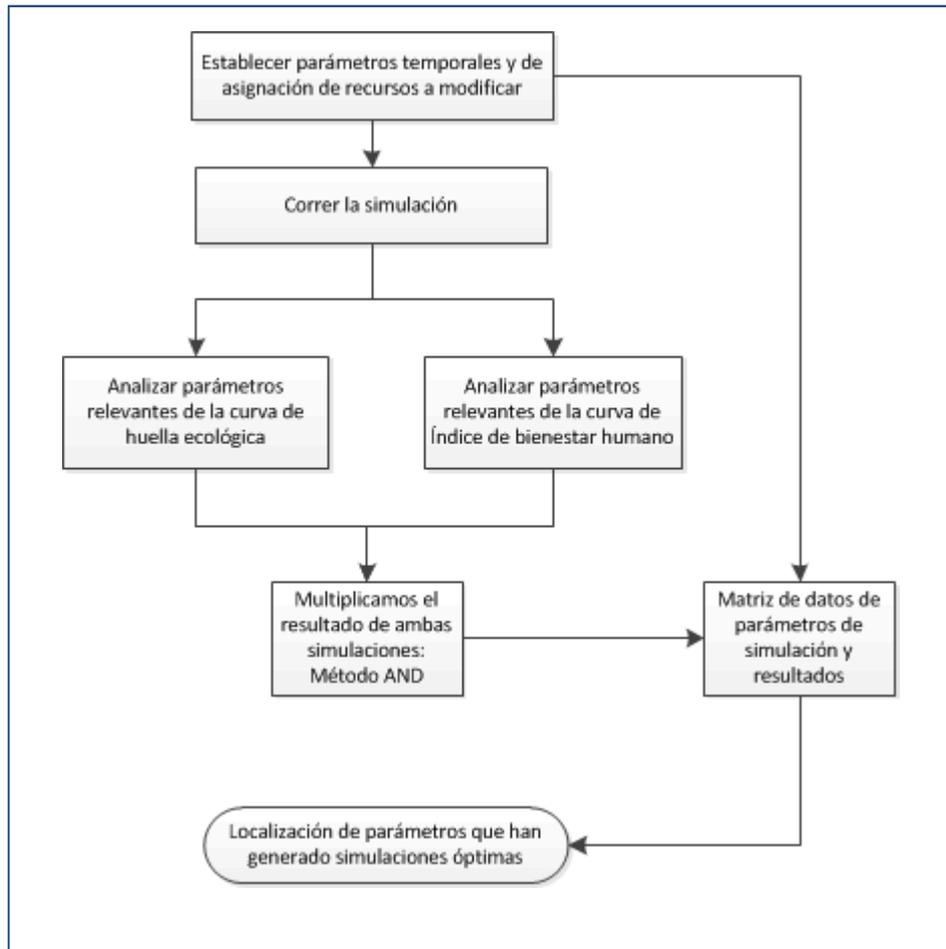


Figura 7.19.- Diagrama de flujo para localizar las simulaciones que dan resultados óptimos.

En particular vamos a prestar atención a tres procesos:

- ¿Cuándo la huella ecológica es asumible?
Cuando sea inferior a 1 a partir de una fecha no muy tardía y su crecimiento esté estabilizado. Para ello veremos a partir de qué año la HEF es inferior a 1 y que no sea mucho más lejos del año 2015. A partir de ese año lo ideal es que la pendiente se mantenga estable, ni suba ni baje mucho, ya que una bajada importante puede ser consecuencia de un proceso de desindustrialización desbocado que tampoco será síntoma de nada bueno. Mediremos con 0 una huella ecológica inasumible y con 1 una huella ecológica asumible.
- ¿Cuándo la curva de HWI es buena?
Cuando su máximo final está próximo a 1 y su diferencia entre el valor máximo y el final sea inferior a 0.1
- ¿Cuándo son buenas ambas?
Sabemos que HEF Y HWI en conjunto son buenas si son buenas las dos a la vez. Multiplicamos ambos valores y si el resultado sigue siendo próximo a 1 serán óptimas las simulaciones



Después de correr unas decenas de simulaciones, utilizaremos la sentencia find para localizar aquellos parámetros que nos den un producto fuzzificado de HEF y HWI mayores a 0.6.

Los valores de los parámetros seleccionados irán a una hoja de cálculo. Intentaremos analizar en torno a qué valores se agrupan, lo cual nos servirá de introducción para el próximo punto relativo a los clústers.

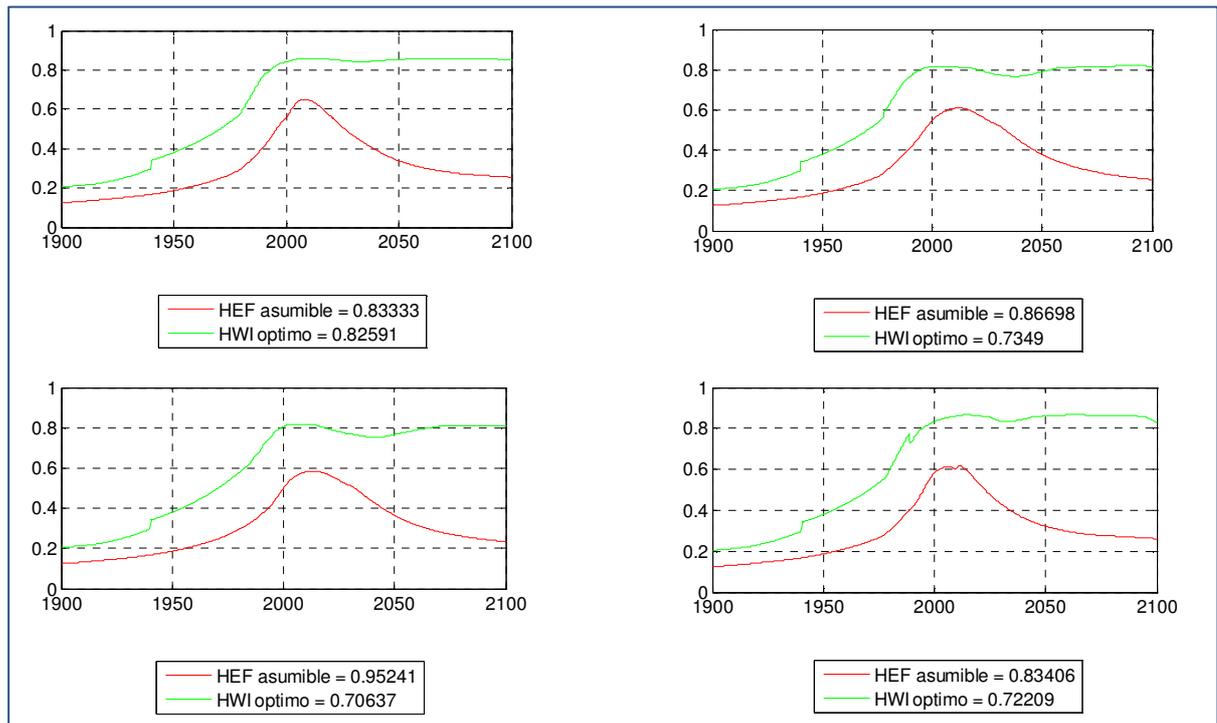


Figura 7.20.- Ploteado de las 4 primeras simulaciones que dan un valor de HEF asumible > 0.8 y HWI_optimo > 0.7



ANÁLISIS AUTOMÁTICO DE MODELOS COMPLEJOS
UTILIZANDO HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA
ARTIFICIAL PARTIENDO DEL EJEMPLO DEL WORLD3





7.4 FUZZY CLUSTERING

La agrupación de datos numéricos constituye la base de clasificación y modelado de muchos sistemas de algoritmos. El propósito de la agrupación es identificar agrupaciones naturales de datos a partir de un amplio conjunto de datos para producir una representación concisa de comportamiento de un sistema. Como ejemplo, podría tener datos de las características de un grupo de frutas (tamaño, color, peso) y nuestro propósito podría ser distinguir entre uvas, ciruelas y melocotones de acuerdo con estas características. La colección de datos tendría un aspecto similar a la de los datos de la figura 7.21. En el gráfico de la izquierda, el grupo de datos en cuatro bien definidas grupos, mientras que en el gráfico de la derecha (tomado de las simulaciones de World3), los datos son no tan claramente agrupados, pero aun así los hemos dividido en cuatro grupos cuyos transición es suave. Pero, en ambos casos podemos encontrar un centro para cada grupo, que representan las características del grupo ("uvas", "ciruelas" o ""), y en ambos casos, la técnica de la agrupación se clasificación artículos y también ofrece una concisa representación de los datos.

Fuzzy c-medios (FCM) es una técnica de agrupación de datos en donde cada punto de datos se caracteriza por un grado de pertenencia a cada grupo. Esta técnica es una mejora sobre métodos de agrupación anteriores (ver <http://www.mathworks.es/videos/getting-started-with-fuzzy-logic-toolbox-part-1-68764.html>). Los algoritmos de clasificación Fuzzy comienzan con un valor inicial de los centros de racimo, que están destinados a marcar la posición media de cada grupo. También suponen un número inicial de las agrupaciones. Lo más probable es que el valor inicial de estos centros de los conglomerados sea incorrecto.

Además, el algoritmo asigna a cada punto de datos un grado de pertenencia para cada clúster. De forma iterativa la actualización de los centros de los conglomerados y los grados de pertenencia para cada punto de datos, se mueve iterativamente los centros de los conglomerados a la ubicación correcta dentro de un conjunto de datos. Esta iteración se basa en la minimización de una función objetivo que representa la distancia desde cualquier punto dado de datos a un centro de la agrupación ponderada por grado de pertenencia de ese punto de datos.

Esta iteración se basa en la minimización de una función objetivo que representa la distancia desde cualquier punto de los datos facilitados a un centro del cúmulo ponderado por grado de pertenencia de ese punto de datos.

El algoritmo clúster ya está programado en la caja de herramientas de Matlab fuzzy, sólo tenemos que darle los datos que queremos que clasifique y el número de grupos que estimamos.

En algunas ocasiones no es fácil estimar el número adecuado de grupos y uno tiene que utilizar un proceso de intento y error. En nuestro caso, hemos encontrado que las simulaciones del World3 no nos dan grupos bien diferenciados de los resultados, la transición es siempre suave, por lo tanto, no es tan relevante para decidir el número de grupos, pero aun así, incluso si el número de agrupaciones no es muy adecuado los centros son buenas representaciones de la serie de experimentos.

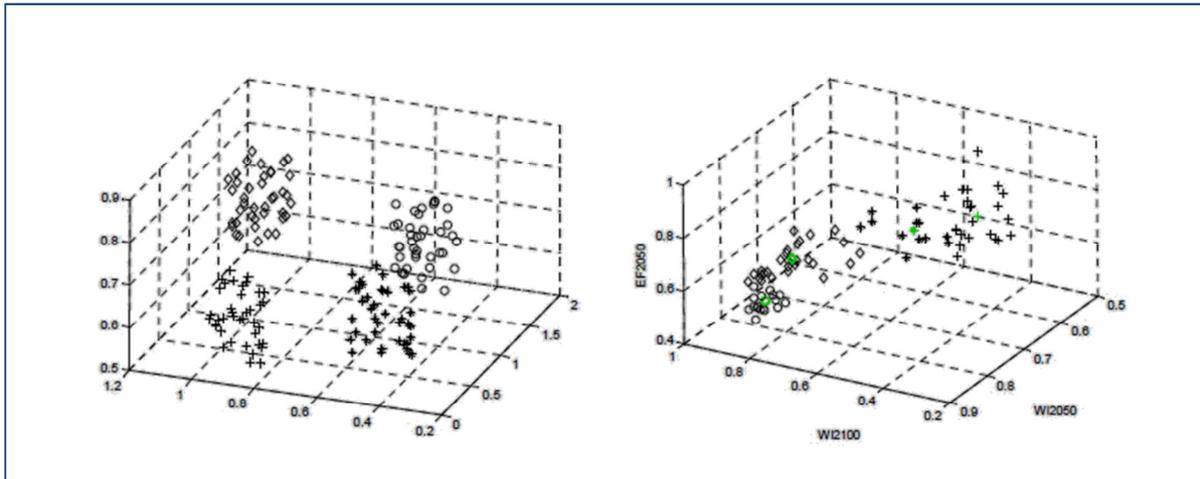


Figura 7.21.- Ejemplos de la agrupación de datos en tres dimensiones. Los puntos que pertenecen a grupos diferentes se representan con símbolos diferentes.

Si se utiliza puntos de datos, tales como los de la figura 19, donde los datos tienen tres dimensiones (las características relevantes son dos o tres), es fácil de inspeccionar los resultados gráficamente, pero, si la dimensión de los datos es mayor que tres, uno no puede ver los resultados en un gráfico. En estos casos, es importante disponer de un índice que cuantifica la cantidad de los datos agrupados son alrededor de los centros de los conglomerados. Hemos utilizado como principal índice de la relación entre la distancia media entre los datos de cada grupo y la distancia media entre los centros de los conglomerados. De esta manera, si el valor es 1, significa que la distancia entre los grupos es similar a la distancia entre los puntos en cada grupo y no hay agrupación, si la distancia es menor, los datos son más agrupados. Este índice nos dice cómo agrupar los datos, pero no nos puede decir si los grupos están muy separados o no, pero en nuestro análisis del mundo 3 no encontramos eso también importante. Incluso en los casos en que el índice es una y los datos no se agrupan en racimos, nuestro proceso de agrupación en su caso, ya que nos da una buena estimación de que los resultados de nuestras simulaciones son.

7.4.1 Aplicaciones del Fuzzy Clustering en el World3.

Si queremos utilizar la agrupación difusa para analizar los resultados de nuestras simulaciones del World3, en primer lugar debemos elegir los datos que desea agrupar. Los datos que tenemos son los parámetros aleatorios de nuestras simulaciones y los resultados correspondientes (valor final de la población, la huella ecológica, índice de bienestar humano el parámetro calif_global) Esos son muchos datos difíciles de manejar, a menos que los tratamos, como lo estamos haciendo con la agrupación.

Lo que vamos a hacer es aprovechar el experimento anterior, que lanza 100 simulaciones modificando los 19 parámetros de la tabla 7.1. Mediante la técnica de fuzzy hemos seleccionado las curvas de HWI y HEF que de forma simultánea tienen un grado de bondad superior a 0.6. Ahora con las técnicas de clustering vamos a agrupar y a buscar los centros de las nubes de puntos que dan valores positivos.



En un primer experimento y con objeto de poder visualizar gráficos en 3D vamos a visualizar 2 entradas y una salida. Las entradas serán: un tiempo de cambio de política, un cambio en asignación de recursos y un resultado sobre un indicador de bienestar. En concreto vamos a analizar $t_{ind_equil_time}$ con $ind_out_pc_des$ y $calif_global$. Luego mediante tanteos buscaremos el centro o centros de las agrupaciones que puedan surgir. Presentamos en la figura 7.22 el diagrama de flujo de la simulación y la obtención de centros

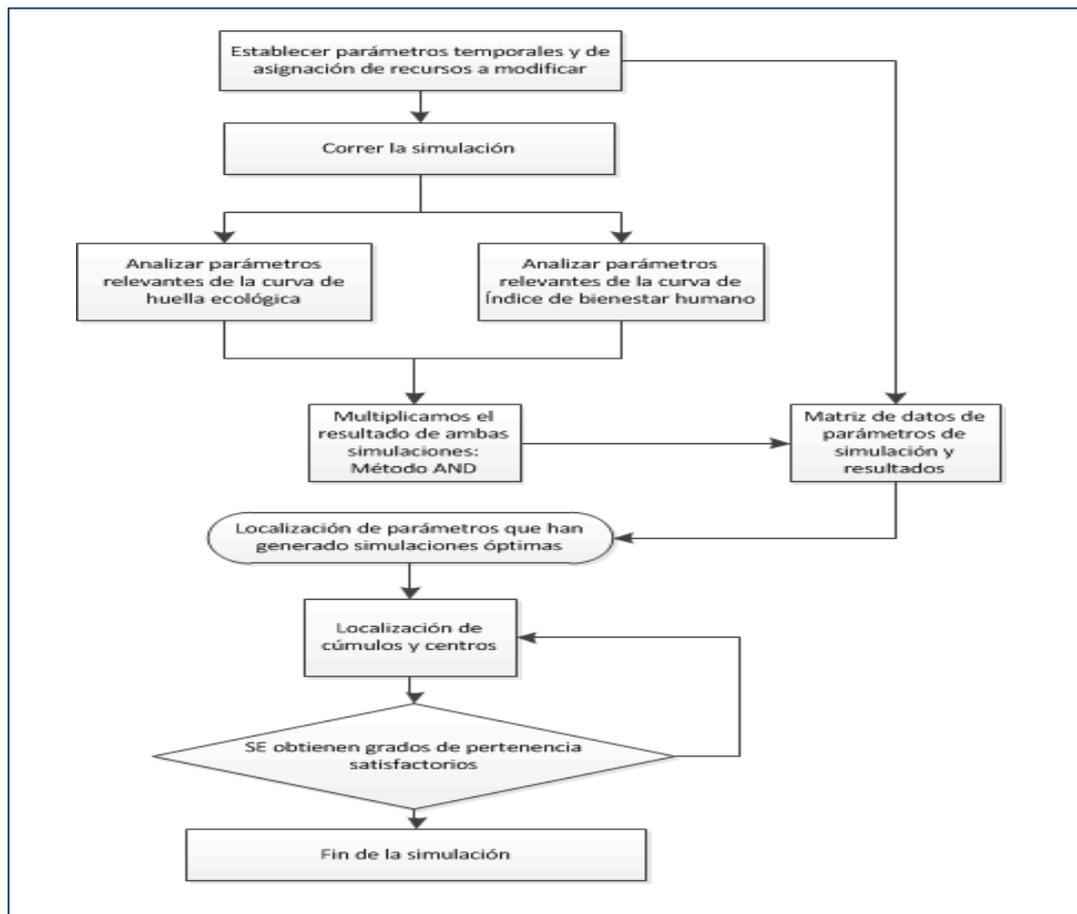


Figura 7.22.- Diagrama de flujo del programa m-file para obtener los clústers y centros de los parámetros que han generado simulaciones sostenibles

7.4.1.1 Explicación del código y de la función fcm

La función clave para aprovechar la potencia del clustering es fcm. La sintaxis para usarla es la siguiente según Matlab help:

$[CENTER, U, OBJ_FCN] = FCM(DATA, N_CLUSTER)$

DATA=Conjunto de datos

N_CLUSTER= N° de clústers a localizar

CENTER=Matriz con las coordenadas de los centros



\underline{U} =Matriz con el grado de membresía de cada uno de los puntos a cada uno de los centros. El valor oscila entre 0 y 1. 0 indica ausencia de membresía y 1 indica membresía completa

$\underline{OBJ_FCN}$ = En cada iteración, una función objetivo se minimiza para encontrar la mejor ubicación para los grupos y sus valores se devuelven en $\underline{OBJ_FCN}$.

