

EVOLUCIÓN DINÁMICA DE UN PROYECTO DE I+D

Yolanda Álvarez Castaño

Universidad de Oviedo

En el presente artículo, se sintetizan las razones que justifican el empleo de la dinámica de sistemas, en la planificación y gestión de los proyectos de investigación y desarrollo; ya que si bien su utilización, no consigue eliminar totalmente la incertidumbre connatural a este tipo de actividades, sí permite la eliminación de fallos obvios, a la vez que establece una evaluación de los riesgos inherentes a las incertidumbres identificables. Ello es debido, a que su empleo obliga a los miembros del equipo de desarrollo, a enfrentarse con un test real, que les fuerza a pensar en el proyecto con el suficiente grado de detalle, como para determinar un camino adecuado que les permita completar el trabajo de forma satisfactoria. Asimismo, y por medio de un pequeño ejemplo, se pretende ilustrar cómo es posible recoger en un modelo de simulación, los aspectos más importantes que se encuentran implicados en el proceso de diseño y desarrollo de un nuevo producto. De esta forma será posible vislumbrar, a través de las distintas simulaciones que se efectúen con el modelo, tanto el proceso de evolución seguido por el proyecto, como las consecuencias que ciertas medidas de gestión a implantar, tendrían sobre éste.

Palabras clave: dinámica de sistemas, gestión de proyectos, I+D.

1. JUSTIFICACIÓN DEL EMPLEO DE LA DINÁMICA DE SISTEMAS A LA GESTIÓN DE LOS PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

El actual entorno competitivo de carácter mundial, intenso y dinámico, caracterizado por unos niveles sin precedencia de incertidumbre técnica y comercial, convierte al desarrollo de nuevos productos, en una de las actividades que más ventajas competitivas puede ofrecer a medio-largo plazo a la empresa; ya que si ésta no es capaz de ofrecer productos que no sólo cubran las expectativas básicas de los consumidores, sino que incluso, sorprendan y deleiten a éstos —productos que los consumidores necesitan, pero que ni siquiera imaginan (Pralhad y Hamel, 1990)—, el horizonte de su prosperidad se encuentra muy limitado en el tiempo.

Desde esta perspectiva, cabe indicar que el desarrollo de nuevos productos —al desplazar a los productos comercializados hasta entonces y fijar así, las nuevas bases de la competencia—, no sólo abre nuevos mercados y atrae a nuevos consumidores; sino que además, estimula la habilidad de la empresa para competir, desencadenando así, un círculo virtuoso sobre su reputación en el mercado y sobre el entusiasmo de sus miembros.

Teniendo en cuenta estos favorables efectos, no debería sorprender el creciente interés que se percibe, tanto en el mundo académico como empresarial, por alcanzar un mayor y más profundo conocimiento, sobre la forma de lograr una correcta planificación, gestión y ejecución, de las actividades tendientes a la obtención de un nuevo producto.

No obstante, el conseguir ese propósito, no es una tarea fácil; pues para innovar, el sistema organizativo debe operar fuera del equilibrio; situándose en la zona de caos¹ o de inestabilidad limitada, pues únicamente en ella, se podrá hacer uso del desorden, de la irregularidad y de la discrepancia, como elementos esenciales en el proceso de cambio.

Sin embargo, lejos del equilibrio, el sistema es conducido por realimentaciones positivas —también denominadas amplificadoras, ya que hacen que el sistema evolucione, a través de una trayectoria de autorrefuerzo (Stacey, 1992; 52)— y negativas, hacia paradójicos estados de estabilidad e inestabilidad, tanto predecibles como impredecibles (Stacey, 1995).

Es precisamente dentro de la zona de caos, donde los vínculos entre los efectos y la causa que los origina, desaparecen en el despliegue de los acontecimientos concretos; lo que provoca que, incluso en ocasiones, resulte imposible enlazar a posteriori, las causas con sus efectos (Stacey, 1992; 55-57). Además, en dicha zona el sistema es sumamente sensible tanto a pequeños cambios en el entorno —ya que utiliza la realimentación positiva para amplificar esas pequeñas alteraciones, a través del sistema, dando lugar así, a formas de comportamiento totalmente diferentes e intrínsecamente impredecibles—, como a las condiciones iniciales de partida. Se destruyen de esta manera, los vínculos identificables entre las acciones individuales y los resultados globales (Stacey, 1995).

Por otra parte, y al ser la elevada incertidumbre tanto técnica como comercial, una de las características más destacadas de todo proyecto de I+D, hay quien llega a afirmar (Stout, 1980; 25) que, *cuando el control puede ser aplicado, la investigación y desarrollo, ya no es investigación y desarrollo; por tanto, los proyectos de I+D deben ser dirigidos, precisamente porque no hay bases para su control*. Este hecho se debe, a que gran parte de la información necesaria, para planificar un proyecto de diseño y desarrollo de un nuevo producto, no está disponible por definición. De ahí que, a menudo, los planes deban ser revisados, cuando otros planes cambian en respuesta a la dinámica del entorno (Rosenau y Moran, 1993; 73).

(1) Dentro del ámbito científico, no debe entenderse el caos como sinónimo de confusión o de inestabilidad explosiva; ya que el mismo se encuentra limitado por la estructura de la regla que lo genera, lo que provoca, que todo comportamiento caótico, siga un modelo general cualitativo, aún y cuando dentro de él, los resultados concretos sean aleatorios (Stacey, 1992; 57).

Por este motivo, y ante situaciones de incertidumbre (Stout, 1980; 105), un plan extenso y detallado equivale a un programa prematuro, que convierte a lo que debiera ser considerado como algo experimental —como una apertura a la pregunta y a la crítica—, en algo cerrado por un sistema rector y de control, en el que éste último, se asume como una actividad de planificación y supervisión, que tiene como único propósito, el asegurar que el comportamiento del sistema, se ajusta a lo establecido.

Ante la inconveniencia de aplicar las tradicionales herramientas de planificación y control, se plantea como alternativa, el empleo de la dinámica de sistemas. Ésta tiene como objetivo, mostrar cómo se produjo el problema detectado; de ahí, que otorgue una importancia primordial a la correcta representación de la estructura del sistema; pues sin entender éste, no hay manera de distinguir entre la causa y sus efectos; los cuales se encuentran muy a menudo, ampliamente separados tanto temporal, como especialmente².

El empleo de esta metodología permite incluir en el análisis del problema, factores relativos tanto a sus aspectos técnicos, como humanos y organizativos; ya que es un método que permite a los individuos explicitar todas sus asunciones, e integrarlas de forma lógica y comprobable (Homer, 1996). La incorporación de los factores humanos y organizativos, se logra gracias a la información proporcionada por las personas que trabajan en el sistema, cuyos modelos mentales³ proporcionan una información rica y precisa sobre el problema, y sobre cómo ellas interactúan, para tomar decisiones que tienen como objetivo, solventar a éste último; configurando así, la estructura del sistema (Eden, 1994).

La dinámica de sistemas posibilita igualmente, el que cada política testada, sea analizada considerando los distintos aspectos del comportamiento a que da lugar; es decir, permite a los participantes en el proceso, explorar y entender las consecuencias del enfoque, o de la acción que proponen (Pawson, Bravard y Cameron, 1995). Se podrá corroborar así, si es cierto que los sistemas operan tan deficientemente, que cabe esperar que las medidas a adoptar, mejoren algunos, o la mayoría de los rendimientos, sin deteriorar al resto.