La función $\max_u = \max(u)$ nos permite saber a qué centro se puede asignar cada punto y saber asimismo el grado de membresía de cada punto al centro de clúster más próximo. Con pequeños fragmentos de código adicionales podemos plotear cada punto con un carácter diferente en función de a qué clúster pertenezca.

7.4.2 Agrupando parámetros y resultados en clústers 3D

En este experimento vamos a lanzar 100 simulaciones y vamos a seleccionar aquellas simulaciones que nos den un valor de *calif_global* >0.6. Recordemos que *calif_global* es bueno si *huella ecológica* es buena y su Índice de bienestar es también bueno. Hemos considerado *huella ecológica* como buena si su índice de bondad es mayor que 0.8 y el *índice de bienestar* lo hemos considerado bueno si era superior a 0.7. El producto de ambos índices nos da 0.56 que hemos redondeado a 0.6 para ser un poco más exigentes. En el experimento hemos movido aleatoriamente todos los valores que los Meadows suelen mover en sus escenarios más los que hemos seleccionado nosotros (ver tabla 7.1). Para valorar las si unas curvas eran buenas hemos utilizado lógica difusa, y ahora para ver cómo se agrupan los parámetros que producen buenas simulaciones hemos utilizado la función *fcm* que nos agrupa resultados en torno a tantos clústers como le digamos. Pero al querer representar los resultados en 3 dimensiones hemos elegido las políticas de equilibrado industrial. ¿En torno a qué años se deben tomar estas políticas y con qué nivel de consumo de la producción industrial se puede conseguir un bienestar aceptable con un impacto pequeño? Presentaremos un gráfico 3d con las variables independientes *t_ind_equil_time* e *ind_out_pc_des* y *calif_global* como dependiente. Veremos cuáles son los centros de gravedad de estas nubes de puntos y el grado de cada punto a ese centro.

Podríamos repetir el experimento con otro par de parámetros de entrada hasta llegar a los 19 parámetros con los que hemos trabajado, pero más adelante agruparemos los puntos en espacios n-dimensionales aunque ya no se podrán plotear los resultados, pero de forma algebraica sí que podremos sacar conclusiones.

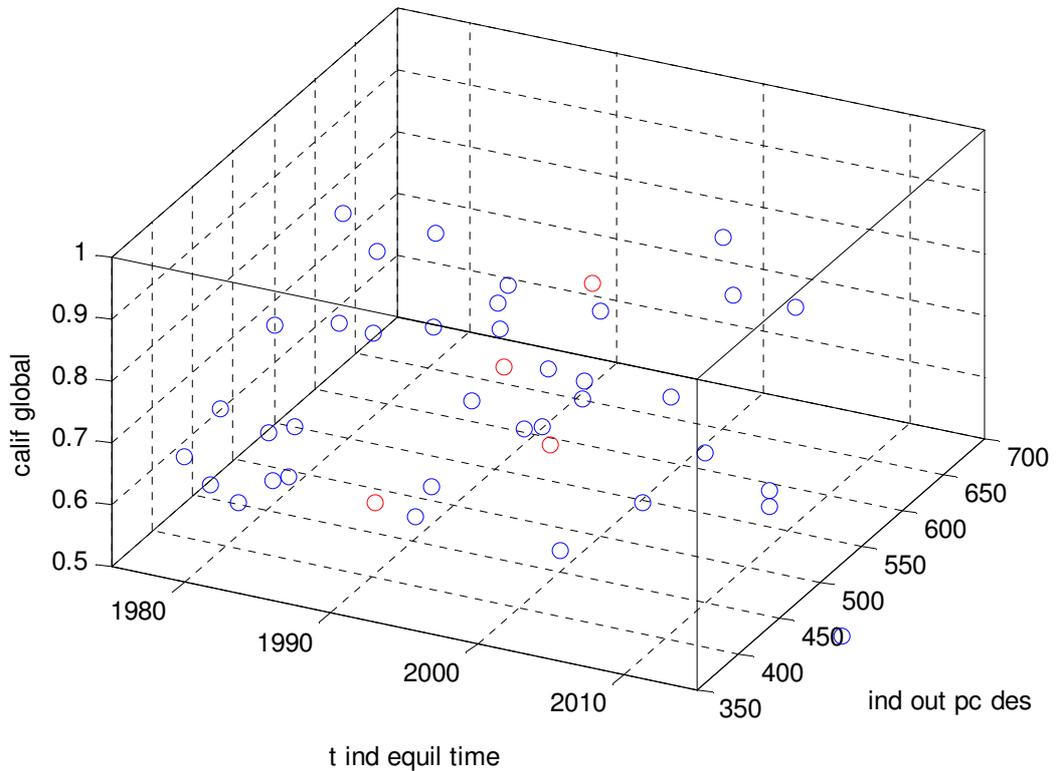


Figura 7.24.- Gráfico 3D que nos valora la *calif_global* de la simulación. Como variables independientes hemos elegido representar el año de equilibrio de la producción industrial y el nivel de renta deseado, aunque se ha lanzado la simulación variando los 18 parámetros de la tabla 7.1

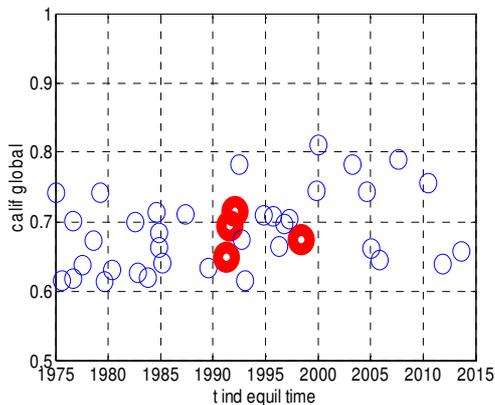


Figura 7.25.- En esta vista lateral vemos que los centros de los clústers que dan simulaciones positivas se agrupan entre los años de equilibrio de la producción industrial 1990 y 2000

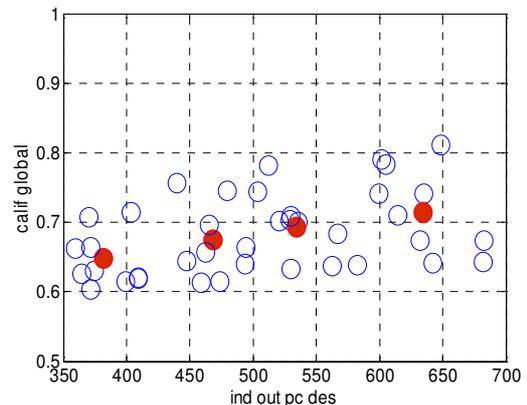


Figura 7.26.- En esta vista lateral vemos que los centros de los clústers que dan simulaciones positivas no se agrupan en niveles de renta demasiado estrechos. Están bastante repartidos entre 350 y 700.

Como conclusión a este experimento, se puede decir que los tiempos se concentran en torno 1995 – 2000 y los niveles de consumo de la producción industrial deseados sí



que oscilan en torno 350 - 650. Hemos de recordar que en el experimento no se han modificado únicamente estas variables, se han modificado todas a la vez

7.4.3 Valorando los índices de agrupamiento

Queremos ahora saber cuántos puntos van a cada clúster y cuál es el grado de membresía de sus puntos a ese clúster. Para ello añadimos la siguiente porción de código.

```
matrix_clusters=zeros(3,num_centros);
for n=1:num_centros
    matrix_clusters(1,n)=n;
end
for c=1:length(u);
    maxu=max(u(:,c));
    l=find(u(:,c)==maxu);
    matrix_clusters(2,l)=matrix_clusters(2,l)+1;
    matrix_clusters(3,l)=(matrix_clusters(3,l)+maxu);
end
for n=1:num_centros
    matrix_clusters(3,n)=matrix_clusters(3,n)/matrix_clusters(2,n);
end
matrix_clusters
```

así obtendremos una matriz de tres filas y nº de columnas igual al nº de centros deseados. En la primera fila tenemos el nº de clúster, en la segunda el nº de puntos asignados a ese clúster y en la tercera la media de los valores de membresía.

Veamos ahora las coordenadas de los 4 centros y el grado medio de membresía de sus puntos

Nº Centro	T ind equil time	Ind out pc des	Calif global	Nº de puntos de ese clúster	Membresía de los puntos del clúster al centro
Centro1	1992.0	634.2943	0.7149	10	0.8962
Centro2	1998.4	468.5016	0.6743	10	0.8693
Centro3	1991.6	534.5017	0.6931	10	0.7872
Centro4	1991.3	381.6496	0.6486	9	0.8257

Tabla 7.2.- Localización de 4 centros. Simulink nos permite conocer el nº de puntos asignados a cada clúster así como saber el grado de membresía que tienen a ese clúster.

Hagamos el experimento ahora con 8 clústers

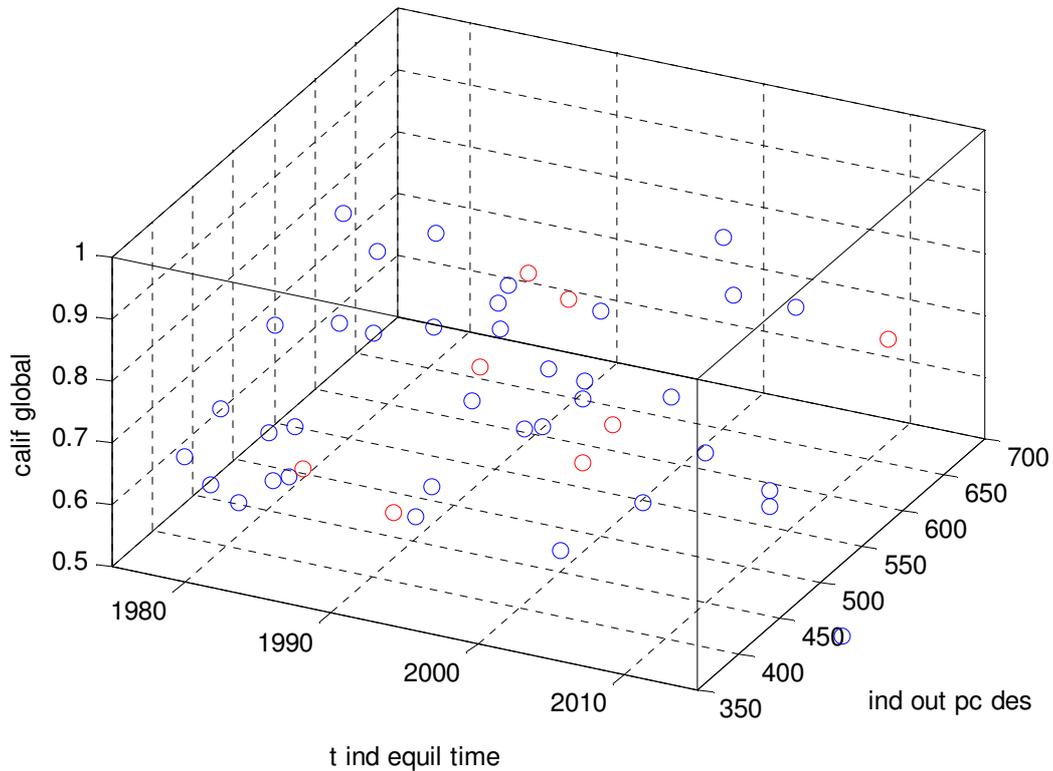


Figura 7.27.- Gráfico 3D que nos valora la calif_global de la simulación. Como variables independientes hemos elegido representar el año de equilibrado de la producción industrial y el nivel de renta deseado, aunque se ha lanzado la simulación variando los 18 parámetros de la tabla 7.1. En esta ocasión hemos seleccionado 8 centros.

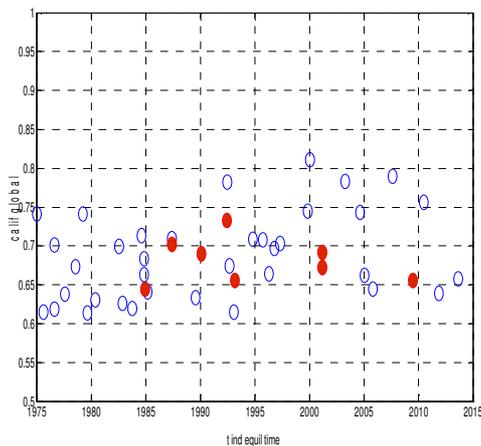


Figura 7.28.- En esta vista lateral vemos que los centros de los clústers que dan simulaciones positivas se agrupan entre los años de equilibrado de la producción industrial 1985 y 2010. La mejor calificación se obtiene entre 1990 y 1995.

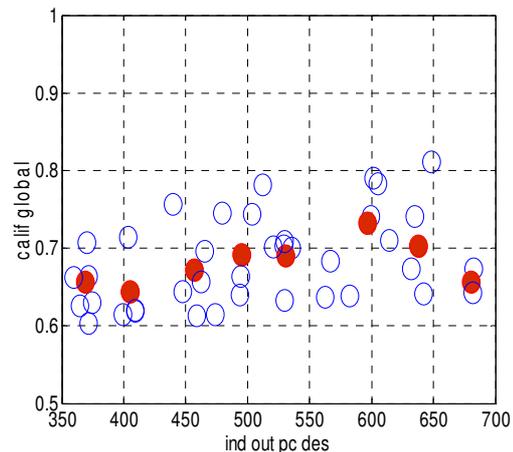


Figura 7.29.- En esta vista lateral vemos que los centros de los clústers que dan simulaciones positivas no se agrupan en niveles de renta demasiado estrechos. Están bastante repartidos entre 350\$ y 700\$. La mejor calificación se obtiene para 600\$.



Veamos ahora las coordenadas de los 8 centros y el grado medio de membresía de sus puntos.

Nº Centro	T ind equil time	Ind out pc des	Calif global	Nº de puntos de ese clúster	Membresía de los puntos del clúster al centro
Centro1	2001.2	495.1332	0.6920	6	0.8300
Centro2	1990.1	530.5417	0.6897	6	0.7007
Centro3	1987.4	637.7491	0.7024	7	0.6314
Centro4	2009.5	680.5698	0.6561	2	0.7487
Centro5	2001.2	457.1618	0.6722	4	0.8189
Centro6	1992.5	596.9829	0.7331	4	0.9361
Centro7	1993.2	368.5910	0.6560	4	0.8665
Centro8	1985.0	405.3354	0.6445	6	0.8503

Tabla 7.3.- Simulink nos permite conocer el nº de puntos asignados a cada clúster así como saber el grado de membresía que tienen a ese clúster. En este caso, la variación de puntos asignados a cada clúster es mayor que en el caso de 4 centros.

7.4.4 Clústers en espacios de dimensión - n

El interés real de la técnica de agrupación es la inspección de datos en espacios de dimensión alta, donde una inspección visual de los resultados no es posible. En esta sección se presenta un experimento en el que el número de variables es de 18: Todos los de la tabla 7.1. Tenemos por un lado 7 fechas de cambios de políticas, por otro un tiempo de retraso y 10 cambios en la asignación de recursos. Como salida tenemos la *calif_global* de la simulación. Correremos 500 simulaciones y seleccionaremos aquellas que nos den una *calif_global* superior a 0.6. Almacenamos en una matriz aquellos valores de las simulaciones que han proporcionado una *calif_global* superior a 0.6 y sacaremos 8 clústers para sacar conclusiones del tipo ¿En qué años se concentran las políticas que dan resultados positivos? ¿En qué rangos de asignación se mueven los parámetros que finalmente producen resultados esperanzadores? ¿Se puede hacer algo todavía a partir del 2015? Vamos por partes, corramos primero 500 simulaciones y veamos cuántas nos producen una *calif_global* > 0.6 y luego veamos qué 8 centros de clústers nos producen. Los agrupamos en dos tablas, una para los tiempos y otra para la asignación de recursos. Los valores los llevamos a una hoja Excel para poder maquetarlos un poco y poder presentarlos de forma más amigable.



Veamos los centros de los clústers en los años

Centros	t policy year	t air poll time	t land fert time	t fcaor time	t zero pop grow time	t ind equil time	t fert eff time
Centro1	1994,35	2000,07	1996,79	2003,50	2003,90	1996,94	1998,91
Centro2	1991,92	2003,85	1995,39	2003,71	1993,61	2000,68	2001,42
Centro3	1999,03	1996,63	1994,21	2000,62	2005,34	1989,96	1999,33
Centro4	2000,89	2001,12	2000,74	1996,17	2000,11	1993,51	1990,96
Centro5	1995,84	1996,20	2000,88	1996,87	2000,00	1997,14	2010,99
Centro6	1992,83	2005,26	1997,34	2001,21	2004,45	2001,43	1995,50
Centro7	1995,09	1992,02	1999,51	1994,21	2007,75	1997,27	2002,27
Centro8	2005,65	1997,51	2001,94	2001,28	2006,25	2002,33	1999,11

Tabla 7.4.1.- Centros de los 8 clústers de años de modificación de las políticas

Centros	In TDD	nr resources	p avg life			chg mlt POLGM	chg mlt NRCM	chg mlt LYCM	des fam size	ind out pc des	p avg life cap	p avg life servcap	p serv cap out ratio
			agr inp	chg mlt	chg mlt								
Centro1	10,55	1,69E+12	1,91	-0,04	-0,04	0,02	1,53	484,50	14,23	20,13	1,03		
Centro2	11,49	1,43E+12	2,25	-0,04	-0,05	0,02	1,39	530,40	13,94	20,29	1,14		
Centro3	12,26	1,86E+12	1,88	-0,04	-0,04	0,02	1,57	512,24	13,86	19,82	1,08		
Centro4	14,11	1,62E+12	2,33	-0,03	-0,03	0,02	1,34	470,70	13,56	20,69	1,12		
Centro5	10,83	1,53E+12	1,99	-0,03	-0,05	0,02	1,53	526,62	14,55	19,81	0,81		
Centro6	12,58	1,92E+12	1,98	-0,04	-0,04	0,02	1,42	530,27	13,98	19,73	0,93		
Centro7	11,14	1,98E+12	2,18	-0,05	-0,03	0,02	1,62	546,77	13,44	20,23	0,87		
Centro8	12,51	1,77E+12	1,83	-0,04	-0,04	0,02	1,59	517,46	13,70	19,69	0,95		

Tabla 7.4.2.- Centros de los 8 clústers de parámetros que dan simulaciones positivas.