Su aplicación a la planificación y gestión de los proyectos de I+D, permite obtener sinergias importantes, al enlazar los procesos cognoscitivos, con las rutinas computerizadas. Pues esta aproximación combina la teoría basada en anteriores investigaciones, con la investigación práctica; constituyendo en sí, un tercer pilar sobre el que se asienta la eficacia en el proceso racional de toma de decisiones; ya que guía hacia un mejor entendimiento del sistema, y hacia una más cuidadosa investigación de los cursos de acción (Milling, 1996).

(2) Véase el artículo de García Rodríguez, que aparece en este mismo número.

(3) Éstos hacen referencia al conocimiento que reside en la mente de las personas, a cerca del sistema y de su estructura; de forma que, mediante su análisis, sea posible explicar porqué la gente actúa como la hace, y cómo están interconectadas las partes del sistema objeto de estudio. (Véase el artículo de Forrester recogido en este monográfico).

De esta forma, es posible que los miembros del equipo de desarrollo, se enfrenten a un test real⁴ que les fuerce a pensar en el proyecto, con el suficiente grado de detalle, como para que permita vislumbrar un camino adecuado, que les permita completar de forma satisfactoria el trabajo (Rosenau y Moran, 1992; 99). Desde esta perspectiva, se considera que el empleo de la dinámica de sistemas, en la gestión de los proyectos de I+D, permitirá la consecución de tres propósitos fundamentales (Pawson, Bravard y Cameron, 1995):

1. Reducir el «Tiempo al Mercado»; es decir, el tiempo necesario para diseñar, desarrollar y comercializar el nuevo producto.
2. Facilitar la adecuación de los nuevos productos a los requerimientos individuales de los clientes.
3. Hacer más flexible el proceso operativo, ante acontecimientos inesperados.

2. CASO PRÁCTICO

2.1. Definición y Diagrama Causal

Seguidamente, y por medio de un pequeño ejemplo⁵, se tratará de ilustrar cómo es posible aplicar la dinámica de sistemas, a la gestión de proyectos de investigación y desarrollo. A tal fin, se elaboró un modelo dinámico, empleando para ello el programa informático VensimDSS32⁶, en el que se incluyeron —a pesar del gran esfuerzo de simplificación realizado—, los aspectos y factores fundamentales que, con carácter general, se encuentran involucrados en el proceso de diseño y desarrollo de un nuevo producto.

Como paso previo a la confección del diagrama causal, que recoge todas las relaciones entre las variables más importantes del sistema, es preciso definir, de forma precisa, el problema objeto de estudio⁷. En dicha definición, se deben incluir los objetivos, las suposiciones y las limitaciones, que servirán posteriormente de base, a la elaboración del modelo.

(4) Véase el apartado «Juegos de empresa» del artículo de García Rodríguez, en el presente número.

(5) El modelo que se describe en este apartado, pretende constituir una pequeña guía, sobre cómo abordar el proceso de construcción de un modelo que recoja la planificación, gestión y ejecución de un proyecto de investigación y desarrollo. El modelo no es pues aplicable —debido a la extrema simplificación a que se ha visto sometido, para su inclusión en el presente artículo— a la gestión práctica de este tipo de actividades; constituyendo tan sólo, un punto de partida en la elaboración de un modelo, que refleje fielmente la estructura subyacente en la puesta en marcha de un proyecto innovador.

(6) La información sobre los programas informáticos de simulación disponibles, se encuentra recogida en la referencia técnica que aparece en el artículo de García Rodríguez, de este mismo monográfico.

(7) Para una explicación más detallada de las distintas fases que integran el proceso de modelización de un problema, véase el artículo de González-Busto, que aparece en este monográfico.

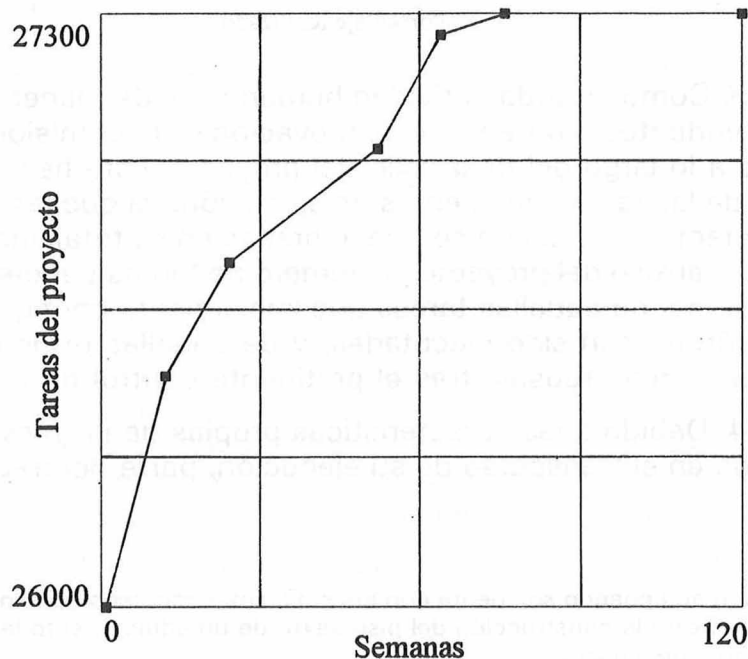
Así, y por medio de la construcción del modelo de dinámica de sistemas que se expone a continuación, y de las posteriores simulaciones que se efectuarán con el mismo, se persigue analizar, si las causas reales de las disfunciones percibidas en múltiples proyectos de investigación y desarrollo, poseen un origen externo o, si por el contrario, las mismas son resultado de la ineficacia de las medidas adoptadas, con objeto de corregir el desfase que se percibe, entre los planes inicialmente previstos, y la evolución real del proyecto.

Para alcanzar ese propósito, se construyó un modelo de simulación, que reproduce la evolución seguida por un proyecto de diseño y desarrollo de un nuevo producto, de carácter unifásico, compuesto inicialmente por un total de 26.000 tareas de pequeño tamaño, que será ejecutado a lo largo de 100 semanas, por un equipo de desarrollo que, integrado por 10 profesionales provenientes de todas las áreas de la empresa, se preveía fuera capaz de realizar, un total de 260 tareas a la semana.

Sin embargo, en la elaboración de dicho modelo, hubo que incluir además, las siguientes hipótesis o restricciones:

Hipótesis 1: La incertidumbre connatural a este tipo de actividades, es la responsable de que el número de tareas que inicialmente configuraban el proyecto, se vea incrementado a lo largo del desarrollo del mismo, pasando de 26.000 a 27.300 tareas.

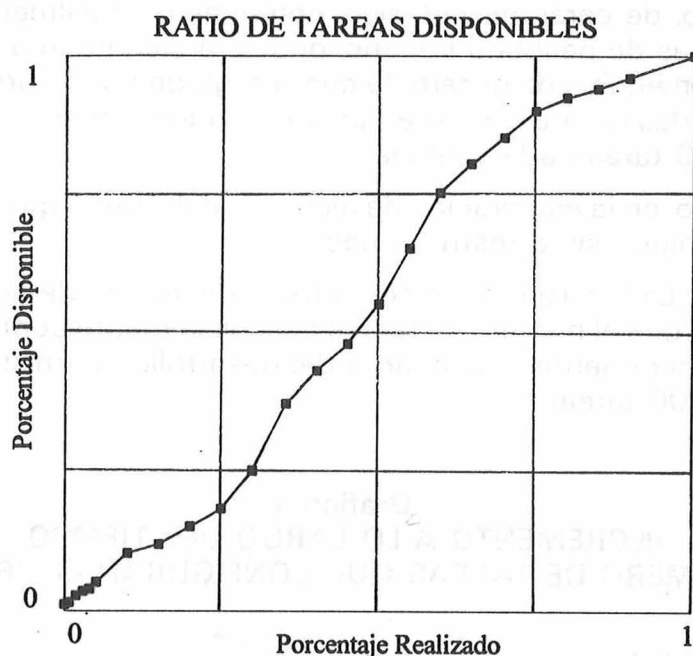
Gráfico 1
INCREMENTO A LO LARGO DEL TIEMPO,
DEL NÚMERO DE TAREAS QUE CONFIGURAN EL PROYECTO



Hipótesis 2: El orden a seguir en la realización de las tareas, viene determinado por la relación de precedencia no-lineal que rige entre las mismas. Tal relación, da origen a lo que se denomina como «límite del propio proceso»

a la ejecución de las tareas»; lo cual ocasiona que, aún y cuando se disponga de los suficientes recursos para ejecutar en una única semana todo el proyecto, únicamente se podrán llevar a cabo, aquellas tareas que están disponibles para ser realizadas de forma inmediata⁸.

Gráfico 2
RELACIÓN DE PRECEDENCIA ENTRE LAS TAREAS
QUE CONFIGURAN EL PROYECTO⁹



Hipótesis 3: Como en toda actividad humana —y de manera especial, en los procesos tendentes a obtener una innovación—, la comisión de fallos es una constante a lo largo del desarrollo del proyecto. Este hecho, incidirá en el incremento de las tareas pendientes de ejecución; ya que las tareas detectadas como defectuosas, deben ser reelaboradas en su totalidad. De ahí, que a lo largo del desarrollo del proyecto, el número de tareas pendientes de realización sea la suma, de aquellas tareas que inicialmente configuraban el proyecto, y que aún no han sido ejecutadas, y de aquellas otras que han sido detectadas como defectuosas, tras el pertinente control de calidad.

Hipótesis 4: Debido a las características propias de un proyecto de I+D, es probable que en el transcurso de su ejecución, parte del trabajo realizado

(8) Así por ejemplo, aún cuando se cuente con los suficientes recursos humanos y materiales, no se puede empezar la construcción del piso sexto de un edificio, si todavía se están poniendo los pilares del cuarto.

(9) Esta figura, ejemplifica cómo es posible incorporar en el modelo, por medio de variables «look-up», cualquier tipo de relación no-lineal, las cuales, tal y como expone Forrester en el artículo recogido en este mismo monográfico, resultan esenciales para una adecuada representación del comportamiento empresarial.

deba ser desechado, bien por considerarse como no válido para la obtención de la innovación que se persigue, o bien por haberse producido un cambio de enfoque en el proyecto, con relación a su orientación inicial.

Hipótesis 5: Finalmente, y en caso de detectarse cualquier tipo de retraso, con relación a los planes inicialmente establecidos, dicho desfase temporal será corregido por alguna de estas tres vías:

- Incrementando el tamaño del equipo de desarrollo, mediante la contratación externa de trabajadores. Esta contratación lleva aparejada tres tipos de retrasos, como consecuencia del:
 - a) Tiempo que se tarda en obtener la autorización para llevar a cabo esas contrataciones.
 - b) Tiempo empleado en la selección del personal.
 - c) Tiempo que se precisa para las labores de formación y socialización del nuevo personal.
- Retrasando la fecha prevista para la finalización del proyecto. No obstante, es preciso indicar que suele existir una fuerte resistencia, a adoptar esta medida; al considerarse como inapropiado, desde un punto de vista estratégico, el que la finalización del proyecto, se posponga más allá de un cierto límite.
- Incrementando el ritmo de ejecución de las tareas, por medio de un incremento en el tiempo de trabajo.

Tomando en consideración esas hipótesis y limitaciones, es posible establecer los bucles de realimentación¹⁰ que recogen las relaciones existentes entre las variables y los aspectos más importantes del proyecto. Éstos, una vez concatenados, dan lugar al diagrama causal que determina tanto la estructura, como el comportamiento del sistema objeto de análisis.

1. Precedencia de las tareas

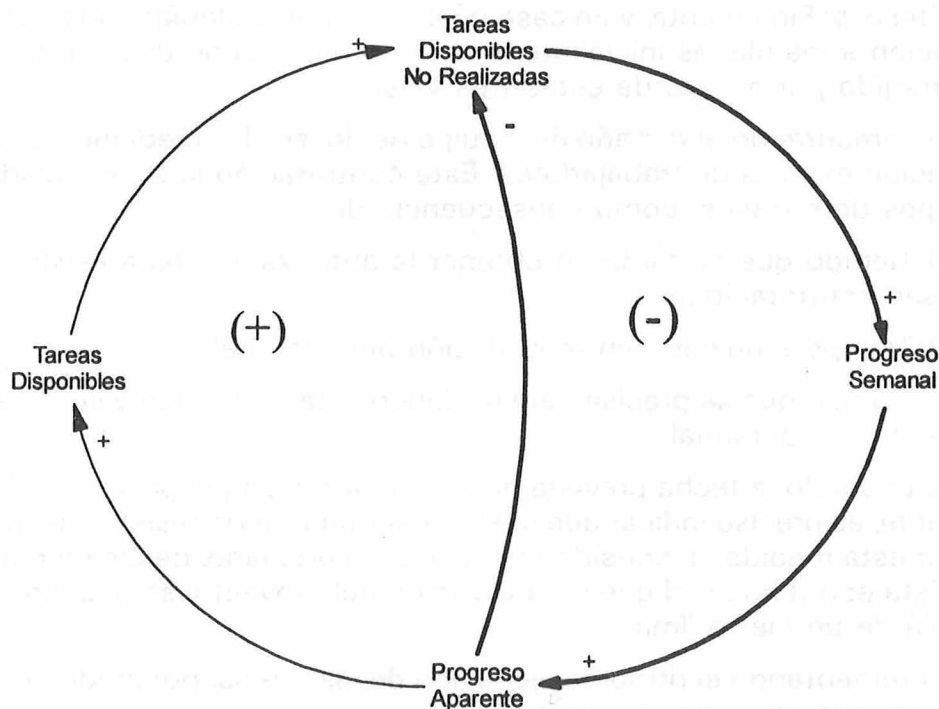
La existencia de un orden de precedencia no lineal entre las tareas del proyecto, da lugar a los siguientes bucles:

El bucle positivo es consecuencia de la precedencia no lineal, que preside la ejecución de tareas. Así, a más tareas realizadas, mayor número de tareas disponibles. Por su parte, el bucle negativo —de trazo más grueso, que recoge cómo a más tareas ejecutadas, menor es el trabajo que queda pendiente—, refleja el proceso de desarrollo que seguiría el proyecto, sino existiese la relación de precedencia; es decir, si desde el primer momento, todas las tareas estuviesen disponibles para ser llevadas a cabo de inmediato, estando así su ejecución determinada, por la disponibilidad de los recursos.