7.4.4.1 Valoración de los resultados del análisis en espacios de dimensión – n

Entendemos que son muy elocuentes. Por un lado los tiempos de los cambios de políticas que producen simulaciones satisfactorias dan todas centros comprendidos entre 1990 y 2010. Esto quiere decir que según las estructuras del World3 ya estaríamos fuera de tiempo de conseguir buenas simulaciones. Esto tiene que ver con las afirmaciones hechas en la edición de 1991, más allá de los límites. Es decir según el World3 estaríamos ya abocados sin remedio al colapso. O al menos no sería posible conseguir el 0,7 de bondad combinada entre huella ecológica e índice de desarrollo humano.

En lo que hace a las asignaciones de recursos, los resultados también son tajantes. Analicemos variable a variable:

- *nr_resources*: (recursos no renovables) La opción más baja es de 1,43E+12. Este requerimiento sí parece aceptable, ya que todos los escenarios a partir del escenario1 partían de 2×10^{12} . Si parece que los descubrimientos en recursos no renovables hayan llegado a tal magnitud. Incluso la estimación más alta estaría en



1,98E12, o sea inferior a 2E12 que es la estimación más alta que se estimaba se podía alcanzar.

- *in_TDD*: (retraso en los efectos de la implementación de una política) Las políticas han de implementarse con plazos inferiores a 20 años. Todos los centros nos dan plazos de implementación entre 10 y 15 años.
- *p_avg_life_agr_inp*: (Vida media de los insumos agrícolas). Este parámetro no nos da valores muy significativos. Inicialmente los autores le dan un valor de 2 y no hay ningún escenario asociado a la modificación de este parámetro. Las mejoras en la conservación del suelo, que podríamos asociar a la implementación de la agricultura ecológica no estaba suficientemente estudiado en el World3-03. En las anteriores versiones ni siquiera aparecen. Los autores reconocen que en sucesivos modelos se podía estudiar más a fondo este parámetro, lo cual nos da cierta esperanza, pero en el World3-03 no parece determinante. En principio sí parece conveniente que sea mayor de dos, aunque hay casos en que sale un mundo sostenible disminuyéndolo incluso.
- *chg_mlt_POLGM* (multiplicador de la tasa de cambio de la tecnología de contaminación persistente) y *chg_mlt_NRCM* (multiplicador de la tasa de cambio de la tecnología de conservación de recursos): Todos los escenarios sostenibles implican una intensificación en esta política. En los escenarios estudiados en el World3-91 sitúan estos valores en -0.03. En nuestras simulaciones hemos movido estos valores entre 0 (escenarios Business as usual) y -0.06. Finalmente, no salió ninguna simulación sostenible por encima de -0.03.
- *chg_ml_LYCM*. (multiplicador de la tasa de cambio de la tecnología de rendimiento de la tierra) Otro recurso tecnológico, en este caso relacionado con la intensificación del rendimiento de los recursos agrícolas. En los escenarios Worl3-91 lo sitúa en 0.02. Nosotros en las simulaciones lo hicimos correr entre 0 y 0.04. Aumentarlo en demasía suponía aumentar la degradación del suelo. Es curiosos que todos los centros estén situados en 0.02. Menos de 0.02 produce alimentos insuficientes y más supone degradar y erosionar más la tierra.
- *des_fam_size*. (tamaño de familia deseada) El tamaño de familia deseada es muy contundente también. Aunque en un principio cabría pensar que con dos hijos por familia se estabilizaba el mundo, parece que si es menor el tamaño de familia deseada, se producen todavía resultados mejores.
- *ind_out_pc_des*. (producción industrial per capita deseada) Los valores de renta estabilizada óptimos para conseguir un buen índice de desarrollo humano se concentran en torno a 470,70 y 546,77, pero siempre estabilizados en la década de los años 90 del siglo pasado.
- *p_avg_life_ind_cap*, (vida media del capital industrial) *p_avg_life_serv_cap* (vida media del capital servicios), *p_serv_cap_out_ratio* (eficiencia de producción de servicios). No nos dan valores significativos, y de hecho, aunque los lazos existen, no son estudiados en ningún escenario del World3-91. Los dejan abiertos quizá para estudios posteriores. *P_avg_life_ind_cap*, podría tener que ver con el reciclaje de productos industriales, *P_avg_life_serv_cap*, tiene que ver con el recicleje de las infraestructuras de servicios y *p serv cap out ratio* podría tener que ver con mejoras en la eficiencia en la administración de los servicios de sanidad o educación. Tal y como están planteados los lazos y las funciones en el World3-03 no producen valores significativos. Son abiertas a sucesivos estudios, pero que en



el World3-03, con los datos estadísticos y funciones de principios de siglo expresan tendencias relevantes como decimos.



8. CONCLUSIONES



ANÁLISIS AUTOMÁTICO DE MODELOS COMPLEJOS
UTILIZANDO HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA
ARTIFICIAL PARTIENDO DEL EJEMPLO DEL WORLD3





8.1 RESUMEN DEL TRABAJO REALIZADO

Este trabajo ha explorado las posibilidades que un lenguaje de programación (Matlab-Simulink) nos da para la programación y el análisis de modelos basados en dinámica de sistemas. Asimismo, ha mostrado las posibilidades de algunas de las herramientas tomadas de oferta de la inteligencia artificial para el análisis de estos modelos. Hemos aplicado varias técnicas para el análisis de un modelo conocido y muy complejo: el World3. Estas herramientas han sido: el trazado de varias simulaciones, la agrupación en clústers, la lógica difusa, análisis de correlación, etc. Todas ellas permiten al programador automatizar el control de los resultados y dar más información sobre la relación entre los parámetros de entrada cambiantes y los resultados.

Todas estas herramientas hacen que el análisis de complejos modelos sea mucho más profundo que los simples análisis de sensibilidad y ayudan al modelador a extraer información de su modelo. También sería interesante que las empresas que crean software para sistemas de programación dinámicos desarrollen paquetes para interactuar con los entornos de programación matemática, tales como Matlab.

Se ha mostrado que usando esta plataformas de ingeniería es fácil programar simulaciones automáticamente, extraer características estadísticas y analizar los resultados con mejores herramientas y ver la dependencia de los parámetros entre sí con los resultados. Se ha visto también que es sencillo hacer otras cosas como el screening. El coste de programación una vez que se conoce esta plataforma es muy bajo. Se ha visto que la lógica difusa aporta ideas interesantes a la hora de automatizar análisis de curvas.

Y se ha visto que en caso de más de tres dimensiones, donde los análisis gráficos son imposibles y los análisis parciales son enormemente complicados de llevar a cabo las técnicas de clustering nos dan informaciones válidas y muy interesantes que condensan muchas características y mucha información en unos pocos parámetros y ejecuciones ejemplares o significativas.

Pero para poder aprovechar estas herramientas, primero había que tener una buena base en dinámica de sistemas, conocer bien el World 3, conocer bien Simulink y desarrollar un plan para traducir un modelo tan grande.

En el capítulo 2 hemos estudiado la dinámica de sistemas estudiando sus orígenes en la Teoría general de sistemas. Hemos estudiado sus esencias fundamentales: el uso de ecuaciones diferenciales y las estructuras de retroalimentación.

En el capítulo 3 hemos hecho un estudio a fondo del World 3 partiendo de los tres libros publicados por los autores hasta ahora. Y el estudio le hemos hecho ya con la perspectiva de lo que en este proyecto queríamos contar. Hemos visto lo que el programa de dinámica de sistemas utilizado por los autores permite y nos hemos planteado nuevas preguntas. Para ello hemos estudiado los escenarios descritos que podríamos agrupar en 3 tipos:

- Por un lado el escenario 1 Bussinees as usual, el actual en el cual todo sigue como hasta ahora,
- Por otro lado los escenarios de las soluciones tecnológicas que atacan a mejoras en la eficiencia energética, mejoras en la limitación de los impactos de la contaminación y mejoras en la productividad de la tierra. También hay escenarios



que combinan estas medidas con una intensificación en las mismas conducentes a limitar o reducir el tiempo de implementación de estas políticas. Estas medidas sólo tecnológicas parecen insuficientes para conseguir la sostenibilidad en el largo plazo.

- Otro conjunto de escenarios que podríamos llamar “escenarios del mundo estabilizado” donde aparte de medidas tecnológicas, se nos presentan medidas de limitación voluntaria de la población, estabilizando el tamaño de las familias a dos hijos por pareja o menos y también medidas enfocadas a estabilizar el consumo y limitar el crecimiento económico hasta hacerlo compatible con los límites biofísicos del planeta.
- El World3 en su última versión (Meadows, Meadows, & Randers, 2004) contiene más lazos o subsistemas que no son contemplados en ninguno de los 13 escenarios descritos en los libros, pero que nosotros si hemos utilizado para ver cómo se modificaba el mundo al modificarlos. Estos lazos permiten ya políticas conducentes a la conservación del suelo, medidas tendentes a ampliar el periodo de vida de las instalaciones y productos industriales y de servicios y políticas de población más restrictivas.

Una vez comprendido el alcance del modelo e incluso la precisión de sus estimaciones como se ha podido verificar ya 30 años después (Turner, A comparison of the limits to growth with thirty years of reality, 2008) (Turner, Updated Comparison of The Limits to Growth with Historical Data, 2012) se nos ocurrieron ciertos experimentos como los antes mencionados que ya no se podían hacer con el Stella. Para empezar ¿Por qué hacer escenarios discretos donde sólo se modificase una política a partir de un año en concreto? ¿Por qué no lanzar varias simulaciones a la vez moviendo esos años entre unos rangos de valores y analizarlas todas a la vez? Y otra cuestión muy recursiva en dinámica de sistemas: al hacer sistemas tan grandes, estos se convierten ya en cajas negras que sólo el modelador y no siempre comprende. ¿Cómo varían unas variables al variar otras? ¿Cómo de sensibles son con respecto a los resultados? Bien, si en los paquetes estándar de dinámica de sistemas no se pueden hacer estas cosas, pasémoslo a Simulink y hagamos esos estudios. A fin de cuentas Simulink es una herramienta de Matlab para simular sistemas dinámicos. Con Simulink podemos plantear de forma sencilla, gráfica e intuitiva ecuaciones diferenciales en el tiempo y utilizar sistemas de retroalimentación.

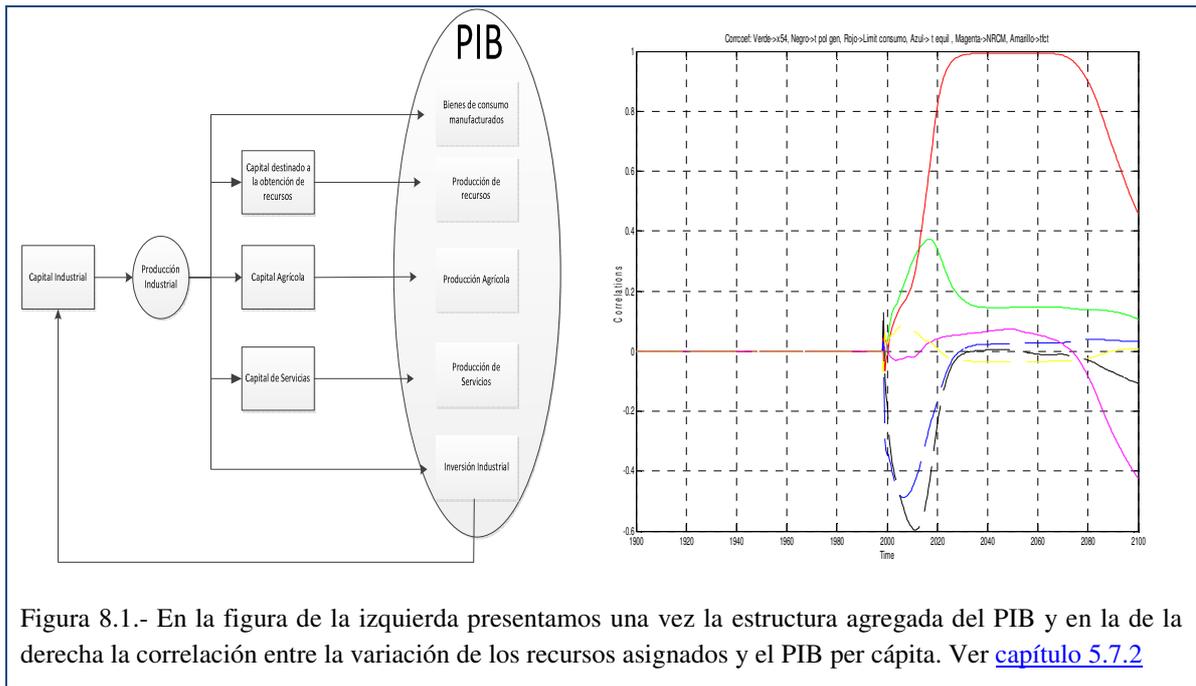
En el capítulo 4 empezamos describiendo todo lo que necesitamos de Simulink para hacer modelos basados en dinámica de sistemas. Vimos como traducir todos los diagramas de Forrester utilizados en el World3 así como configurar los pasos de integración y los solvers para que fuesen idénticos en Stella y en Simulink. Una vez descritas las posibilidades y explicado el funcionamiento de Simulink nos pusimos a reconstruir una a una todas las estructuras de dinámica de sistemas descritas en el capítulo 2, tanto las simples como las más complejas, incluyendo retrasos, bloque condicionales y subsistemas.

Una vez visto que se pueden reproducir diagramas de Forrester y todo tipo de estructuras típicas de dinámica de sistemas nos ponemos manos a la obra en el capítulo 5 a traducir el modelo completo. Previamente elegimos qué políticas queríamos simular para decidir que entradas y salidas tenía el modelo. Decidimos introducir todas aquellas entradas necesarias para generar los 13 escenarios más las estructuras adicionales con las que queríamos trabajar, por lo que decidimos utilizar 18 entradas. En cuanto a las salidas



elegimos 33 salidas diferentes para poder generar las 8 gráficas que los autores presentan en su versión World3-03. Con las entradas y salidas ya definidas nos ponemos a traducir subsistema a subsistema. Para ello fragmentamos también los subsistemas en Stella para poder comparar los resultados de los subsistemas de Stella con los de Simulink. Y así uno a uno se tradujeron los 15 subsistemas. Después de cada traducción, se calibraron uno a uno. Para calibrarlos, previamente con el programa Stella los separábamos del modelo y los guardábamos en un fichero nuevo de Stella con el nombre del subsistema. Las entradas variables se sustituían por entradas fijas con su valor en el año 1900. Por otra parte, en un fichero de Simulink reproducíamos ese subsistema con las estructuras propias de Simulink. Después simulábamos ambos subsistemas, el de Simulink y el de Stella y comprobábamos las salidas de ambos subsistemas. Cuando ambas salidas eran idénticas dábamos por validado el subsistema y ya teníamos una pieza buena. En esta obra reproducimos la construcción del subsistema Empleo en el punto [5.4](#). Después traducimos un subsistema más complejo y central de todo el modelo: El subsistema industrial. Primero lo construimos y calibramos al igual que el subsistema empleo, lo calibramos de forma independiente y lo volvimos a calibrar con entradas variables, con objeto de que nos saliesen curvas parecidas a las del modelo completo. Además, luego lo calibramos asociado al subsistema energético. El calibrado de estos sistemas acoplados podemos encontrarlo en el punto [5.7](#)

También se aprovecharon ya estos subsistemas traducidos para ir haciendo algunos experimentos sobre ellos. En particular una estructura que considero está en el corazón de todo el modelo y que se encuentra en el subsistema industrial queríamos hacer ya el estudio de correlaciones. A fin de cuentas la política es el arte de decidir entre lo necesario y lo posible y asignar recursos a una cosa significa quitárselos a otra. Al estudiar el siguiente esquema extraído del libro “Más allá de los límites del crecimiento” (Dennis Meadows, Meadows, & Randers, 1992) y que ha aparecido ya dos veces en este proyecto, uno puede tener la inquietud de ver cómo unas medidas quitan y ponen sobre otras. ¿Porque no usar ya las herramientas de cálculo de los coeficientes de correlación o el trazado de varias simulaciones para mejor entender las relaciones entre todos los lazos del subsistema? En la siguiente figura se presentan los resultados de un experimento de cálculo de correlaciones entre año de cambio de políticas que en este caso eran la política general t_policy_year y el año de estabilización de la producción industrial $t_ind_equil_time$. Además se podían elegir el nivel de renta deseado y el alargamiento de la vida útil del capital industrial, aparte de la fracción de producción industrial destinada a servicios, a reinversión en capital agrícola y en el capital destinado a la obtención de recursos energéticos no renovables.



Después de calibrar uno a uno todos los subsistemas y de ir acoplándolos y después de cambiar sus entradas fijas estáticas por otras dinámicas procedentes de otros subsistemas y de hacer un subsistema con 18 entradas y 33 salidas tenemos ya construido el simuworl3.mdl, el World3 en Simulink.

Presentamos una vista del simuworl3.mdl al abrirlo.

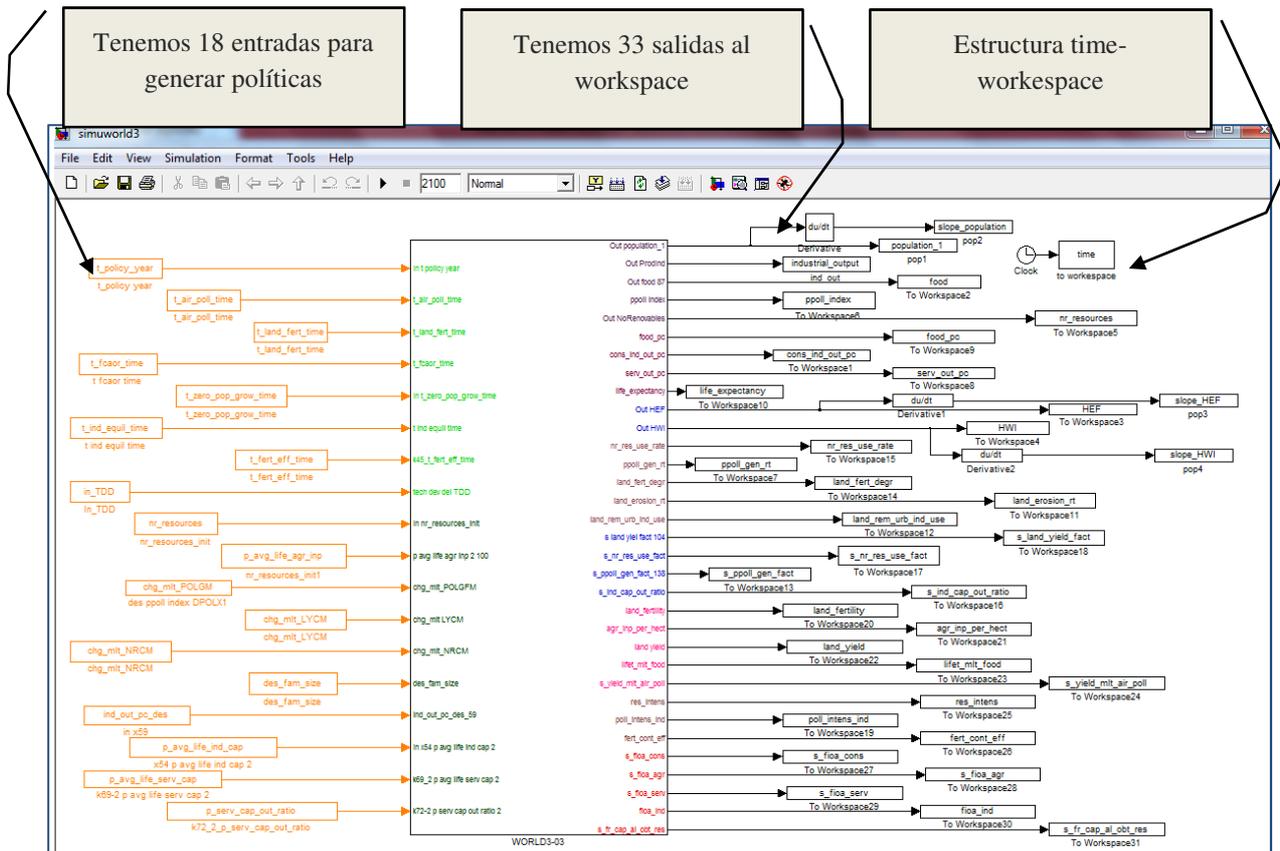


Figura 8.2.- Pantalla principal del simuworld3.mdl

8.1.1 Cómo usar simuworld3.mdl

Con el simuworld3.mdl construido ya podemos calibrarlo antes de hacerle ningún experimento. Decidimos introducir en esta obra dos calibraciones del modelo, una del modelo1 (Business as usual) y otra del modelo 10 (“Población e industria estabilizadas con tecnologías para reducir las emisiones, la erosión y el uso de recursos adoptadas en 1995”). En el capítulo 6 describimos cómo utilizar el simuworld3. A diferencia de los modelos en Stella no se puede pulsar el botón play directamente, es necesario hacerlo funcionar siempre a través de un m-file que introduzca valores en las 18 entradas que tiene y haga algo con sus 33 salidas. Al final de esta obra en el anexo1 tenemos 11 códigos para ejecutar el modelo y todos los experimentos descritos. En una ejecución simple del modelo para reproducir un escenario tendremos que introducir un código donde le demos valores de entrada que le dan los autores. Se han presentado distintas tablas según el experimento que se desee. Para una ejecución simple de un escenario, podemos remitirnos a la tabla del punto 6.4.2 Aparte de solucionar las entradas, debemos aprovechar las salidas y hacer algo con estos datos. En el código smw3_basico generamos las 8 graficas que nos da el modelo en Stella. En el punto 6.4.3 hemos comparado las 8 gráficas del modelo en Stella con las 8 gráficas del modelo en Simulink.



Una vez que sabemos cómo reproducir escenarios, ya `simuworld3.mdl` nos da todo lo que nos da el modelo en Stella. En el siguiente capítulo empezamos con los experimentos basados en inteligencia artificial.

Los primeros experimentos son los trazados de varias simulaciones. Lo que hacemos es que en vez de dar un único valor a cada entrada les damos una serie de valores de entrada aleatorios entre un valor máximo y un mínimo. Estos valores máximo y mínimo se han extraído de los valores que los autores usan para generar escenarios. Hay una tabla con los valores máximos y mínimos asignables a cada entrada en el punto [7.1.1](#)

El trazado de varias simulaciones nos permite ver todas las posibilidades de las curvas al ver una horquilla de posibilidades ya que vemos en una misma gráfica los máximos, los mínimos, las pendientes de las curvas, los saltos bruscos etc. También se nos puede ocurrir qué políticas debemos emprender para conseguir un alto nivel de bienestar sin comprometer los recursos futuros. En cada gráfica vemos las áreas de curvas que dan simulaciones compatibles con estos objetivos y curvas que dan resultados catastróficos. Quien quiera utilizar el World3 para jugar a la política puede necesitar saber qué políticas tienen más incidencia, es decir con qué decisiones existe una correlación mayor entre el cambio introducido y los resultados obtenidos. El político dispone de unos recursos limitados de capital y dedicar mayor proporción al consumo implica menos recursos para invertir en tecnologías de conservación del suelo y dedicar más recursos al incremento de los rendimientos de los recursos energéticos restantes puede implicar un descenso de los recursos destinables a políticas sociales.

En el capítulo [7.1.1](#) hemos sacado las 8 gráficas elegidas por los autores con un rango de variación expuesto en una tabla también de ese capítulo. Traemos a este capítulo de conclusiones la gráfica 3 de este capítulo. En ella podemos ver cómo hay simulaciones que nos dan un índice de desarrollo humano que se mantiene estable a partir del 2020. Y también indicadores de huella ecológica inferiores a 1 a partir de 2040, lo cual nos da a entender que un mundo estabilizado con buenos indicadores de bienestar y con baja huella ecológica son posibles. Trataremos de localizar en sucesivos experimentos las políticas que nos generan esos escenarios: ¿En qué año se tomaron las decisiones? ¿Qué reasignaciones de recursos hubo que hacer?

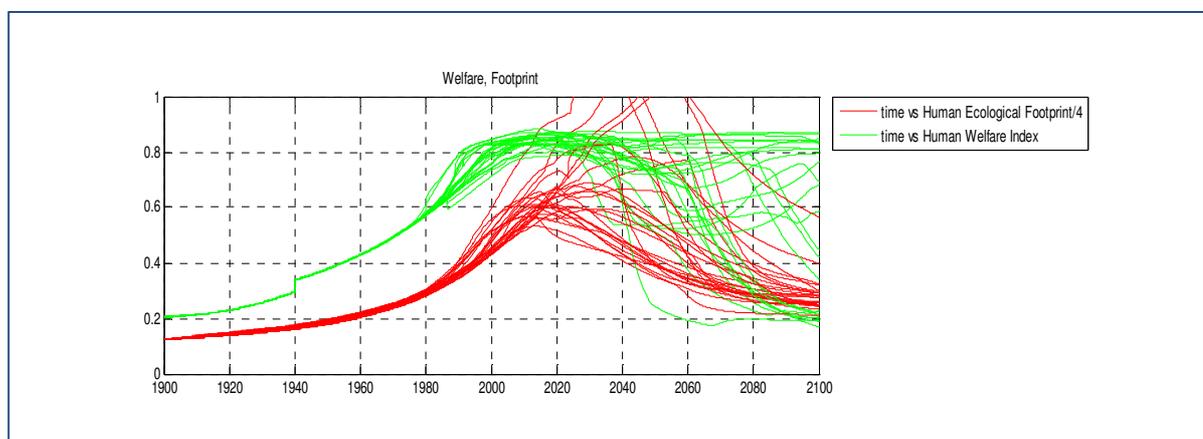


Figura 8.3.- Gráfica de simulaciones de Índice de desarrollo humano y huella ecológica extraída con `simuworld3.mdl`



El siguiente experimento va orientado al estudio de correlaciones. Resulta intuitivo pensar que un aumento en el esfuerzo por limitar el impacto de la contaminación provocará una reducción en la huella ecológica, así como limitar la fracción de la producción industrial consumida. Pero ambas políticas pueden repercutir negativamente en el índice de desarrollo humano que está relacionado directamente con el nivel material de vida. Tanto una medida como la otra serán medidas de austeridad. Ambas medidas además van ligadas a otras medidas (en cada simulación movemos 18 parámetros) que pueden aumentar o limitar su impacto. Con las funciones `corrcoef` vemos el grado de relación que hay entre cambiar una variable de entrada y sus cambios en la variable de salida para cada momento t de la simulación. Esto nos permite valorar la potencia de cada parámetro en cada momento del rango de simulación. Viendo las curvas de `corrcoef` que se aproximen a 1 o -1 en algún rango del periodo de simulación podemos ver qué medidas son más potentes y qué tiempos son los más sensibles. Para el World3 los tiempos más sensibles fueron el cambio en la política general en torno a 1995 y el tiempo de equilibrado de la fracción consumida de la producción industrial, también en ese entorno. También vimos cómo el relajar una política a partir de cierto tiempo, puede ser catastrófico.

Veamos algunas curvas de evolución del coeficiente de correlación:

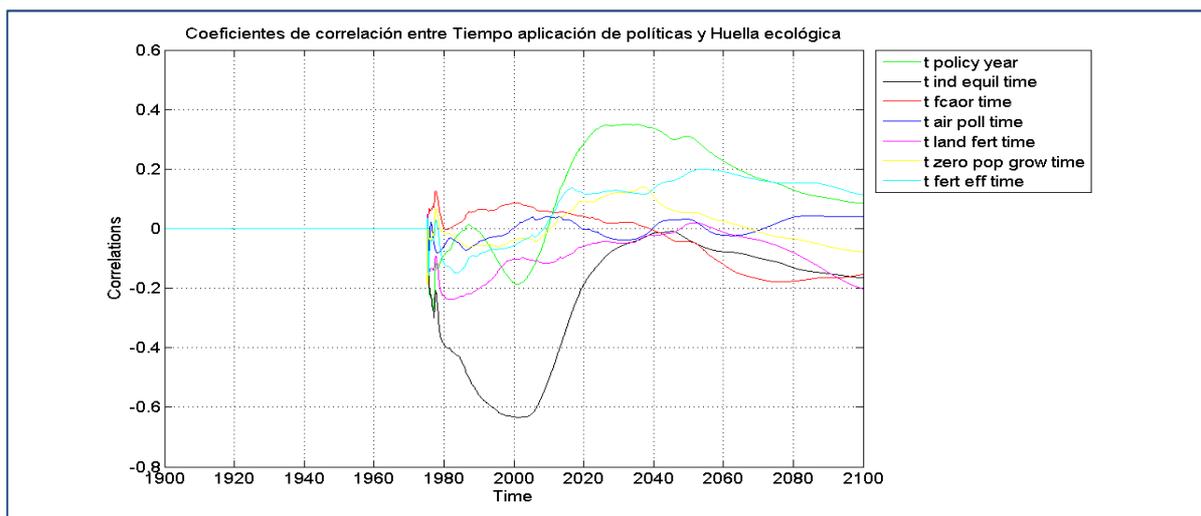


Figura 8.4.- Curvas de evolución del coeficiente de correlación de los años de aplicación de políticas y de la huella ecológica.

8.1.2 Experimentos con lógica difusa y clústers

Entramos ya más a fondo con las técnicas de Inteligencia artificial. La lógica difusa ("fuzzy logic" en inglés) se adapta mejor al mundo real en el que vivimos, e incluso puede comprender y funcionar con nuestras expresiones, del tipo "hace mucho calor", "no es muy alto", "el ritmo del corazón está un poco acelerado", etc.

La clave de esta adaptación al lenguaje, se basa en comprender los **cuantificadores** de nuestro lenguaje (en los ejemplos de arriba "mucho", "muy" y "un poco").



En la teoría de conjuntos difusos se definen también las operaciones de unión, intersección, diferencia, negación o complemento, y otras operaciones sobre conjuntos, en los que se basa esta lógica.

La lógica difusa nos permite definir si el resultado de una simulación ha sido bueno, muy bueno o por el contrario, ha sido catastrófico y cómo de catastrófico ha sido. Veamos cómo analizaríamos una curva de población.

SI
la población final es baja
O
0,5 * año del pico de la población es bajo
O
0.7 * la pendiente final de la curva población es bajo
ENTONCES → EL resultado es una catástrofe

Figura 8.5.- Criterios para valorar el carácter catastrófico de de una simulación atendiendo a la curva de población.

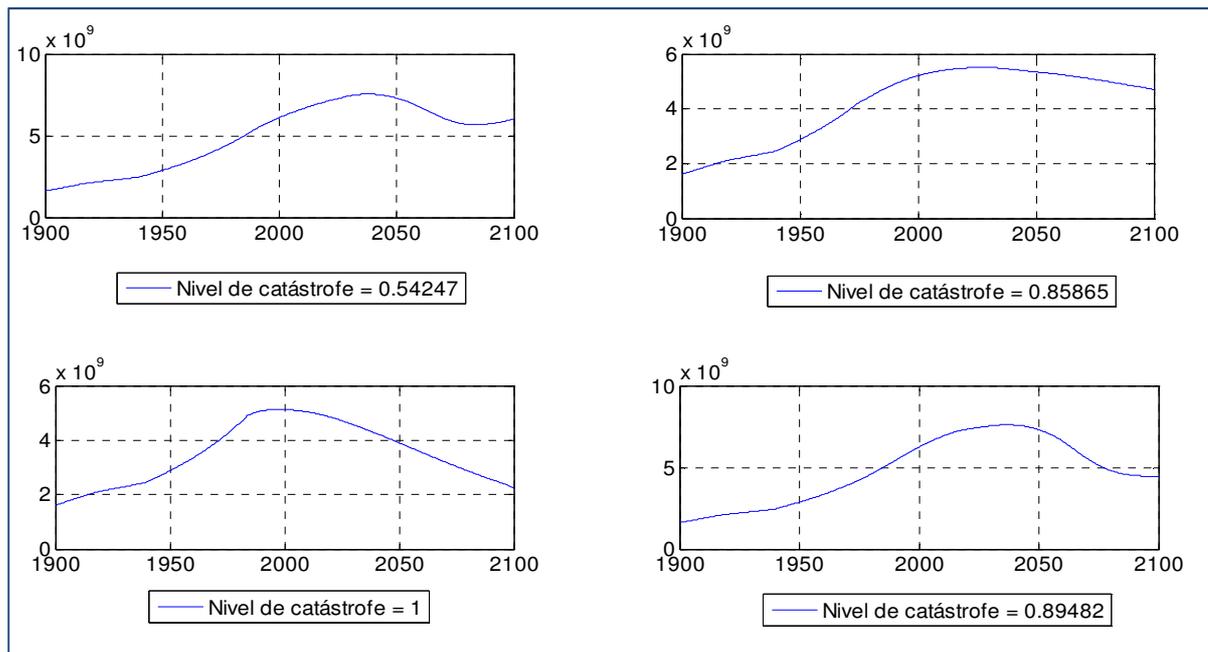


Figura 8.6.- Distintos ejemplos de evaluación del nivel de catástrofe de una simulación partiendo de la curva de población.

Para decir si la población final es alta a o baja, la comparamos con un valor alto y un valor bajo de referencia. Las leyes de unión, intersección y negación han sido explicadas en el punto 7.3. Podemos utilizar más reglas como por ejemplo que la diferencia entre el máximo y el mínimo sea grande o pequeña, podemos utilizar los valores de una variable en un punto, por ejemplo la población en el 2050. Las pendientes de la población acusadas son síntoma de desequilibrio en una variable, al contrario que pendientes pequeñas o planas, que son ofrecen imagen de estabilidad.