Dada la ineludible necesidad de respetar el orden de precedencia entre las tareas a ejecutar, el bucle que debe ser tenido en cuenta para la asignación

(10) Véase en el artículo de García Rodríguez, recogido en este monográfico, la referencia a los efectos que, tanto los bucles positivos como los negativos, tienen sobre la evolución del sistema objeto de análisis.

Gráfico 3
BUCLES QUE RECOGEN LAS IMPLICACIONES DE LAS RELACIONES DE PRECEDENCIA, ENTRE LAS TAREAS A REALIZAR



de los recursos, a lo largo del progreso del proyecto, es el positivo; pues éste refleja cómo a medida que se incrementa el número de tareas realizadas, aumenta la cuantía de las tareas disponibles¹¹.

2. Existencia de un calendario de ejecución

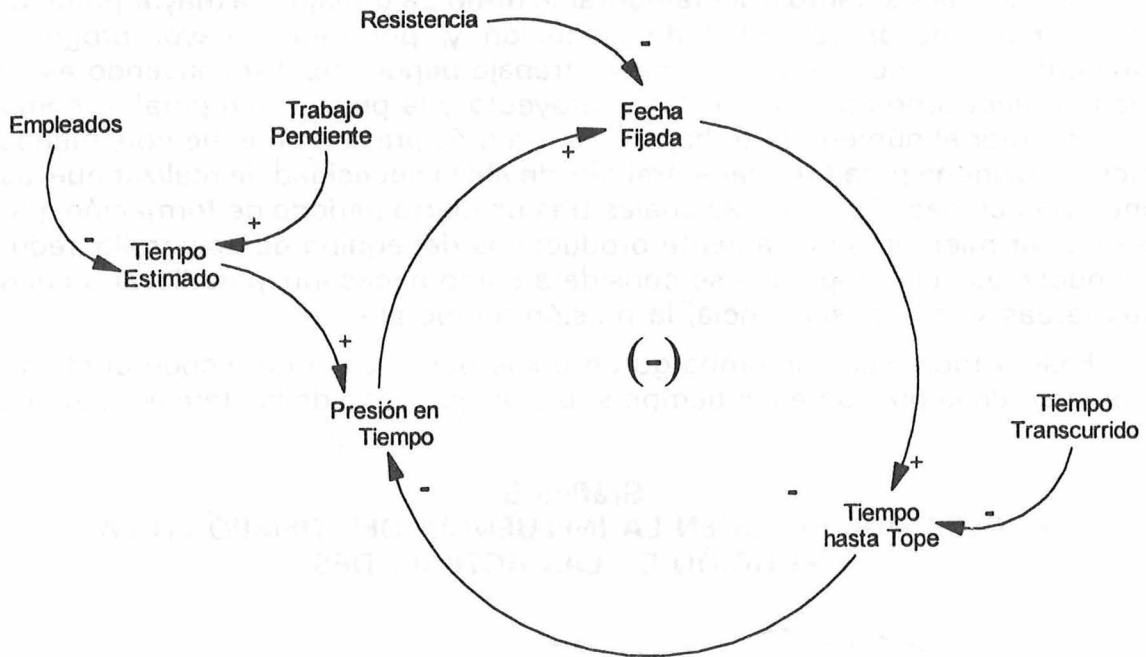
Por otra parte, y a medida que se va ejecutando el proyecto, se puede ir estimando —teniendo en cuenta el número de tareas que aún falta por realizar, así como el número de integrantes del equipo de trabajo y su productividad— el tiempo que se precisaría para completar el trabajo.

Periódicamente, esas nuevas estimaciones serán comparadas con el tiempo que resta hasta la fecha fijada para la finalización del proyecto; se consigue así, vislumbrar fácilmente, si se cumplirá o no, con el calendario previsto. En caso de que esto último no fuera posible, surgirá una cierta presión, para posponer la fecha de finalización. Sin embargo, en el sistema existirá siempre una cierta resistencia, a modificar la finalización del proyecto. Tal resistencia surtirá efecto, hasta que la imposibilidad de cumplir el objetivo, de finalizar el proyecto en la fecha prevista, sea tan evidente, que resulte ineludible corregir la previsión, anteriormente establecida, sobre la fecha de finalización del proyecto.

Surge así, un bucle de signo negativo, es decir, equilibrador; ya que cuanto más tiempo reste hasta la fecha fijada para la finalización del proyecto, me-

(11) Véase gráfico 2.

Gráfico 4
BUCLE NEGATIVO DE MODIFICACIÓN DE FECHA DE FINALIZACIÓN



nor es la necesidad de adaptar la misma, a las nuevas estimaciones realizadas sobre el tiempo que se precisaría, para completar el trabajo. No obstante, esta dinámica equilibradora, se verá dificultada por la progresiva resistencia a prorrogar, más allá de una cierta fecha, la finalización del proyecto, debido a las nefastas consecuencias estratégicas que ello podría conllevar¹².

3. Repercusión de la presión temporal en la ejecución de las tareas

Cuando se constata la existencia de un gran desfase temporal en la realización del trabajo, y no se desea prorrogar la finalización del proyecto, deben ponerse en marcha una serie de medidas, con objeto de minorar esa presión temporal. Tales medidas consistirán básicamente, en un incremento del tamaño del equipo de desarrollo, y/o en un aumento del ritmo de trabajo de éste. Aparentemente, ambas decisiones redundarán en una más rápida ejecución de los trabajos y, en consecuencia, en una menor cantidad de tareas pendientes de realización. De esta forma se conseguirá, que el cálculo sobre el tiempo necesario para completar el proyecto, se aproxime más, a la fecha oficialmente establecida para la finalización del mismo.

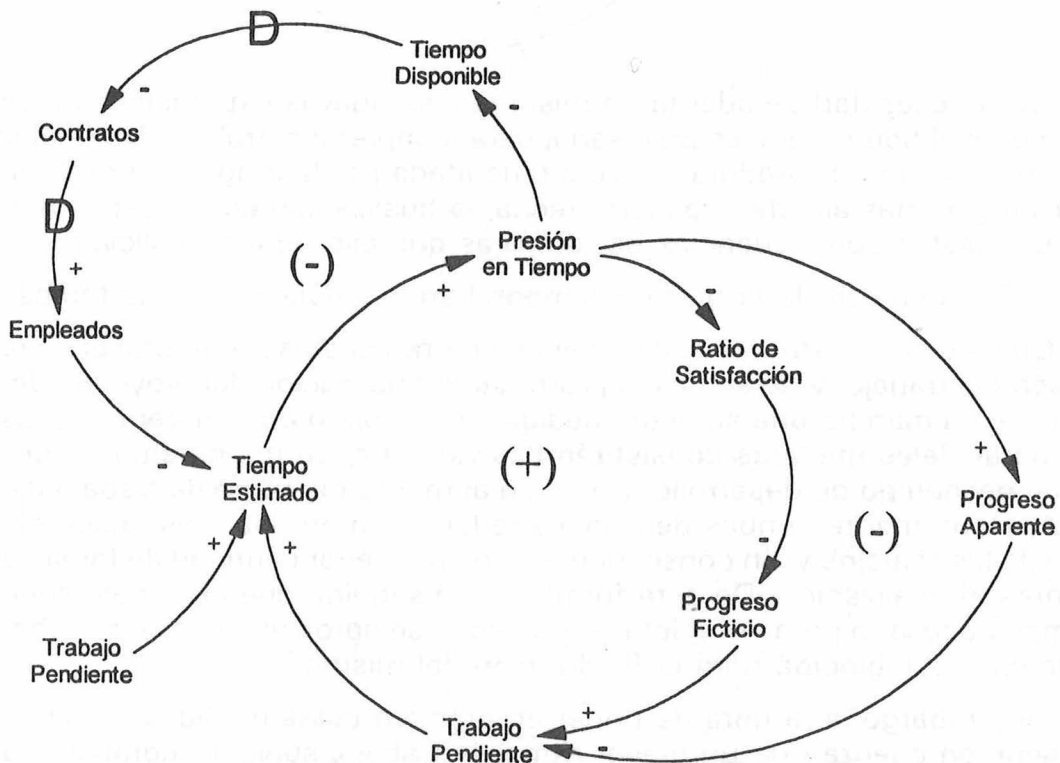
Sin embargo, a la hora de poner en práctica estas medidas, no siempre se tiene en cuenta que un mayor ritmo de trabajo, suele ir acompañado de una menor calidad de ejecución; es decir, de la comisión de más errores y, por tanto, de la necesidad de volver a rehacer un mayor número de tareas. Esto incrementa, la cuantía del trabajo aún pendiente de realización y, en definitiva, el tiempo estimado como necesario para concluir el proyecto.