Las leyes de la lógica difusa también nos permiten interpretar dos curvas a la vez. Analizamos una, analizamos otra y luego podemos analizarlas en conjunto, dándoles un peso específico a cada una en el resultado final. Nosotros hemos aprovechado las curvas de Huella Ecológica e Índice de Desarrollo Humano. Juzgaremos ambas curvas por separado y luego las consideraremos en conjunto. Elaboraremos un índice de bondad para cada una de ellas entre cero y uno y luego multiplicaremos el resultado de una por el resultado de otra que es la forma de valorar que ambas son buenas siguiendo el cuadro de operadores expuesto en el punto [7.3.1](#)

La decisión de utilizar dos curvas para valorar la bondad de una simulación nos permite crear una matriz de 19 columnas, 18 para las entradas a la simulación y uno para juzgar el resultado combinado de huella ecológica en índice de desarrollo humano. Esta columna la podemos utilizar de filtro para seleccionar sólo aquellas que den un índice alto y así analizar en qué rangos se deben mover las variables de entrada para producir simulaciones que den resultados como estos:

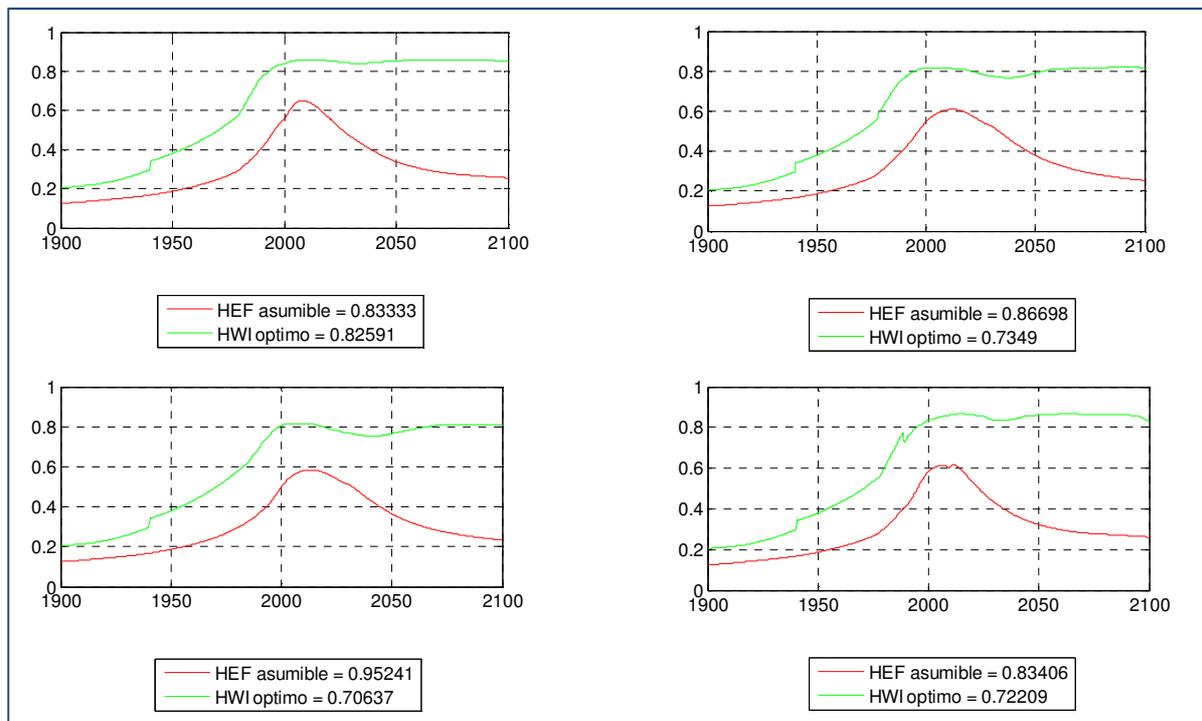


Figura 8.7.- Distintos ejemplos de evaluación del nivel de bondad de una simulación partiendo de las curvas de Huella Ecológica e Índice de Desarrollo Humano.

En estas gráficas, la huella ecológica está dividida por cuatro para poder entrar en la misma gráfica que el IDH, que oscila de 0 a 1. En estas curvas vemos que a partir del año 2000 el IDH se mantiene estable en valores superiores a 0,8 y la huella ecológica no sube mucho más allá de 2,4 veces la permitida consiguiendo a partir del 2050 entrar en los límites sostenibles, o sea bajar de 1 (0,25 en la gráfica). Estas técnicas de filtrado nos permiten un acercamiento al World3 en sentido contrario al de los escenarios de



Meadows. Con la técnica de filtrado, primero vemos que simulaciones dan mundos sostenibles y felices y luego analizamos qué tuvimos que hacer para conseguirlo.

¿Qué nubes de puntos nos dieron resultados óptimos? ¿Se podrían agrupar esos puntos de alguna forma? ¿Se les puede localizar un centro a cada grupo? ¿En qué medida están bien agrupados en torno a un centro? ¿Se puede hacer un histograma con los resultados más frecuentes? ¿A partir de qué años ya no hay soluciones atractivas? ¿En torno a qué valores de recursos iniciales no renovables se dieron esta soluciones que garantizaron la sostenibilidad y la satisfacción de las necesidades materiales de las personas?

A los experimentos combinados de Fuzzy-logic con clústers les hemos llamado fuzzy-clustering. Se han presentado experimentos de fuzzy-clustering atendiendo a dos entradas y una salida con objeto de poder hacer una representación tridimensional de los resultados y a 18 entradas y una salida, que ya no se pueden representar gráficamente pero que nos permiten saber rango de políticas se pueden tomar para conseguir un mundo justo y equilibrado.

En cada experimento realizado se ha explicado el código utilizado para que el usuario pueda modificarlo a voluntad y sacarle todo el jugo a este gran modelo mundial aún hoy vigente.



8.2 CONCLUSIONES FINALES

El World3 es un modelo suficientemente conocido aunque complejo. Su vigencia ha sido reafirmada recientemente en un estudio comparativo hecho por Graham Turner de la Universidad de Camberra. (Turner, A comparison of the limits to growth with thirty years of reality, 2008) (Turner, Updated Comparison of The Limits to Growth with Historical Data, 2012) Las enseñanzas que se pueden extraer de este modelo han dado lugar a infinidad de papers, uno de ellos publicado por la Universidad de Valladolid en el año 2008 en un congreso sobre dinámica de sistemas en Atenas (Mediavilla, Retortillo, de Miguel, & de Castro, 2008).

Durante la redacción de este Proyecto Fin de Carrera seis años después de tener ya montado el simuworld3, el autor se ha puesto en contacto con Dennis Meadows y con Graham Turner para indagar cuáles serían a su juicio las modificaciones que sobre el World3 se podrían hacer para actualizarlo.

En palabras de Dennis Meadows en un mail que me respondió:

“Los eventos reales han confirmado las respuestas que propusimos hace 40 años. Ahora las preguntas importantes sobre dinámicas de largo plazo y globales son muy diferentes. ¿Cuánto tiempo puede la humanidad sostenerse en exceso antes de que haya agotado los recursos no renovables para llegar a un colapso generalizado? ¿Cómo podemos llegar a conseguir nuestras demandas físicas de los recursos mundiales de vuelta bajo los niveles sostenibles de forma proactiva, en lugar de tener que aceptar lo que la tierra nos impone? ¿Qué clase de futuro nos espera - pacífico o violento, justo o injusto, en equilibrio con la naturaleza o dependientes de tecnologías extremas?”

Los modelos de computadora pueden ser útiles en el examen de estas cuestiones. Sin embargo, los modelos serían enormemente diferentes del World3. Por ejemplo, un simple cambio de unos pocos números o añadir acciones GHG en la atmósfera y de las reservas de combustibles fósiles para el modelo no da previsiones útiles sobre el cambio climático.”

Si bien parece que el uso de modelos computerizados si sigue resultando útil, nosotros en este trabajo, lo que proponemos es que se añadan a los paquetes estándar de dinámica de sistemas las herramientas de inteligencia artificial que hemos incorporado al análisis, ya que nos permiten:

- Conocer mejor los modelos, sobre todo los más complejos.
- Lanzar varias simulaciones nos permite ver los rangos de salida de las variables objeto de estudio. Esto es de especial utilidad cuando nos puedan aparecer curvas que se escapen de ciertos márgenes.
- Conocer la incidencia que unas variables tienen en otras al poder hacer análisis de correlaciones.
- Uso de lenguaje verbal para analizar resultados.
- Técnicas de filtrado que nos localicen los resultados esperados después de lanzar cientos de simulaciones.
- Agrupar y filtrar los resultados, buscando centros y relaciones de membresía.



8.3 LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO

Desde su publicación en 1972, el trabajo de los Meadows-Ranger ha sido objeto de innumerables estudios y se han publicado gran cantidad de papers y ponencias en congresos científicos. Una búsqueda en google con “los límites del crecimiento” arroja 1990000 resultados, y una búsqueda en inglés “the limits to growth” 2750000 resultados.

Voy a citar aquí algunos de esos papers y ponencias a los que he tenido acceso y que todavía no he citado en este trabajo.

Sobre análisis de sensibilidad de los parámetros del World 3 he tenido acceso a un extracto del libro “Structural parameters sensitivity of the limits to growth world model”. (de Jongh, 1978). Una de las conclusiones de este trabajo es en palabras del autor

“Ahora está claro que las predicciones cualitativas de “Los límites del crecimiento” se pueden alterar por medio de muy pequeños cambios en la estructura de la subyacente modelo matemático”.

También sus subsistemas por separado han sido objeto de estudio. Echemos un vistazo a los estudios de Thissen que hemos tenido en cuenta, el de alimentos y contaminación agrupados y el de población (Thissen & de Mol, The Agricultural and Persistent Pollution Subsystems in World3, 1978), (Thissen, Population in the Club of Rome's World3 Model, 1978)

Sobre el subsistema producción de alimentos y contaminación este es el abstract:

Los sectores agrícola y de contaminación persistente de modelo del Club de Roma World3 son analizados para obtener una mejor comprensión de su funcionamiento interno, y para mostrar cómo esa comprensión puede ser adquirida paso a paso, utilizando métodos sencillos de sistemas e ingeniería de control. Sólo algunas de las ecuaciones del sector agrícola afectan esencialmente el comportamiento estándar de gestión. La producción de alimentos está determinada principalmente por la producción industrial (exógeno para el sector) y la tierra cultivable, y es prácticamente independiente de la población y la contaminación. A excepción del subsector de las tierras de cultivo, el sector agrícola se encuentra para actuar de manera más o menos algebraica. Sólo si la contaminación se eleva muy por encima de sus valores estándar, el comportamiento del sector puede ser muy diferente. El sector de la contaminación persistente resulta ser bastante inactivo en condiciones normales de gestión, pero, debido a un supuesto particular, en su absorción, la contaminación de repente puede subir a niveles altos en diferentes condiciones y por lo tanto tienen un impacto importante en la producción de alimentos y la población.

Después del estudio subsistema a subsistema Thissen publica una visión global, también en 1978 (Thissen, Investigations into the world3 model: Overall Model Behavior and Policy Conclusions, 1978)

El abstract de este paper viene a decir:

A partir de los resultados obtenidos por el estudio de cada uno de sus subsistemas, el comportamiento del modelo general World3 se estudió para las condiciones estándar y no estándar. El subsistema de producción industrial y de recursos parece jugar un papel importante, impresionando a su comportamiento de crecimiento seguida por el declive en



el resto de subsistemas. Esta conclusión se confirma por los resultados de linealización total. Análisis del equilibrio revela que, debido principalmente a los efectos negativos de la contaminación en la producción de alimentos, los "límites" máximos sostenibles de la población y la producción de alimentos en World3 son mucho más bajos que se puede esperar de los supuestos de Meadows en los máximos de las variables del modelo individual. Utilizando los conocimientos adquiridos de esta forma, se demuestra que el comportamiento del modelo de manera significativa puede ser estabilizado mediante una política que es mucho más simple y menos alcance que las recomendaciones propuestas por el equipo de Meadows.

Por resumir este último abstract y llevarlo a nuestro terreno, Thissen tuvo que linealizar el modelo, subsistema a subsistema, tarea realmente compleja para alguien que no tenga conocimientos avanzados en la materia. Nosotros hemos llegado a las mismas conclusiones de forma mucho más simple y gráfica, ya que hemos utilizado las herramientas de Simulink.

¿Y qué podemos hacer a partir de ahora?

Las bases de datos necesarias para construir modelos mundiales son hoy en día más accesibles y completas que nunca. Prácticamente todos los datos que se analizan en el World3 están accesibles al gran público. Entre el Banco Mundial, el PNUD, la Agencia Internacional de la Energía o las hojas de cálculo de BP sobre recursos energéticos se dispone de todos los datos necesarios para reconstruir y ampliar el World3. Nosotros aportamos un modelo hecho en Simulink que aporta toda la potencia y facilidad de programación de esta plataforma, permitiendo además usar otras herramientas de Inteligencia Artificial para comprobar la solidez del trabajo realizado. **Proponemos además que los otros fabricantes de software para dinámica de sistemas incorporen esta herramienta de Inteligencia Artificial que nosotros hemos utilizado.**

El modelo simuworld3.mdl que hemos programado nosotros está protegido con una licencia creative-common y se puede conseguir en la siguiente URL junto con los códigos de los ficheros m-files utilizados para los experimentos descritos en esta obra. También se encuentra este proyecto escrito y ampliado, un fichero de instrucciones para manejar el modelo y los m-files. Así mismo se publicarán en esta dirección las ampliaciones al modelo que pongamos en marcha

La URL es: <http://www.pedrolo.net>.

Espero que todas las personas preocupadas por los límites que nos impone el planeta y que no quieran renunciar a los avances en bienestar social y económico conseguidos hasta ahora disfruten con este trabajo.



ANÁLISIS AUTOMÁTICO DE MODELOS COMPLEJOS
UTILIZANDO HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA
ARTIFICIAL PARTIENDO DEL EJEMPLO DEL WORLD3





9. ANEXO1. LISTADO DE CÓDIGOS



ANÁLISIS AUTOMÁTICO DE MODELOS COMPLEJOS
UTILIZANDO HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA
ARTIFICIAL PARTIENDO DEL EJEMPLO DEL WORLD3





9.1 *CÓDIGO1. Trazado simple de varias simulaciones sobre el subsistema industrial*

Clear

```
% Aquí le decimos con qué valor empiezan t_policy_year y x54_2;
t_policy_year_init=[1998];
x54_2_init=[14];
%Empezamos 100 simulaciones con la estructura for
num_sim=1;
for k1=1:100,
%Generamos un número aleatorio para luego operararlo con t_policy_year o con x54_2
rand('state',sum(100*clock))
x54_2=x54_2_init*(1+rand);
t_policy_year=t_policy_year_init+20*rand;
%Corremos la simulación con los parámetros de entrada modificados
sim('ind_ent_var')
%Graficamos los resultados
plot(time,out_x49,'k');
%Ponemos etiquetas a la gráfica
title('Evolucion de GDP per capita')
xlabel('Tiempo'),ylabel('GDP PER CAPITA')
hold on
grid on
end
```



9.2 *CÓDIGO2. Simulación de un subsistema con una gráfica 3D*

```
clear
t_policy_year_init=[1998];
x54_2_init=[14];
num_sim=1;
for k1=1:100
rand('state', sum(100*clock))
x54_2=x54_2_init*(1+rand);
t_policy_year=t_policy_year_init+20*rand;
%Corremos la simulación con los parámetros de entrada modificados
sim('ind_ent_var')
%Calculamos los porcentajes de variación en los parámetros de entrada
var_x54_2=(x54_2-x54_2_init)/x54_2_init
var_t_policy_year=(t_policy_year- t_policy_year_init)/t_policy_year_init
value_x49=max(out_x49)
% Creamos el plot3d
plot3(var_x54_2, var_t_policy_year, value_x49,'o');
box on;
% Establecemos el ángulo de la vista
view(26, 42);
axis([0 1 0 0.01 0 2500]);
%Ponemos etiquetas a la gráfica
xlabel('var x54 2');
ylabel('var t policy year');
zlabel('value max x49');
title(' % año cambio de política y % de amortización del capital industrial VS máx p
ind per cap');
hold on
grid on
end
```



9.3 *CÓDIGO3. Correlaciones en un subsistema*

```
clear
t_policy_year_init=[1998];
t_ind_equil_time_init=[1998];
t_fcaor_time_init=[1998];
x54_2_init=[14];
x59_init=[350];
NRCM_init=[-0.05];
nr_resources=[2e12];
x29=nr_resources;
num_sim=1;

for k=1:500
rand('state',sum(100*clock))
x54_2=x54_2_init*(1+rand);
t_policy_year=t_policy_year_init+20*rand;
x59=x59_init*(1+rand);
t_ind_equil_time=t_ind_equil_time_init+20*rand;
NRCM=NRCM_init+0.05*rand;
t_fcaor_time=t_fcaor_time_init+20*rand;

in_x54(k)=x54_2;
in_tpy(k)=t_policy_year;
in_x59(k)=x59;
in_tiet(k)=t_ind_equil_time;
in_tfct(k)=t_fcaor_time;
in_NRCM(k)=NRCM;

sim('ind_ener_var')
x49_store(:,k)=out_x49;

end
for tt=1:length(out_x49)
correlation_1=corrcoef(x49_store(tt,:), in_x54);
correlation_2=corrcoef(x49_store(tt,:), in_tpy);
correlation_3=corrcoef(x49_store(tt,:), in_x59);
correlation_4=corrcoef(x49_store(tt,:), in_tiet);
correlation_5=corrcoef(x49_store(tt,:), in_NRCM);
correlation_6=corrcoef(x49_store(tt,:), in_tfct);

val_corr1(1)=0;
val_corr2(1)=0;
val_corr3(1)=0;
val_corr4(1)=0;
val_corr5(1)=0;
val_corr6(1)=0;
if tt>1
val_corr1(tt)=correlation_1(1,2);
val_corr2(tt)=correlation_2(1,2);
```



```
val_corr3(tt)=correlation_3(1,2);
val_corr4(tt)=correlation_4(1,2);
val_corr5(tt)=correlation_5(1,2);
val_corr6(tt)=correlation_6(1,2);

end
end
plot(time, val_corr1, 'g', time, val_corr2, 'k--', time,
val_corr3, 'r', time, val_corr4, 'b--', time, val_corr5, 'm', time,
val_corr6, 'y--' );
hold on
grid on

title('Corrcoef: Verde->x54, Negro->t pol gen, Rojo->Limit consumo,
Azul-> t equil , Magenta->NRCM, Amarillo->tfct');
% Add title and axis labels
xlabel('Time');
ylabel('Correlations');
```