(12) Aquella empresa que logre adelantarse a los competidores, en el lanzamiento al mercado del nuevo producto, gozará de una situación temporal de monopolio.

Así pues, y a raíz de la puesta en práctica de estas dos medidas, surgen, tal y como se aprecia en el gráfico 5, dos bucles negativos que reflejan los efectos buscados, tanto al incrementar el ritmo de trabajo —a mayor premura de tiempo, mayor velocidad de ejecución y, por tanto, mayor progreso aparente¹³ y, en consecuencia, menor trabajo pendiente, disminuyendo así el tiempo necesario para completar el proyecto y la presión temporal—, como al aumentar el número de trabajadores —a más presión en el tiempo, menos tiempo dispone para finalizar el trabajo, de ahí la necesidad de realizar nuevas incorporaciones al equipo, las cuales tras un cierto período de formación, pasan a ser miembros plenamente productivos del equipo de desarrollo, reduciéndose así, el tiempo que se considera como necesario, para llevar a cabo las tareas y, en consecuencia, la presión temporal—.

Pese a todo, será sin embargo un bucle positivo —que recoge el efecto perverso de la presión en el tiempo sobre la ejecución de las tareas—, el que

Gráfico 5
BUCLAS QUE RECOGEN LA INFLUENCIA DEL TIEMPO EN LA EJECUCIÓN DE LAS ACTIVIDADES¹⁴



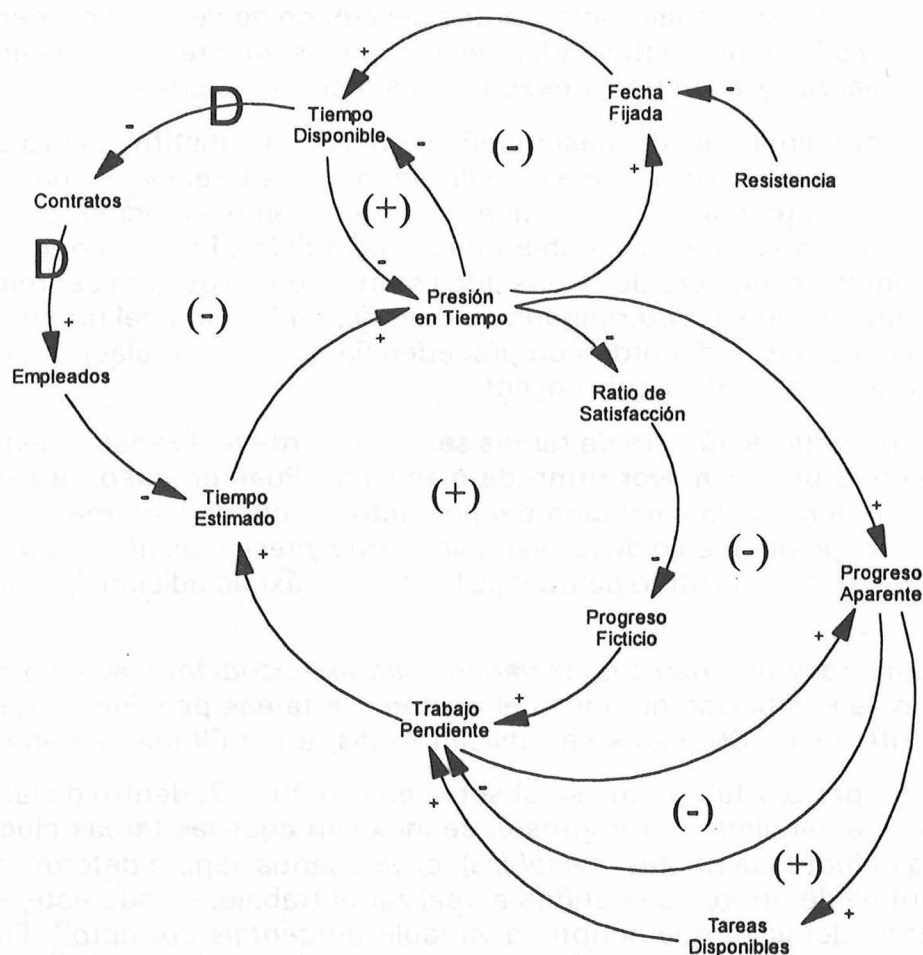
(13) Se denomina Progreso Aparente porque parte de las tareas que lo integran, deberán ser reelaboradas, por haber sido realizadas de forma defectuosa. La totalidad de las tareas ejecutadas de forma defectuosa, se recoge bajo la denominación de Progreso Ficticio.

(14) La D recoge la existencia del retraso que surge, tanto como consecuencia de la obtención de autorizaciones para realizar las contrataciones, y del proceso de selección del personal, como a raíz del necesario proceso de formación y socialización a que son sometidos los recién contratados, antes de incorporarse al equipo.

determinará la evolución del proyecto; ya que, cuanto mayor sea la premura de tiempo, mayor será la probabilidad de ejecutar de forma defectuosa, las tareas; surgiendo así, la ya consabida necesidad de rehacer dichas tareas, con el consiguiente aumento del trabajo pendiente. Este hecho, no hace sino incrementar aún más, la previsión sobre el tiempo necesario para finalizar el proyecto y, por tanto, la presión en el tiempo.

Estos tres bucles de realimentación, dan lugar al siguiente diagrama causal:

Gráfico 6
DIAGRAMA CAUSAL



2.2. Diagrama de Flujos

Una vez establecido el diagrama causal, hay que proceder a trasladar éste, a un modelo matemático compuesto por una serie de ecuaciones, cuya misión es plasmar, de forma sintética, el funcionamiento real del sistema objeto de análisis. Gracias a ese modelo matemático, se podrá simular el comportamiento del sistema ante distintas decisiones aplicadas; lo que permitirá observar las distintas interacciones entre las variables, así como las respuestas que se llevarán a cabo, desde ciertas áreas del sistema, cuando éstas se vean afectadas por las decisiones adoptadas en otras áreas.

Trabajo semanal y corrección de errores.

Así, y para el ejemplo que nos ocupa, se estableció un nivel (*Equipo de Trabajo*)¹⁵ que recoge a los trabajadores que van a configurar el equipo de desarrollo. Dicho nivel tiene un valor inicial de 10, viniendo recogida la cuantía de las tareas que son capaces de realizar semanalmente, por el flujo de entrada *progreso*. En principio, cabría esperar que el valor que semanalmente adoptase dicho flujo, fuese el resultado de multiplicar el número de integrantes del equipo, por la *PRODUCTIVIDAD* semanal de cada uno de ellos —26 tareas a la semana—. Sin embargo, su valor se verá afectado por diversos hechos.

Así, y si recientemente se han efectuado contrataciones, el proceso de formación a que estos nuevos miembros se ven sometidos, conlleva el que al menos dos de los actuales integrantes del equipo de desarrollo, vean minorada en un 75% su productividad, pues son precisamente ellos, los encargados de socializar y adiestrar a esas nuevas incorporaciones.

Otro factor limitativo del desempeño semanal, lo constituye el ya comentado «límite del propio proceso a la realización de las tareas», el cual se recoge —en el diagrama de flujo que sirve de representación al modelo matemático—, mediante la variable *tareas disponibles*. Por medio de esta variable, se indica el número de tareas que están disponibles para ser realizadas de inmediato; viniendo determinada su cuantía, en función del número de tareas ya ejecutadas, y del orden de precedencia que rige la relación existente entre las distintas tareas del proyecto¹⁶.

Por otra parte, el número de tareas semanalmente realizadas, puede verse incrementado por un mayor ritmo de ejecución. Pues en caso de existir un desfase temporal en la ejecución del proyecto, se puede incrementar —tal y como se recoge por medio de las variables *ritmo*, *presión en el tiempo* y *TIEMPO VS TRABAJO*—, el ritmo de trabajo, hasta un máximo adicional, de un 20% más.

Finalmente, y por medio de la variable *Trabajo pendiente*, se incorpora en el modelo, la posibilidad de que si el número de tareas pendientes de ejecución es inferior a 200, éstas se realicen todas, en la última semana.

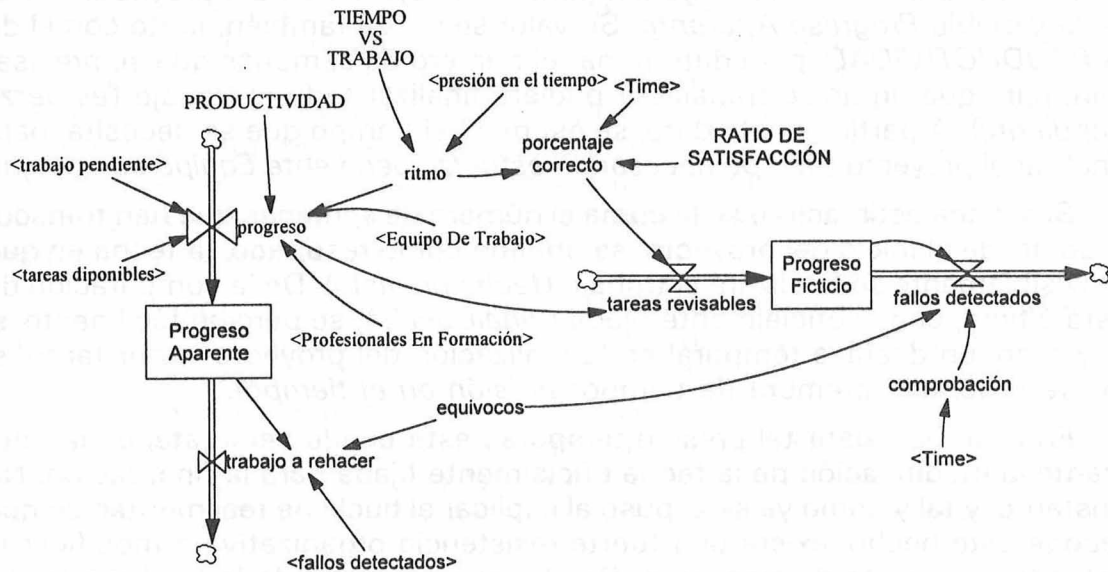
Por otra parte, y tal y como se observa en el gráfico 7, dentro de las tareas realizadas semanalmente (*progreso*), se incluyen aquellas tareas ejecutadas de forma defectuosa (*tareas revisables*), cuya cuantía vendrá determinada por el porcentaje de errores cometidos al realizar el trabajo; siendo éste, el complementario del valor que adopte la variable *porcentaje correcto*¹⁷. Este último se ve deteriorado, en ocasiones, como consecuencia de un incremento en el ritmo de trabajo.

(15) Todos y cada uno de los efectos comentados en los distintos diagramas del modelo, se recogen en las distintas variables que aparecen en cursiva.

(16) Véase gráfico 2.

(17) La variable *RATIO DE SATISFACCIÓN*, recoge cómo el porcentaje de tareas correctamente realizadas, aumenta a lo largo de la ejecución del proyecto; alcanzando el nivel del 100% a partir de la semana 76.

**Gráfico 7
TRABAJO REALIZADO**



Dado que las tareas defectuosas, no serán percibidas como tales, hasta que no se lleve a cabo un control de calidad —la periodicidad de los mismos es bimensual y aparece recogida en la variable *comprobación*—, en el modelo se incluye el nivel *Progreso Ficticio*, que recoge la cuantía de aquellas tareas que se realizan de forma defectuosa, durante el período de tiempo que media entre dos controles de calidad consecutivos¹⁸.

Tras las periódicas inspecciones de calidad, se procede a minorar, en la misma cuantía, tanto el valor del nivel *Progreso Aparente*, como el del *Progreso Ficticio*; por medio, respectivamente, de los flujos de salida; *trabajo a rehacer* y *fallos detectados*. En ambos flujos, se incluye también aquella parte del trabajo que debe ser desestimado, como consecuencia del proceso de prueba y error connatural a todo proyecto de I+D. El porcentaje de trabajo que debe desecharse, se recoge por medio de la variable *equivocos*.

Relaciones de precedencia y previsiones

En el modelo matemático, también hay que incluir la relación de precedencia no lineal, que rige el orden de ejecución de las tareas. Para ello, y tomando como base el volumen de tareas ya ejecutadas (*Progreso Aparente*), se determina qué porcentaje de trabajo ya ha sido realizado (*porcentaje de tareas realizadas*). Este dato, permitirá conocer —teniendo en cuenta la relación de precedencia entre las tareas (*RATIO DE TAREAS DISPONIBLES*) y el número de tareas que aún falta por realizar (*trabajo pendiente*)— el número de tareas disponibles para ser inmediatamente realizadas (*tareas disponibles*).