9.4 *CÓDIGO4. Trazado de un escenario*

```
clear
%Ponemos todos los tiempos en 4000 para la simulacion del
escenario1 y los
%vamos cambiando según el escenario que queramos recrear
t_policy_year=[4000];
t_air_poll_time=[4000];
t_land_fert_time=[4000];
t_fcaor_time=[4000];
t_zero_pop_grow_time=[4000];
t_ind_equil_time=[4000];
t_fert_eff_time=[4000];
%inicialmente los retrasos son de 20 años
in_TDD=[20];
%Parámetros que cambiamos en las políticas
nr_resources=[1e12];
p_avg_life_agr_inp=[2];
chg_mlt_POLGM=[0];
chg_mlt_LYCM=[0];
chg_mlt_NRCM=[0];
des_fam_size=[2];
ind_out_pc_des=[400];
p_avg_life_ind_cap=[14];
p_avg_life_serv_cap=[20];
p_serv_cap_out_ratio=[2];
%x29 se usa para comparar los recursos restantes con los recursos
iniciales
x29=nr_resources;
sim('simuworld3');
figure
plot(time, population_1/1.2e10, 'k', time, food/6e12, 'g', time,
industrial_output/4e12, 'b', time, ppoll_index/40, 'r', time,
nr_resources/2e12, 'y');
AXIS([1900 2100 0 1])
TITLE('State of world')
%--
figure
plot(time, food_pc/1000, 'g', time, cons_ind_out_pc/250, 'b', time,
serv_out_pc/1000, 'm', time, life_expectancy/90, 'y');
AXIS([1900 2100 0 1])
TITLE('Material Standard')
grid on
%--
figure
plot(time, HEF/4, 'r', time, HWI/1, 'g');
AXIS([1900 2100 0 1])
TITLE('Welfare, Footprint')
grid on
%--
figure
```



```
plot(time, nr_res_use_rate/2.4e10, 'r', time,
ppoll_gen_rt/1.2e9, 'b', time, land_fert_degr/100, 'm', time,
land_erosion_rt/4e7, 'g', time, land_rem_urb_ind_use/4e7, 'y');
AXIS([1900 2100 0 1])
TITLE('Withdrawals from environment')
grid on
%--
figure
plot(time, s_land_yield_fact/4, 'g', time,
s_nr_res_use_fact/1, 'm', time, s_ppoll_gen_fact/1, 'r', time,
s_ind_cap_out_ratio/6, 'b');
AXIS([1900 2100 0 1])
TITLE('Technology')
grid on
%--
figure
plot(time, res_intens/0.01, 'm', time, poll_intens_ind/2e-4, 'r', time,
land_yield/6000, 'g', time, fert_cont_eff/1, 'y', time,
s_ind_cap_out_ratio/6, 'b');
AXIS([1900 2100 0 1])
TITLE('Effects of Technology')
grid on
%--
figure
plot(time, land_fertility/600, 'm', time,
agr_inp_per_hect/200, 'r', time, land_yield/4000, 'g', time,
s_yield_mlt_air_poll/1, 'y', time, lifet_mlt_food/2, 'b');
AXIS([1900 2100 0 1])
TITLE('Agriculture')
grid on
%--
figure
plot(time, fioa_ind/0.44, 'b', time, s_fioa_agr/0.44, 'g', time,
s_fioa_cons/0.44, 'm', time, s_fioa_serv/0.44, 'k', time,
s_fr_cap_al_obt_res/1, 'y');
AXIS([1900 2100 0 1])
TITLE('Allocation of output')
grid on
%-----
d=[time, HEF, HWI]
xlswrite('simuworld3.xls', d, 'Datos', 'A1')
```



9.5 *CÓDIGO5. Varias simulaciones*

Código para lanzar varias simulaciones a la vez. Nos genera todos los escenarios a la vez y nos implementa también políticas no desarrolladas en ninguno de los escenarios

```
clear
clf
%Ponemos todos los tiempos en 1975 y generamos 50 n°s
aleatorios entre 1975
%y 2025
t_policy_year_init=[1975];
t_air_poll_time_init=[1975];
t_land_fert_time_init=[1975];
t_fcaor_time_init=[1975];
t_zero_pop_grow_time_init=[1975];
t_ind_equil_time_init=[1975];
t_fert_eff_time_init=[1975];
%inicialmente los retrasos son de 5 años y los ampliamos
hasta 20
in_TDD_init=[5];
%Parámetros que cambiamos en las políticas, empezamos por el
rango más bajo
nr_resources_init=[1e12];
p_avg_life_agr_inp_init=[1];
chg_mlt_POLGM_init=[-0.06];
chg_mlt_LYCM_init=[0];
chg_mlt_NRCM_init=[-0.06];
des_fam_size_init=[1];
ind_out_pc_des_init=[350];
p_avg_life_ind_cap_init=[12];
p_avg_life_serv_cap_init=[18];
p_serv_cap_out_ratio_init=[0.5];

kk=1;
for kk=1:25
rand('state',sum(100*clock))
%Modificamos los años de las políticas
t_policy_year=t_policy_year_init+50*rand
    t_air_poll_time=t_air_poll_time_init+50*rand
    t_land_fert_time=t_land_fert_time_init+50*rand
    t_fcaor_time=t_fcaor_time_init+50*rand
    t_zero_pop_grow_time=t_zero_pop_grow_time_init+50*rand
    t_ind_equil_time=t_ind_equil_time_init+50*rand
    t_fert_eff_time=t_fert_eff_time_init+50*rand
    in_TDD=in_TDD_init+15*rand
%Modificamos ahora los parámetros de las políticas
%nr_resources va desde 1e12 a 2e12
nr_resources=nr_resources_init*(1+rand)
%p_avg_life_agr_in va desde 1 a 3
    p_avg_life_agr_inp=p_avg_life_agr_inp_init*(1+2*rand)
%chg_mlt_POLGM de -0.06 a 0
```



```
chg_mlt_POLGM=chg_mlt_POLGM_init+0.06*rand
%chg_mlt_LYCM de 0 a 0.04
    chg_mlt_LYCM=chg_mlt_LYCM_init+0.04*rand
%chg_mlt_NRCM de -0.06 a 0
chg_mlt_NRCM=chg_mlt_NRCM_init+0.06*rand
%des_fam_size de 1 a 3
    des_fam_size=des_fam_size_init*(1+2*rand)
%ind_out_pc_des de 350 a 700
    ind_out_pc_des=ind_out_pc_des_init+350*rand
%p_avg_life_ind_cap de 12 a 16
    p_avg_life_ind_cap=p_avg_life_ind_cap_init+4*rand
%p_avg_life_ind_cap de 18 a 22
    p_avg_life_serv_cap=p_avg_life_serv_cap_init+4*rand
%p_avg_life_serv_cap de 0.5 a 1.5
    p_serv_cap_out_ratio=p_serv_cap_out_ratio_init+rand
%x29 se usa para comparar los recursos restantes con los
recursos
%iniciales
x29=nr_resources
%Y ahora lanzamos la simulación
sim('simuworld3');

subplot(2,1,1),plot(time, population_1/1.2e10,'k',time,
food/6e12,'g', time, industrial_output/4e12,'b',time,
ppoll_index/40,'r',time, nr_resources/2e12,'y');
AXIS([1900 2100 0 1])
TITLE('State of world')
legend('population 1/1.2e10','food/6e12','industrial
output/4e12', 'ppoll index/40', 'nr
resources/2e12', 'Location', 'NorthEastOutside');
hold on
grid on
%--

subplot(2,1,2),plot(time, food_pc/1000,'g',time,
cons_ind_out_pc/250,'b', time, serv_out_pc/1000,'m',time,
life_expectancy/90,'y');
AXIS([1900 2100 0 1])
TITLE('Material Standard')
legend('food pc/1000','cons ind out pc/6e12','serv out
pc/1000', 'life expectancy/90', 'Location', 'NorthEastOutside');
hold on
grid on
%--

subplot(2,1,1),plot(time, HEF/4,'r',time, HWI/1,'g');
AXIS([1900 2100 0 1])
legend('time vs Human Ecological Footprint/4','time vs Human
Welfare Index', 'Location', 'NorthEastOutside')
TITLE('Welfare, Footprint')
hold on
grid on
%--
```



```
subplot(2,1,2),plot(time, nr_res_use_rate/2.4e10,'r',time,  
ppoll_gen_rt/1.2e9,'b',time, land_fert_degr/100,'m',time,  
land_erosion_rt/4e7,'g',time, land_rem_urb_ind_use/4e7,'y');  
AXIS([1900 2100 0 1])  
legend('time vs nr res use rate/2.4e10','time vs ppoll gen  
rt/1.2e9','time vs land fert degr/100','time vs land erosion  
rt/4e7','time vs land rem urb ind  
use/4e7','Location','NorthEastOutside')  
TITLE('Withdrawals from environment')  
hold on  
grid on  
%--
```

```
subplot(2,1,1),plot(time, s_land_yield_fact/4,'g',time,  
s_nr_res_use_fact/1,'m',time, s_ppoll_gen_fact/1,'r',time,  
s_ind_cap_out_ratio/6,'b');  
AXIS([1900 2100 0 1])  
legend('time vs s land yield fact/4','time vs s nr res use  
fact','time vs s ppoll gen fact','time vs land erosion  
rt/4e7','time vs s ind cap out  
ratio/6','Location','NorthEastOutside')  
TITLE('Technology')  
hold on  
grid on  
%--
```

```
subplot(2,1,2),plot(time, res_intens/0.01,'m',time,  
poll_intens_ind/2e-4,'r',time, land_yield/6000,'g',time,  
fert_cont_eff/1,'y',time, s_ind_cap_out_ratio/6,'b');  
AXIS([1900 2100 0 1])  
legend('time vs s res intens/0.01','time vs s poll intens  
ind/2e-4','time vs land yield/6000','time vs fert cont  
eff/1','time vs s ind cap out  
ratio/6','Location','NorthEastOutside')  
TITLE('Effects of Technology')  
hold on  
grid on  
%--
```

```
subplot(2,1,1),plot(time, land_fertility/600,'m',time,  
agr_inp_per_hect/200,'r',time, land_yield/4000,'g',time,  
s_yield_mlt_air_poll/1,'y',time, lifet_mlt_food/2,'b');  
AXIS([1900 2100 0 1])  
legend('time vs land fertility/600','time vs agr inp per  
hect/200','time vs land yield/6000','time vs land  
yield/4000','time vs s yield mlt air poll/1','time vs lifet mlt  
food/2','Location','NorthEastOutside')  
TITLE('Agriculture')  
hold on  
grid on  
%--
```

```
subplot(2,1,2),plot(time, fioa_ind/0.44,'b',time,  
s_fioa_agr/0.44,'g',time, s_fioa_cons/0.44,'m',time,  
s_fioa_serv/0.44,'k',time, s_fr_cap_al_obt_res/1,'y');
```



```
AXIS([1900 2100 0 1])
legend('time vs fioa ind/0.44','time vs s fioa
agr/0.44','time vs s fioa cons/0.44','time vs s fioa
serv/0.44','time vs s fr cap al obt
res/1','Location','NorthEastOutside')
TITLE('Allocation of output')
hold on
grid on
end
```



9.6 *CÓDIGO6. Estudio de correlaciones*

```
clear
clf

%Ponemos todos los tiempos en 1975 y generamos 50 n°s aleatorios
entre 1975
    %y 2025
    t_policy_year_init=[1975];
    t_air_poll_time_init=[1975];

t_land_fert_time_init=[1975];

    t_fcaor_time_init=[1975];
    t_zero_pop_grow_time_init=[1975];
    t_ind_equil_time_init=[1975];
    t_fert_eff_time_init=[1975];
    %inicialmente los retrasos son de 5 años y los ampliamos
hasta 20
    in_TDD_init=[5];
    %Parámetros que cambiamos en las políticas, empezamos por el
rango más bajo
    nr_resources_init=[1e12];
    p_avg_life_agr_inp_init=[1];
    chg_mlt_POLGM_init=[-0.06];
    chg_mlt_LYCM_init=[0];
    chg_mlt_NRCM_init=[-0.06];
    des_fam_size_init=[1];
    ind_out_pc_des_init=[350];
    p_avg_life_ind_cap_init=[12];
    p_avg_life_serv_cap_init=[18];
    p_serv_cap_out_ratio_init=[0.5];

for k=1:100
    rand('state',sum(100*clock))
    %Modificamos los años de las políticas
    t_policy_year=t_policy_year_init+50*rand;
        t_air_poll_time=t_air_poll_time_init+50*rand;
        t_land_fert_time=t_land_fert_time_init+50*rand;
        t_fcaor_time=t_fcaor_time_init+50*rand;
        t_zero_pop_grow_time=t_zero_pop_grow_time_init+50*rand;
        t_ind_equil_time=t_ind_equil_time_init+50*rand;

        t_fert_eff_time=t_fert_eff_time_init+50*rand;
        in_TDD=in_TDD_init+15*rand;
    %Modificamos ahora los parámetros de las políticas
    %nr_resources va desde 1e12 a 2e12
    nr_resources=nr_resources_init*(1+rand);

    %p_avg_life_agr_in va desde 1 a 3
        p_avg_life_agr_inp=p_avg_life_agr_inp_init*(1+2*rand);
    %chg_mlt_POLGM de -0.06 a 0
    chg_mlt_POLGM=chg_mlt_POLGM_init+0.06*rand;
    %chg_mlt_LYCM de 0 a 0.04
    chg_mlt_LYCM=chg_mlt_LYCM_init+0.04*rand;
```



```
%chg_mlt_NRCM de -0.06 a 0
chg_mlt_NRCM=chg_mlt_NRCM_init+0.06*rand;
%des_fam_size de 1 a 3
    des_fam_size=des_fam_size_init*(1+2*rand);
%ind_out_pc_des de 350 a 700
    ind_out_pc_des=ind_out_pc_des_init+350*rand;
%p_avg_life_ind_cap de 12 a 16
    p_avg_life_ind_cap=p_avg_life_ind_cap_init+4*rand;
%p_avg_life_ind_cap de 18 a 22
    p_avg_life_serv_cap=p_avg_life_serv_cap_init+4*rand;
%p_avg_life_serv_cap de 0.5 a 1.5
    p_serv_cap_out_ratio=p_serv_cap_out_ratio_init+rand;
%x29 se usa para comparar los recursos restantes con
losrecursos
%iniciales
x29=nr_resources;
%Y ahora lanzamos la simulación

%Guardamos los tiempos en vectores
in_tpy(k)=t_policy_year;
in_tiet(k)=t_ind_equil_time;
    in_tfct(k)=t_fcaor_time;
    in_tapt(k)=t_air_poll_time;
    in_tlft(k)=t_land_fert_time;
    in_tzpgt(k)=t_zero_pop_grow_time;
    in_tfet(k)=t_fert_eff_time;
    in_in_TDD(k)=in_TDD;
%Guardamos las otras variables en vectores

in_nr(k)=nr_resources;
    in_palai(k)=p_avg_life_agr_inp;
    in_POLGM(k)=chg_mlt_POLGM;
    in_NRCM(k)=chg_mlt_NRCM;
    in_LYCM(k)=chg_mlt_LYCM;
    in_dfs(k)=des_fam_size;
    in_iopd(k)=ind_out_pc_des;
    in_palic(k)=p_avg_life_ind_cap;
    in_palsc(k)=p_avg_life_serv_cap;
    in_pscor(k)=p_serv_cap_out_ratio;

sim('simuworld3');
    HEF_store(:,k)=HEF;
end
for tt=1:length(HEF)
    correlation_01=corrcoef(HEF_store(tt,:), in_tpy);
    correlation_02=corrcoef(HEF_store(tt,:), in_tiet);
    correlation_03=corrcoef(HEF_store(tt,:), in_tfct);
    correlation_04=corrcoef(HEF_store(tt,:), in_tapt);
    correlation_05=corrcoef(HEF_store(tt,:), in_tlft);
    correlation_06=corrcoef(HEF_store(tt,:), in_tzpgt);
    correlation_07=corrcoef(HEF_store(tt,:), in_tfet);
    correlation_08=corrcoef(HEF_store(tt,:), in_in_TDD);
    %--
    correlation_09=corrcoef(HEF_store(tt,:), in_nr);
    correlation_10=corrcoef(HEF_store(tt,:), in_palai);
    correlation_11=corrcoef(HEF_store(tt,:), in_POLGM);
```



```
correlation_12=corrcoef(HEF_store(tt,:), in_NRCM);
correlation_13=corrcoef(HEF_store(tt,:), in_LYCM);
correlation_14=corrcoef(HEF_store(tt,:), in_dfs);
correlation_15=corrcoef(HEF_store(tt,:), in_iopd);
correlation_16=corrcoef(HEF_store(tt,:), in_palic);
correlation_17=corrcoef(HEF_store(tt,:), in_palsc);
correlation_18=corrcoef(HEF_store(tt,:), in_pscor);
%--
val_corr01(1)=0;
val_corr02(1)=0;
val_corr03(1)=0;
val_corr04(1)=0;
val_corr05(1)=0;
val_corr06(1)=0;
val_corr07(1)=0;
val_corr08(1)=0;
val_corr09(1)=0;
val_corr10(1)=0;
val_corr11(1)=0;
val_corr12(1)=0;
val_corr13(1)=0;
val_corr14(1)=0;
val_corr15(1)=0;
val_corr16(1)=0;
val_corr17(1)=0;
val_corr18(1)=0;
if tt>1
    val_corr01(tt)=correlation_01(1,2);
    val_corr02(tt)=correlation_02(1,2);
    val_corr03(tt)=correlation_03(1,2);
    val_corr04(tt)=correlation_04(1,2);
    val_corr05(tt)=correlation_05(1,2);
    val_corr06(tt)=correlation_06(1,2);
    val_corr07(tt)=correlation_07(1,2);
    val_corr08(tt)=correlation_08(1,2);
    val_corr09(tt)=correlation_09(1,2);
    val_corr10(tt)=correlation_10(1,2);
    val_corr11(tt)=correlation_11(1,2);
    val_corr12(tt)=correlation_12(1,2);
    val_corr13(tt)=correlation_13(1,2);
    val_corr14(tt)=correlation_14(1,2);
    val_corr15(tt)=correlation_15(1,2);
    val_corr16(tt)=correlation_16(1,2);
    val_corr17(tt)=correlation_17(1,2);
    val_corr18(tt)=correlation_18(1,2);
end
end
figure
plot(time, val_corr01,'g',time, val_corr02,'k', time,
val_corr03,'r',time, val_corr04,'b',time, val_corr05,'m',time,
val_corr06,'y',...
time, val_corr07,'c')
legend('t policy year','t ind equil time','t fcaor time','t
air polltime','t land fert time','t zero pop grow time','t fert
eff time',...
'in TDD','Location','NorthEastOutside');
```



```
title('Coeficientes de correlación entre Tiempo aplicación de
políticas y Huella ecológica');
xlabel('Time');
ylabel('Correlations');
hold on
grid on
%--
figure
plot(time, val_corr09, 'g', time, val_corr10, 'k', time,
val_corr11, 'r', time, val_corr12, 'b', time,
val_corr13, 'm', time, val_corr14, 'y', ...
time, val_corr15, 'c', time, val_corr16, 'g--', time,
val_corr17, 'k--', time, val_corr18, 'r--')
legend('nr resources', 'p avg life agr inp', 'chg mlt
POLGM', 'chg mlt NRCM', 'chg mlt LYCM', 'des fam size', 'ind out pc
des', ...
'p avg life ind cap', 'p avg life serv cap', 'p serv cap out
ratio', 'Location', 'NorthEastOutside');
title('Coeficientes de correlación entre Cambios en la
asignación de recursos y Huella ecológica');
xlabel('Time');
ylabel('Correlations');
hold on
grid on
```