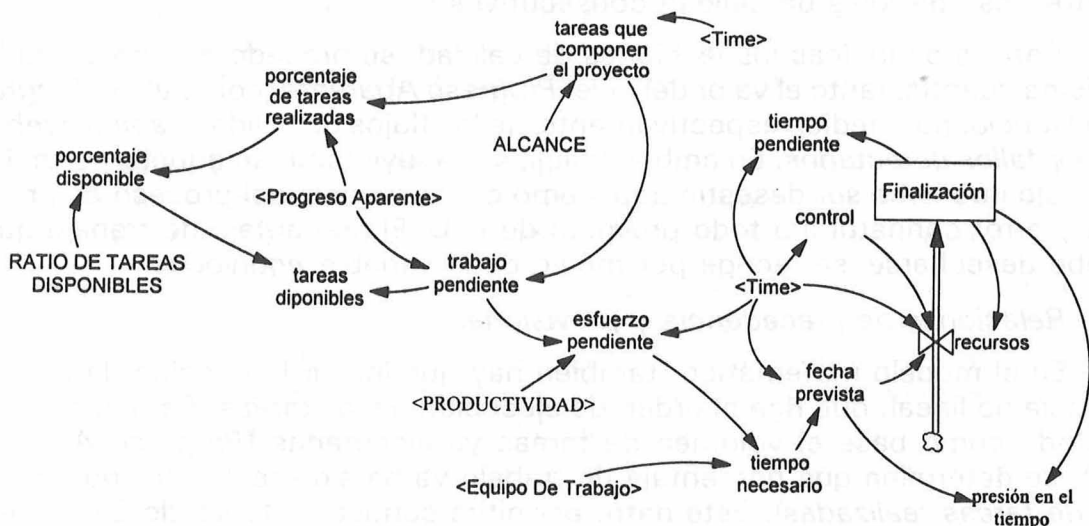
(18) Por esta razón, al nivel donde se acumulan las tareas que ya han sido realizadas se le denomina *Progreso Aparente*; pues contiene tareas que deben ser reelaboradas.

La cuantía del *trabajo pendiente*, se calcula como diferencia entre el valor de la variable *tareas que componen el proyecto* —cuyo valor se incrementa de 26.000 a 27.300 a lo largo del período de ejecución del proyecto— y el de la variable *Progreso Aparente*. Su valor se utiliza también, junto con el de la *PRODUCTIVIDAD*, para determinar el número de semanas que se precisarían, para que un único trabajador pudiera finalizar todo el trabajo (*esfuerzo pendiente*). A partir de este dato, se estimará el tiempo que se necesita, para finalizar el proyecto ($\text{tiempo necesario} = \text{esfuerzo pendiente} / \text{Equipo de trabajo}$).

Si a dicha estimación, se le suma el número de semanas que han transcurrido desde el inicio del proyecto, se obtiene como resultado, la fecha en que previsiblemente se finalizará el trabajo (*fecha prevista*). De la comparación de ésta última, con la oficialmente fijada (*Finalización*), se percibe fácilmente, si hay o no, un desfase temporal en la realización del proyecto y, por tanto, si existe o no, una premura de tiempo (*presión en el tiempo*).

En caso de existir tal presión temporal, ésta puede verse atenuada, mediante la modificación de la fecha oficialmente fijada para la finalización. No obstante, y tal y como ya se expuso al explicar el bucle de realimentación que recoge este hecho, existe una fuerte resistencia organizativa a modificar el calendario previsto de ejecución. De ahí, que sólo cuando la finalización del proyecto, no se haya pospuesto ya, más de 10 semanas, con relación a la fecha inicialmente prevista, se accederá a realizar el ajuste pertinente. Tal resistencia se recoge por medio de las variables *Time, control y recursos*.

**Gráfico 8
CONTROL DE LOS RECURSOS**



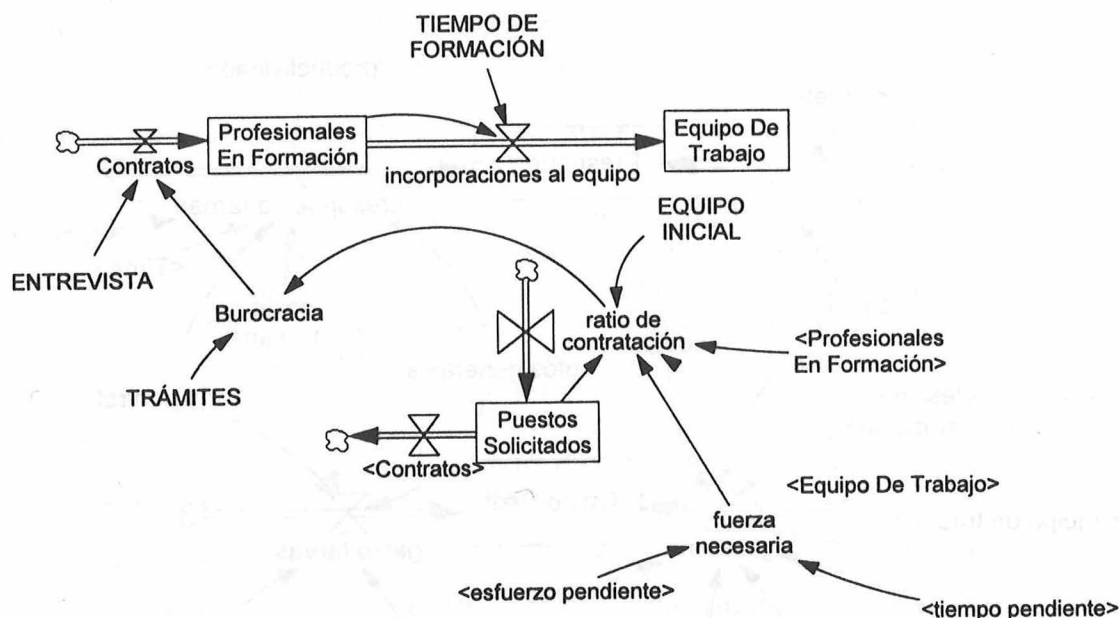
Política de Personal

Con relación a la política de personal, y tomando como base de partida, el tiempo que resta hasta la fecha para la finalización del proyecto (*tiempo pendiente*), y el *esfuerzo pendiente*, se procederá a calcular el número de personas que deberían integrar el equipo de desarrollo, para que el proyecto pudiera finalizarse en la fecha establecida ($\text{fuerza necesaria} = \text{esfuerzo pendiente} / \text{tiempo pendiente}$).

Si tal número supera al del tamaño actual del grupo de trabajo —al que debería sumársele los miembros que actualmente se encuentran en proceso de formación (*Profesionales en Formación*), y aquellas solicitudes de nuevas incorporaciones que se encuentran a la espera de autorización o en fase de selección (*Puestos Solicitados*)— y además, aún llevando a cabo la necesaria corrección, el número de miembros que llegan a integrar el equipo, no duplica al número inicial del mismo (*EQUIPO INICIAL*), se cursará la oportuna solicitud (*ratio de contratación*), para que se incorpore al grupo de trabajo, un número de personas igual a la diferencia, entre el número de trabajadores que serían necesarios para cumplir con el calendario de ejecución fijado, y el número de profesionales con que actualmente cuenta el equipo¹⁹.