9.7 CÓDIGO7. Comparando ploteados y parámetros

```
clear
clf
%Ponemos todos los tiempos en 1975 y generamos 50 n°s aleatorios
entre 1975
%y 2025
t_policy_year_init=[1975];
t_air_poll_time_init=[1975];
t_land_fert_time_init=[1975];
t_fcaor_time_init=[1975];
t_zero_pop_grow_time_init=[1975];
t_ind_equil_time_init=[2015];
t_fert_eff_time_init=[1975];
%inicialmente los retrasos son de 5 años y los ampliamos hasta 20
in_TDD_init=[5];
%Parámetros que cambiamos en las políticas, empezamos por el rango
más bajo
nr_resources_init=[1e12];
p_avg_life_agr_inp_init=[1];
chg_mlt_POLGM_init=[-0.06];
chg_mlt_LYCM_init=[0];
chg_mlt_NRCM_init=[-0.06];
des_fam_size_init=[1];
ind_out_pc_des_init=[350];
p_avg_life_ind_cap_init=[12];
p_avg_life_serv_cap_init=[18];
p_serv_cap_out_ratio_init=[0.5];
num_carr=25;
max_HEF_store = zeros(1,num_carr)
in_POLGM_store =zeros(1,num_carr)
for k=1:num_carr
rand('state',sum(100*clock))
%Modificamos los años de las políticas
t_policy_year=t_policy_year_init+50*rand;
    t_air_poll_time=t_air_poll_time_init+50*rand;
    t_land_fert_time=t_land_fert_time_init+50*rand;
    t_fcaor_time=t_fcaor_time_init+50*rand;
    t_zero_pop_grow_time=t_zero_pop_grow_time_init+50*rand;
    t_ind_equil_time=t_ind_equil_time_init;
    t_fert_eff_time=t_fert_eff_time_init+50*rand;
    in_TDD=in_TDD_init+15*rand;
%Modificamos ahora los parámetros de las políticas
%nr_resources va desde 1e12 a 2e12
nr_resources=nr_resources_init*(1+rand);
%p_avg_life_agr_in va desde 1 a 3
    p_avg_life_agr_inp=p_avg_life_agr_inp_init*(1+2*rand);
%chg_mlt_POLGM de -0.06 a 0
chg_mlt_POLGM=chg_mlt_POLGM_init+0.06*rand;
%chg_mlt_LYCM de 0 a 0.04
    chg_mlt_LYCM=chg_mlt_LYCM_init+0.04*rand;
%chg_mlt_NRCM de -0.06 a 0
chg_mlt_NRCM=chg_mlt_NRCM_init+0.06*rand;
```



```
%des_fam_size de 1 a 3
    des_fam_size=des_fam_size_init*(1+2*rand);
%ind_out_pc_des de 350 a 700
    ind_out_pc_des=ind_out_pc_des_init+350*rand;
%p_avg_life_ind_cap de 12 a 16
    p_avg_life_ind_cap=p_avg_life_ind_cap_init+4*rand;
%p_avg_life_ind_cap de 18 a 22
    p_avg_life_serv_cap=p_avg_life_serv_cap_init+4*rand;
%p_avg_life_serv_cap de 0.5 a 1.5
    p_serv_cap_out_ratio=p_serv_cap_out_ratio_init+rand;
%x29 se usa para comparar los recursos restantes con los recursos
%iniciales
x29=nr_resources;
%Y ahora lanzamos la simulación

sim('simuworld3');

    max_HEF=max(HEF);
    max_HEF_store(1,k)=max_HEF;
    in_ind_out_pc_des=ind_out_pc_des;
    in_ind_out_pc_des_store(1,k)= in_ind_out_pc_des;

plot(ind_out_pc_des, max_HEF, 'o');

% Set the viewing angle and the axis limits

axis([350 700 0 6]);

% Add title and axis labels
xlabel('ind out pc des');

ylabel('max HEF');
title('Limite del consumo deseado de producción industrial VS max
HEF con cambios en 1995');
hold on
grid on

end
rectaX=polyfit(in_ind_out_pc_des_store, max_HEF_store,1)
xpol=linspace(350,700,100);
ypol=polyval(rectaX,xpol);
plot(xpol,ypol);
```



9.8 *CÓDIGO8. Análisis Fuzzy sobre la curva de población*

```
clear
clf
%Ponemos todos los tiempos en 1975 y generamos 50 n°s aleatorios
entre 1975
%y 2025
t_policy_year_init=[1975];
t_air_poll_time_init=[1975];
t_land_fert_time_init=[1975];
t_fcaor_time_init=[1975];
t_zero_pop_grow_time_init=[1975];
t_ind_equil_time_init=[1975];
t_fert_eff_time_init=[1975];
%inicialmente los retrasos son de 5 años y los ampliamos hasta 20
in_TDD_init=[5];
%Parámetros que cambiamos en las políticas, empezamos por el rango
más bajo
nr_resources_init=[1e12];
p_avg_life_agr_inp_init=[1];
chg_mlt_POLGM_init=[-0.06];
chg_mlt_LYCM_init=[0];
chg_mlt_NRCM_init=[-0.06];
des_fam_size_init=[1];
ind_out_pc_des_init=[350];
p_avg_life_ind_cap_init=[12];
p_avg_life_serv_cap_init=[18];
p_serv_cap_out_ratio_init=[0.5];

for k=1:4
rand('state',sum(100*clock))
%Modificamos los años de las políticas
t_policy_year=t_policy_year_init+50*rand;
    t_air_poll_time=t_air_poll_time_init+50*rand;
    t_land_fert_time=t_land_fert_time_init+50*rand;
    t_fcaor_time=t_fcaor_time_init+50*rand;
    t_zero_pop_grow_time=t_zero_pop_grow_time_init+50*rand;
    t_ind_equil_time=t_ind_equil_time_init+50*rand;
    t_fert_eff_time=t_fert_eff_time_init+50*rand;
    in_TDD=in_TDD_init+15*rand;
%Modificamos ahora los parámetros de las políticas
%nr_resources va desde 1e12 a 2e12
nr_resources=nr_resources_init*(1+rand);
%p_avg_life_agr_in va desde 1 a 3
    p_avg_life_agr_inp=p_avg_life_agr_inp_init*(1+2*rand);
```



```
%chg_mlt_POLGM de -0.06 a 0
chg_mlt_POLGM=chg_mlt_POLGM_init+0.06*rand;
%chg_mlt_LYCM de 0 a 0.04
    chg_mlt_LYCM=chg_mlt_LYCM_init+0.04*rand;
%chg_mlt_NRCM de -0.06 a 0
chg_mlt_NRCM=chg_mlt_NRCM_init+0.06*rand;
%des_fam_size de 1 a 3
    des_fam_size=des_fam_size_init*(1+2*rand);
%ind_out_pc_des de 350 a 700
    ind_out_pc_des=ind_out_pc_des_init+350*rand;
%p_avg_life_ind_cap de 12 a 16
    p_avg_life_ind_cap=p_avg_life_ind_cap_init+4*rand;
%p_avg_life_ind_cap de 18 a 22
    p_avg_life_serv_cap=p_avg_life_serv_cap_init+4*rand;
%p_avg_life_serv_cap de 0.5 a 1.5
    p_serv_cap_out_ratio=p_serv_cap_out_ratio_init+rand;
%x29 se usa para comparar los recursos restantes con losrecursos
%iniciales
x29=nr_resources;
%Y ahora lanzamos la simulación

sim('simuworld3');
    max_pop=max(population_1)
    final_pop=population_1(length(population_1))
    fin_slo_pop=slope_population(length(slope_population))
k
    b=find(population_1==max_pop)
    max_timepop=time(b)
    final_pop_high=smf(final_pop,[3e9 9e9])
    final_pop_low=1-final_pop_high
    slope_pop_high=smf(fin_slo_pop,[-8e7 -1e7])
    slope_pop_low=1-slope_pop_high
    max_timepop_high=smf(max_timepop, [1900 2100])
    max_timepop_low=1-max_timepop_high
    catastrofe=probor([0.7*slope_pop_low;                                final_pop_low;
0.5*max_timepop_low])
    catas_store(k)=catastrofe
    subplot(2,2,k),plot(time, population_1)
    f=num2str(catas_store(k))
g=['Nivel de catástrofe = ',f]
legend(g, 'Location', 'SouthOutside')
hold on
grid on
end
```



9.9 *CÓDIGO9. Análisis Fuzzy sobre la curva de HEF y HWI. Selección de parámetros de entrada que generan salidas óptimas*

```
clear
clf
%Ponemos todos los tiempos en 1975 y generamos 50 n°s aleatorios
entre 1975
%y 2025
t_policy_year_init=[1975];
t_air_poll_time_init=[1975];
t_land_fert_time_init=[1975];
t_fcaor_time_init=[1975];
t_zero_pop_grow_time_init=[1975];
t_ind_equil_time_init=[1975];
t_fert_eff_time_init=[1975];
%inicialmente los retrasos son de 5 años y los ampliamos hasta 20
in_TDD_init=[5];
%Parámetros que cambiamos en las políticas, empezamos por el rango
más bajo
nr_resources_init=[1e12];
p_avg_life_agr_inp_init=[1];
chg_mlt_POLGM_init=[-0.06];
chg_mlt_LYCM_init=[0];
chg_mlt_NRCM_init=[-0.06];
des_fam_size_init=[1];
ind_out_pc_des_init=[350];
p_avg_life_ind_cap_init=[12];
p_avg_life_serv_cap_init=[18];
p_serv_cap_out_ratio_init=[0.5];
kk=1;
num_carr=50;
in_tpy = zeros(1,num_carr);
in_tiet =zeros(1,num_carr);
in_tfct=zeros(1,num_carr);
in_tapt=zeros(1,num_carr);
in_tlft=zeros(1,num_carr);
in_tzpgt=zeros(1,num_carr);
in_tfet=zeros(1,num_carr);
in_in_TDD=zeros(1,num_carr);
%Guardamos las otras variables en vectores
in_nr=zeros(1,num_carr);
in_palai=zeros(1,num_carr);
in_POLGM=zeros(1,num_carr);
in_NRCM=zeros(1,num_carr);
in_LYCM=zeros(1,num_carr);
in_dfs=zeros(1,num_carr);
in_iopd=zeros(1,num_carr);
in_palic=zeros(1,num_carr);
in_palsc=zeros(1,num_carr);
in_pscor=zeros(1,num_carr);
```



```
for k=1:num_carr
rand('state',sum(100*clock))
%Modificamos los años de las políticas
t_policy_year=t_policy_year_init+50*rand;
    t_air_poll_time=t_air_poll_time_init+50*rand;
    t_land_fert_time=t_land_fert_time_init+50*rand;
    t_fcaor_time=t_fcaor_time_init+50*rand;
    t_zero_pop_grow_time=t_zero_pop_grow_time_init+50*rand;
    t_ind_equil_time=t_ind_equil_time_init+50*rand;
    t_fert_eff_time=t_fert_eff_time_init+50*rand;
    in_TDD=in_TDD_init+15*rand;
%Modificamos ahora los parámetros de las políticas
%nr_resources va desde 1e12 a 2e12
nr_resources=nr_resources_init*(1+rand);
%p_avg_life_agr_in va desde 1 a 3
    p_avg_life_agr_inp=p_avg_life_agr_inp_init*(1+2*rand);
%chg_mlt_POLGM de -0.06 a 0
chg_mlt_POLGM=chg_mlt_POLGM_init+0.06*rand;
%chg_mlt_LYCM de 0 a 0.04
    chg_mlt_LYCM=chg_mlt_LYCM_init+0.04*rand;
%chg_mlt_NRCM de -0.06 a 0
chg_mlt_NRCM=chg_mlt_NRCM_init+0.06*rand;
%des_fam_size de 1 a 3
    des_fam_size=des_fam_size_init*(1+2*rand);
%ind_out_pc_des de 350 a 700
ind_out_pc_des=ind_out_pc_des_init+350*rand;
%p_avg_life_ind_cap de 12 a 16
    p_avg_life_ind_cap=p_avg_life_ind_cap_init+4*rand;
%p_avg_life_ind_cap de 18 a 22
    p_avg_life_serv_cap=p_avg_life_serv_cap_init+4*rand;
%p_avg_life_serv_cap de 0.5 a 1.5
    p_serv_cap_out_ratio=p_serv_cap_out_ratio_init+rand;
%x29 se usa para comparar los recursos restantes con los recursos
%iniciales
x29=nr_resources;
%Y ahora lanzamos la simulación
%iniciamos vectores
%Guardamos los tiempos en vectores
in_tpy(k,1)=t_policy_year;
in_tiet(k,1)=t_ind_equil_time;
    in_tfct(k,1)=t_fcaor_time;
    in_tapt(k,1)=t_air_poll_time;
    in_tlft(k,1)=t_land_fert_time;
    in_tzpgt(k,1)=t_zero_pop_grow_time;
    in_tfet(k,1)=t_fert_eff_time;
    in_in_TDD(k,1)=in_TDD;
%Guardamos las otras variables en vectores

in_nr(k,1)=nr_resources;
    in_palai(k,1)=p_avg_life_agr_inp;
    in_POLGM(k,1)=chg_mlt_POLGM;
    in_NRCM(k,1)=chg_mlt_NRCM;
    in_LYCM(k,1)=chg_mlt_LYCM;
    in_dfs(k,1)=des_fam_size;
    in_iopd(k,1)=ind_out_pc_des;
```



```
in_palic(k,1)=p_avg_life_ind_cap;
in_palsc(k,1)=p_avg_life_serv_cap;
in_pscor(k,1)=p_serv_cap_out_ratio;

sim('simuworld3');

%Human Ecological Footprint
k
max_HEF=max(HEF)
final_HEF=HEF(length(HEF))
fin_slo_HEF=slope_HEF(length(slope_HEF))
bHEF=find(HEF==max_HEF)
max_timeHEF=time(bHEF)
max_HEF_high=smf(max_HEF,[1 4])
max_HEF_low=1-max_HEF_high
final_HEF_high=smf(final_HEF,[0.8 1.2])
final_HEF_low=1-final_HEF_high
slope_HEF_high=smf(fin_slo_HEF,[-1 1])
slope_HEF_low=1-slope_HEF_high
max_timeHEF_high=smf(max_timeHEF,[1900 2100])
max_timeHEF_low=1-max_timeHEF_high
HEF_asumible=probor([slope_HEF_low; max_HEF_low; final_HEF_low])
asum_HEFstore(k)=HEF_asumible

%Human Welfare Index
max_HWI=max(HWI)
final_HWI=HWI(length(HWI))
max_HWI_high=smf(max_HWI,[0.5 1])
final_HWI_high=smf(final_HWI,[0.5 1])
var_HWI=max_HWI-final_HWI
var_HWI_high=smf(var_HWI,[0 0.2])
%se busca que la diferencia entre el máximo y el final sea pequeño
%var_HWI_low estará próximo a 1 cuando la diferencia sea pequeña
var_HWI_low=1-var_HWI_high
HWI_optimo=var_HWI_low*final_HWI_high
optim_HWIstore(k)=HWI_optimo
%Y la calificación global de la simulación:
calif_global=HWI_optimo*HEF_asumible
calif_global_store(k,1)=calif_global;

if HEF_asumible>0.8
if HWI_optimo>0.7
if kk<5
subplot(2,2,kk),plot(time, HEF/4,'r', time, HWI,'g')
f_hef=num2str(asum_HEFstore(k))
g_hef=['HEF asumible = ',f_hef]
f_hwi=num2str(optim_HWIstore(k))
g_hwi=['HWI optimo = ',f_hwi]
legend(g_hef,g_hwi,'Location','SouthOutside')
AXIS([1900 2100 0 1])
hold on
grid on
kk=kk+1
end
```



```
end
end
end
    m_global=[in_tpy(:,1), in_tiet(:,1), in_tfct(:,1), in_tapt(:,1),
in_tlft(:,1), in_tzpgt(:,1), in_tfet(:,1), in_in_TDD(:,1),...
    in_nr(:,1), in_palai(:,1), in_POLGM(:,1), in_NRCM(:,1),
in_LYCM(:,1), in_dfs(:,1),...
    in_iopd(:,1), in_palic(:,1), in_palsc(:,1), in_pscor(:,1),
calif_global_store(:,1)]
    i=find(calif_global_store>0.6)
    m_selecc=m_global(i,:)
    xlswrite('matrizoptima.xls', m_selecc, 'Datos', 'A1')
```



9.10 CÓDIGO10. *Fuzzy clustering seleccionado 2 entradas y una salida*

```
clear
clf
%Ponemos todos los tiempos en 1975 y generamos 50 n°s aleatorios entre
1975
%y 2025
t_policy_year_init=[1975];
t_air_poll_time_init=[1975];
t_land_fert_time_init=[1975];
t_fcaor_time_init=[1975];
t_zero_pop_grow_time_init=[1975];
t_ind_equil_time_init=[1975];
t_fert_eff_time_init=[1975];
%inicialmente los retrasos son de 5 años y los ampliamos hasta 20
in_TDD_init=[5];
%Parámetros que cambiamos en las políticas, empezamos por el rango más
bajo
nr_resources_init=[1e12];
p_avg_life_agr_inp_init=[1];
chg_mlt_POLGM_init=[-0.06];
chg_mlt_LYCM_init=[0];
chg_mlt_NRCM_init=[-0.06];
des_fam_size_init=[1];
ind_out_pc_des_init=[350];
p_avg_life_ind_cap_init=[12];
p_avg_life_serv_cap_init=[18];
p_serv_cap_out_ratio_init=[0.5];
kk=1;
num_carr=200;
in_tpy = zeros(1,num_carr);
in_tiet =zeros(1,num_carr);
in_tfct=zeros(1,num_carr);
in_tapt=zeros(1,num_carr);
in_tlft=zeros(1,num_carr);
in_tzpgt=zeros(1,num_carr);
in_tfet=zeros(1,num_carr);
in_in_TDD=zeros(1,num_carr);
%Guardamos las otras variables en vectores
in_nr=zeros(1,num_carr);
in_palai=zeros(1,num_carr);
in_POLGM=zeros(1,num_carr);
in_NRCM=zeros(1,num_carr);
in_LYCM=zeros(1,num_carr);
in_dfs=zeros(1,num_carr);
in_iopd=zeros(1,num_carr);
in_palic=zeros(1,num_carr);
in_palsc=zeros(1,num_carr);
in_pscor=zeros(1,num_carr);

for k=1:num_carr
rand('state',sum(100*clock))
%Modificamos los años de las políticas
t_policy_year=t_policy_year_init+50*rand;
```



```
t_air_poll_time=t_air_poll_time_init+50*rand;
t_land_fert_time=t_land_fert_time_init+50*rand;
t_fcaor_time=t_fcaor_time_init+50*rand;
t_zero_pop_grow_time=t_zero_pop_grow_time_init+50*rand;
t_ind_equil_time=t_ind_equil_time_init+50*rand;
t_fert_eff_time=t_fert_eff_time_init+50*rand;
in_TDD=in_TDD_init+15*rand;
%Modificamos ahora los parámetros de las políticas
%nr_resources va desde 1e12 a 2e12
nr_resources=nr_resources_init*(1+rand);
%p_avg_life_agr_in va desde 1 a 3
p_avg_life_agr_inp=p_avg_life_agr_inp_init*(1+2*rand);
%chg_mlt_POLGM de -0.06 a 0
chg_mlt_POLGM=chg_mlt_POLGM_init+0.06*rand;
%chg_mlt_LYCM de 0 a 0.04
chg_mlt_LYCM=chg_mlt_LYCM_init+0.04*rand;
%chg_mlt_NRCM de -0.06 a 0
chg_mlt_NRCM=chg_mlt_NRCM_init+0.06*rand;
%des_fam_size de 1 a 3
des_fam_size=des_fam_size_init*(1+2*rand);
%ind_out_pc_des de 350 a 700
ind_out_pc_des=ind_out_pc_des_init+350*rand;
%p_avg_life_ind_cap de 12 a 16
p_avg_life_ind_cap=p_avg_life_ind_cap_init+4*rand;
%p_avg_life_ind_cap de 18 a 22
p_avg_life_serv_cap=p_avg_life_serv_cap_init+4*rand;
%p_avg_life_serv_cap de 0.5 a 1.5
p_serv_cap_out_ratio=p_serv_cap_out_ratio_init+rand;
%x29 se usa para comparar los recursos restantes con los recursos
%iniciales
x29=nr_resources;
%Y ahora lanzamos la simulación
%iniciamos vectores

%Guardamos los tiempos en vectores

in_tpy(k,1)=t_policy_year;
in_tiet(k,1)=t_ind_equil_time;
in_tfct(k,1)=t_fcaor_time;
in_tapt(k,1)=t_air_poll_time;
in_tlft(k,1)=t_land_fert_time;
in_tzpgt(k,1)=t_zero_pop_grow_time;
in_tfet(k,1)=t_fert_eff_time;
in_in_TDD(k,1)=in_TDD;
%Guardamos las otras variables en vectores

in_nr(k,1)=nr_resources;
in_palai(k,1)=p_avg_life_agr_inp;
in_POLGM(k,1)=chg_mlt_POLGM;
in_NRCM(k,1)=chg_mlt_NRCM;
in_LYCM(k,1)=chg_mlt_LYCM;
in_dfs(k,1)=des_fam_size;
in_iopd(k,1)=ind_out_pc_des;
in_palic(k,1)=p_avg_life_ind_cap;
in_palsc(k,1)=p_avg_life_serv_cap;
in_pscor(k,1)=p_serv_cap_out_ratio;

sim('simuworld3');
```



```
%Human Ecological Footprint
k
    max_HEF=max(HEF);
    final_HEF=HEF(length(HEF));
    fin_slo_HEF=slope_HEF(length(slope_HEF));
bHEF=find(HEF==max_HEF);
    max_timeHEF=time(bHEF);
    max_HEF_high=smf(max_HEF,[1 4]);
    max_HEF_low=1-max_HEF_high;
    final_HEF_high=smf(final_HEF,[0.8 1.2]);
    final_HEF_low=1-final_HEF_high;
    slope_HEF_high=smf(fin_slo_HEF,[-1 1]);
    slope_HEF_low=1-slope_HEF_high;
    max_timeHEF_high=smf(max_timeHEF,[1900 2100]);
    max_timeHEF_low=1-max_timeHEF_high;
    HEF_asumible=probor([slope_HEF_low; max_HEF_low; final_HEF_low]);
    asum_HEFstore(k)=HEF_asumible;
%Human Welfare Index
    max_HWI=max(HWI);
    final_HWI=HWI(length(HWI));
    max_HWI_high=smf(max_HWI,[0.5 1]);
    final_HWI_high=smf(final_HWI,[0.5 1]);
    var_HWI=max_HWI-final_HWI;
    var_HWI_high=smf(var_HWI,[0 0.2]);
%se busca que la diferencia entre el máximo y el final sea pequeño
%var_HWI_low estará próximo a 1 cuando la diferencia sea pequeña
var_HWI_low=1-var_HWI_high;
    HWI_optimo=var_HWI_low*final_HWI_high;
    optim_HWIstore(k)=HWI_optimo;
%Y la calificación global de la simulación:
    calif_global=HWI_optimo*HEF_asumible;
    calif_global_store(k,1)=calif_global;

end

i=find(calif_global_store>0.6)

M=[in_tpy(i,1) in_iopd(i,1) calif_global_store(i,1)]
pause
figure
hold on;
num_centros=4;
[center,u,obj_fcn] = fcm(M,num_centros)

plot3(M(:,1),M(:,2),M(:,3),'o')
box on;

% Set the viewing angle and the axis limits
view(26, 42);
axis([1975 2015 350 700 0.5 1]);
hold on
grid on
plot3(center(:,1),center(:,2),center(:,3),'ro');
xlabel('t ind equil time');
ylabel('ind out pc des');
zlabel('calif global');
```



```
matrix_clusters=zeros(3,num_centros);  
for n=1:num_centros  
    matrix_clusters(1,n)=n;  
end  
for c=1:length(u);  
    maxu=max(u(:,c));  
    l=find(u(:,c)==maxu);  
    matrix_clusters(2,l)=matrix_clusters(2,l)+1;  
    matrix_clusters(3,l)=(matrix_clusters(3,l)+maxu);  
end  
for n=1:num_centros  
    matrix_clusters(3,n)=matrix_clusters(3,n)/matrix_clusters(2,n);  
end  
matrix_clusters
```



9.11 CÓDIGO11. *Fuzzy clustering con 18 entradas y una salida.*

```
clear
clf
%Ponemos todos los tiempos en 1975 y generamos 50 n°s aleatorios entre
1975
%y 2025
t_policy_year_init=[1975];
t_air_poll_time_init=[1975];
t_land_fert_time_init=[1975];
t_fcaor_time_init=[1975];
t_zero_pop_grow_time_init=[1975];
t_ind_equil_time_init=[1975];
t_fert_eff_time_init=[1975];
%inicialmente los retrasos son de 5 años y los ampliamos hasta 20
in_TDD_init=[5];
%Parámetros que cambiamos en las políticas, empezamos por el rango más
bajo
nr_resources_init=[1e12];
p_avg_life_agr_inp_init=[1];
chg_mlt_POLGM_init=[-0.06];
chg_mlt_LYCM_init=[0];
chg_mlt_NRCM_init=[-0.06];
des_fam_size_init=[1];
ind_out_pc_des_init=[350];
p_avg_life_ind_cap_init=[12];
p_avg_life_serv_cap_init=[18];
p_serv_cap_out_ratio_init=[0.5];
kk=1;
num_carr=500;
in_tpy = zeros(1,num_carr);
in_tiet =zeros(1,num_carr);
in_tfct=zeros(1,num_carr);
in_tapt=zeros(1,num_carr);
in_tlft=zeros(1,num_carr);
in_tzpgt=zeros(1,num_carr);
in_tfet=zeros(1,num_carr);
in_in_TDD=zeros(1,num_carr);
%Guardamos las otras variables en vectores
in_nr=zeros(1,num_carr);
in_palai=zeros(1,num_carr);
in_POLGM=zeros(1,num_carr);
in_NRCM=zeros(1,num_carr);
in_LYCM=zeros(1,num_carr);
in_dfs=zeros(1,num_carr);
in_iopd=zeros(1,num_carr);
in_palic=zeros(1,num_carr);
in_palsc=zeros(1,num_carr);
in_pscor=zeros(1,num_carr);
for k=1:num_carr
rand('state',sum(100*clock))
%Modificamos los años de las políticas
t_policy_year=t_policy_year_init+50*rand;
t_air_poll_time=t_air_poll_time_init+50*rand;
```



```
t_land_fert_time=t_land_fert_time_init+50*rand;
t_fcaor_time=t_fcaor_time_init+50*rand;
t_zero_pop_grow_time=t_zero_pop_grow_time_init+50*rand;
t_ind_equil_time=t_ind_equil_time_init+50*rand;
t_fert_eff_time=t_fert_eff_time_init+50*rand;
in_TDD=in_TDD_init+15*rand;
%Modificamos ahora los parámetros de las políticas
%nr_resources va desde 1e12 a 2e12
nr_resources=nr_resources_init*(1+rand);
%p_avg_life_agr_in va desde 1 a 3
p_avg_life_agr_inp=p_avg_life_agr_inp_init*(1+2*rand);
%chg_mlt_POLGM de -0.06 a 0
chg_mlt_POLGM=chg_mlt_POLGM_init+0.06*rand;
%chg_mlt_LYCM de 0 a 0.04
chg_mlt_LYCM=chg_mlt_LYCM_init+0.04*rand;
%chg_mlt_NRCM de -0.06 a 0
chg_mlt_NRCM=chg_mlt_NRCM_init+0.06*rand;
%des_fam_size de 1 a 3
des_fam_size=des_fam_size_init*(1+2*rand);
%ind_out_pc_des de 350 a 700
ind_out_pc_des=ind_out_pc_des_init+350*rand;
%p_avg_life_ind_cap de 12 a 16
p_avg_life_ind_cap=p_avg_life_ind_cap_init+4*rand;
%p_avg_life_ind_cap de 18 a 22
p_avg_life_serv_cap=p_avg_life_serv_cap_init+4*rand;
%p_avg_life_serv_cap de 0.5 a 1.5
p_serv_cap_out_ratio=p_serv_cap_out_ratio_init+rand;
%x29 se usa para comparar los recursos restantes con los recursos
%iniciales
x29=nr_resources;
%Y ahora lanzamos la simulación
%iniciamos vectores
%Guardamos los tiempos en vectores
in_tpy(k,1)=t_policy_year;
in_tiet(k,1)=t_ind_equil_time;
in_tfct(k,1)=t_fcaor_time;
in_tapt(k,1)=t_air_poll_time;
in_tlft(k,1)=t_land_fert_time;
in_tzpgt(k,1)=t_zero_pop_grow_time;
in_tfet(k,1)=t_fert_eff_time;
in_in_TDD(k,1)=in_TDD;
%Guardamos las otras variables en vectores
in_nr(k,1)=nr_resources;
in_palai(k,1)=p_avg_life_agr_inp;
in_POLGM(k,1)=chg_mlt_POLGM;
in_NRCM(k,1)=chg_mlt_NRCM;
in_LYCM(k,1)=chg_mlt_LYCM;
in_dfs(k,1)=des_fam_size;
in_iopd(k,1)=ind_out_pc_des;
in_palic(k,1)=p_avg_life_ind_cap;
in_palsc(k,1)=p_avg_life_serv_cap;
in_pscor(k,1)=p_serv_cap_out_ratio;
sim('simuworld3');
%Human Ecological Footprint
k
max_HEF=max(HEF);
final_HEF=HEF(length(HEF));
fin_slo_HEF=slope_HEF(length(slope_HEF));
bHEF=find(HEF==max_HEF);
```



```
max_timeHEF=time(bHEF);
max_HEF_high=smf(max_HEF,[1 4]);
max_HEF_low=1-max_HEF_high;
final_HEF_high=smf(final_HEF,[0.8 1.2]);
final_HEF_low=1-final_HEF_high;
slope_HEF_high=smf(fin_slo_HEF,[-1 1]);
slope_HEF_low=1-slope_HEF_high;
max_timeHEF_high=smf(max_timeHEF,[1900 2100]);
max_timeHEF_low=1-max_timeHEF_high;
HEF_asumible=probor([slope_HEF_low; max_HEF_low; final_HEF_low]);
asum_HEFstore(k)=HEF_asumible;
%Human Welfare Index
max_HWI=max(HWI);
final_HWI=HWI(length(HWI));
max_HWI_high=smf(max_HWI,[0.5 1]);
final_HWI_high=smf(final_HWI,[0.5 1]);
var_HWI=max_HWI-final_HWI;
var_HWI_high=smf(var_HWI,[0 0.2]);
%se busca que la diferencia entre el máximo y el final sea pequeña
%var_HWI_low estará próximo a 1 cuando la diferencia sea pequeña
var_HWI_low=1-var_HWI_high;
HWI_optimo=var_HWI_low*final_HWI_high;
optim_HWIstore(k)=HWI_optimo;
%Y la calificación global de la simulación:
calif_global=HWI_optimo*HEF_asumible;
calif_global_store(k,1)=calif_global;

end
i=find(calif_global_store>0.6)
Tit=['in_tpy', 'in_tiet', 'in_tfct', 'in_tapt', 'in_tlft', 'in_tzpgt',
'in_tfet', 'in_in_TDD',...
'in_nr', 'in_palai', 'in_POLGM', 'in_NRCM', 'in_LYCM', 'in_dfs',
'in_iopd', 'in_palic', 'in_palsc', 'in_pscor',...
'calif_global_store']
M=[in_tpy(i,1) in_tiet(i,1) in_tfct(i,1) in_tapt(i,1) in_tlft(i,1)
in_tzpgt(i,1) in_tfet(i,1) in_in_TDD(i,1),...
in_nr(i,1) in_palai(i,1) in_POLGM(i,1) in_NRCM(i,1) in_LYCM(i,1)
in_dfs(i,1) in_iopd(i,1) in_palic(i,1) in_palsc(i,1) in_pscor(i,1),...
calif_global_store(i,1)]
num_centros=8;
[center,u,obj_fcn] = fcm(M,num_centros)
matrix_clusters=zeros(3,num_centros);
for n=1:num_centros
matrix_clusters(1,n)=n;
end
for c=1:length(u);
maxu=max(u(:,c));
l=find(u(:,c)==maxu);
matrix_clusters(2,l)=matrix_clusters(2,l)+1;
matrix_clusters(3,l)=(matrix_clusters(3,l)+maxu);
end
for n=1:num_centros
matrix_clusters(3,n)=matrix_clusters(3,n)/matrix_clusters(2,n);
end
matrix_clusters
center_time=[center(:,1) center(:,2) center(:,3) center(:,4) center(:,5)
center(:,6) center(:,7)]
```



```
center_asig=[(center(:,8) center(:,9) center(:,10) center(:,11)
center(:,12) center(:,13) center(:,14) center(:,15) center(:,16)
center(:,17) center(:,18))]
xlswrite('cluster_n.xls', Tit, 'Datos', 'A1')
xlswrite('cluster_n.xls', M, 'Datos', 'A2')
xlswrite('cluster_n.xls', center_time, 'Centros', 'A2')
xlswrite('cluster_n.xls', center_asig, 'Centros2', 'A2')
```



10. BIBLIOGRAFÍA



ANÁLISIS AUTOMÁTICO DE MODELOS COMPLEJOS
UTILIZANDO HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA
ARTIFICIAL PARTIENDO DEL EJEMPLO DEL WORLD3





- Aracil, J. (1986). *Introducción a la dinámica de sistemas*.
- Bertalanffy, L. V. (1968). *General System Theory; Foundations, Development, Applications*. New York: Braziler.
- de Jongh, D. (1978). *Structural parameters sensitivity of the limits to growth world model*. Pretoria, South Africa: National Research Institute for Mathematical Sciences, Council for Scientific and Industrial Research.
- Dennis L. Meadows, W. W. (1974). *Dynamics of Growth in a Finite World*. Cambridge, Massachusetts: Wright-Allen Press.
- Dennis Meadows, D., Meadows, D., & Randers, J. (1992). *Beyond the Limits*. Post Mills, Vermont: Chelsea Green Publishing Company.
- Donella Meadows, D. M. (1972). *Los límites del crecimiento*. New York.
- Drew, D. R. (1995). *Dinámica de sistemas aplicada*. Isdefe.
- Ford, A., & Flynn, H. (2004). Statistic screening of system dynamics models. *System Dynamics Review*, 21, 273 - 303.
- Forrester, J. W. (1971). *World Dynamics*. Cambridge, Massachusetts: Wright-Allen Press.
- García, R. (2006). *Sistemas Complejos*. Barcelona: Gedisa.
- Maslow, A. (1943). *A Theory of Human Motivation*. Psychological Review.
- Meadows, D., Meadows, D., & Randers, J. (2004). *Limits to Growth. The 30 Year Update*. Chelsea Green Publishing Co.
- Mediavilla, M., Retortillo, P., de Miguel, L. J., & de Castro, C. (2008). An attempt to automate the analysis of complex system dynamics models: an example of WORLD 3. *System Dynamics Review*.
- Mojtahedzadeh, M., Anderson, D., & Richardson, G. (2004). Using Digest to implement the pathway participation method for detecting influential system structure. *System Dynamics*, 1-20.
- Thissen, W. (1978, March). Investigations into the world3 model: Overall Model Behavior and Policy Conclusions. *System, Man and Cybernetics*, 8(3), 172-182.
- Thissen, W. (1978). Population in the Club of Rome's World3 Model. *System, Man and Cybernetics*, 8(3).
- Thissen, W., & de Mol, C. (1978). The Agricultural and Persistent Pollution Subsystems in World3. *System, Man and Cybernetics*, 8(3), 159-172.
- Turner, G. (2008). A comparison of the limits to growth with thirty years of reality. *CSIRO*.
- Turner, G. (2012). On the cusp of global collapse? *GAIA* 21/2, 116 - 124.