Para proceder a la contratación externa de profesionales, será necesario, en primer lugar, obtener la oportuna autorización (*Burocracia*), y después llevar a cabo un proceso de selección. Ambas actividades consumen tiempo y, por tanto, retrasan el momento en el cual se producirá la deseada incorporación de nuevos profesionales a la empresa (*Contratos*). La cuantía de dicho retraso, viene determinada por la suma del valor de los parámetros *TRÁMITES* y *ENTREVISTA*²⁰. Los recién contratados, deberán someterse a un pro-

**Gráfico 9
GESTIÓN DEL PERSONAL**



(19) La ecuación que recoge esta política es:
 $ratio\ de\ contratación = IF\ THEN\ ELSE\ (fuerza\ necesaria > Equipo\ De\ Trabajo + Profesionales\ En\ Formación + Puestos\ Solicitados :AND: ((fuerza\ necesaria - Equipo\ De\ Trabajo) + Profesionales\ En\ Formación + Equipo\ De\ Trabajo + Puestos\ Solicitados) <= 2 * EQUIPO\ INICIAL, INTEGER\ ((fuerza\ necesaria - (Equipo\ De\ Trabajo + Profesionales\ En\ Formación + Puestos\ Solicitados))), 0)$

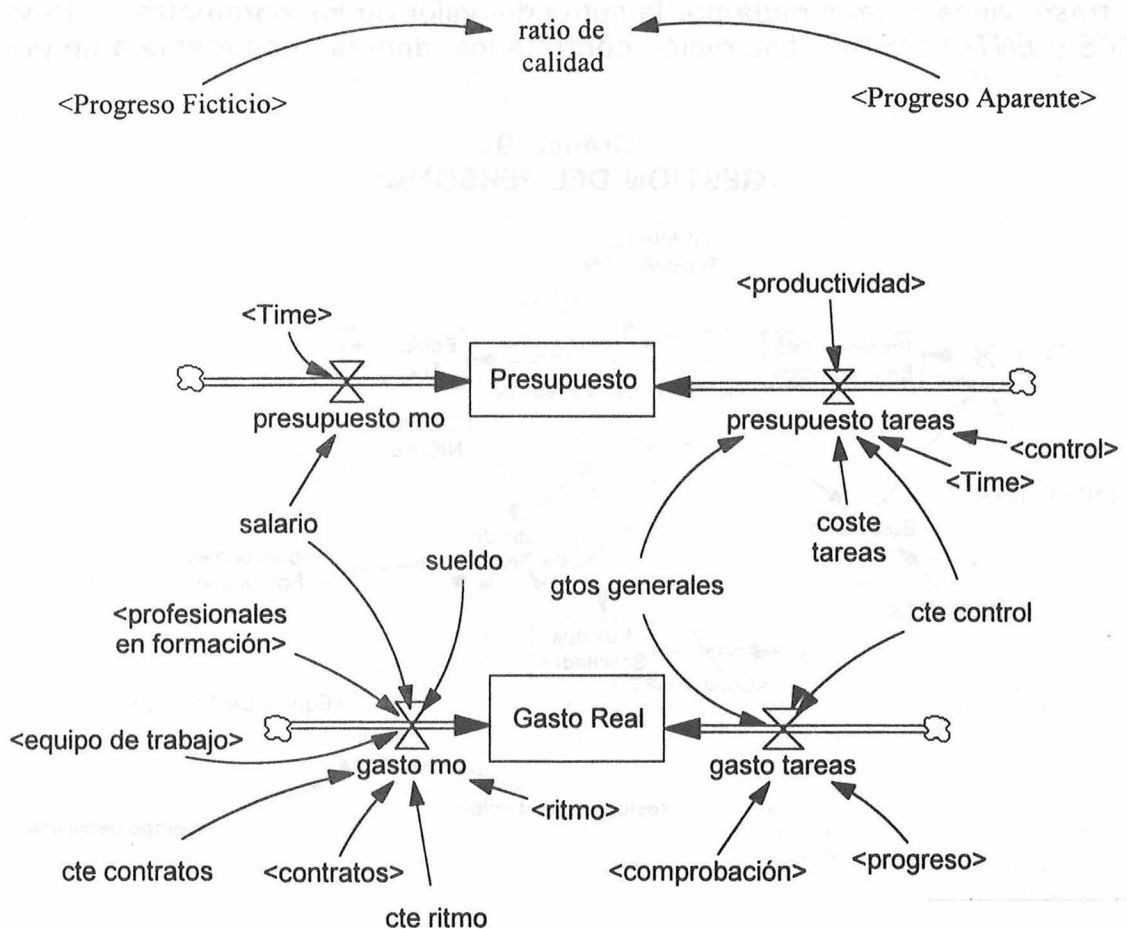
(20) En este modelo, el tiempo necesario para obtener la autorización es de 2 semanas, llevándose a cabo el proceso de selección a lo largo de 4 semanas.

ceso de formación técnica y de socialización (*Profesionales en Formación*), por espacio de dos semanas (*TIEMPO DE FORMACIÓN*), durante las que, progresivamente, se irán incorporando al equipo de desarrollo (*incorporaciones al equipo*).

Variables de Control

Finalmente, deberán establecerse una serie de variables de control, tanto sobre el nivel de calidad del proyecto (*ratio de calidad*) —calculado a partir del complementario del porcentaje de errores efectivamente cometidos—, como financieras, teniendo estas últimas por objeto, el poder comparar la magnitud de los recursos realmente invertidos en el proyecto, con relación a los inicialmente previstos para el mismo.

Gráfico 10
CALIDAD Y RECURSOS FINANCIEROS



Una vez establecidas las ecuaciones que configuran el modelo, tan sólo resta proceder a simular el comportamiento de éste; pudiendo constatarse así, cómo debido a la connatural incertidumbre de los proyectos de investigación y desarrollo, así como a la aplicación de una serie de medidas —mediante las que se intentaba ajustar la evolución del trabajo, a los planes inicialmente establecidos—, se incumple el objetivo tridimensional fijado para el proyecto;

Cuadro 1
RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Sobredimensión Temporal	17%
Nivel de calidad	99%
Sobredimensión Financiera	62,68%

Fuente: Elaboración Propia.

tal y como lo demuestra la existencia de una sobredimensión temporal y financiera, y la ausencia de calidad total —un nivel de calidad inferior al 100%—.

El incumplimiento de estos tres objetivos, repercutirá tanto sobre la rentabilidad del proyecto —se han empleado más recursos financieros de los previstos, pudiendo además, como consecuencia del retraso en la ejecución del proyecto, haberse adelantado un competidor en el lanzamiento al mercado del nuevo producto—, como sobre el riesgo de aceptación de la innovación por parte del mercado —con la calidad de diseño y desarrollo de un nuevo producto, ocurre lo mismo que con la calidad del servicio: «o es total o no existe»; pues el más mínimo de defecto en esta actividad, provoca una producción defectuosa al 100%—.

Sin embargo, y como gracias a la utilización de la dinámica de sistemas, es posible conocer, no sólo el grado de cumplimiento de cada una de las tres dimensiones del objetivo que debe presidir la realización de todo proyecto de I+D, sino también, cuáles son las causas de las disfunciones percibidas en dicha ejecución, se podrán testar una serie de políticas alternativas, en orden a conseguir unos mejores resultados.

Así por ejemplo, mediante la simulación efectuada con el modelo, se percibe cómo la deficiencia en la calidad, se debe al hecho de que el porcentaje de tareas correctamente realizadas, nunca llega a alcanzar el nivel del 100%; siendo esto debido, a la existencia de la premura temporal, que se intenta paliar, incrementando el ritmo de trabajo. Esto, —tal y como se expuso al comentar el bucle que recoge la influencia del tiempo en la ejecución de las actividades (gráfico 5)—, produce un menoscabo en la calidad de realización de las tareas, debido a la relación existente, entre el porcentaje de tareas correctamente realizadas y el mayor ritmo de trabajo.

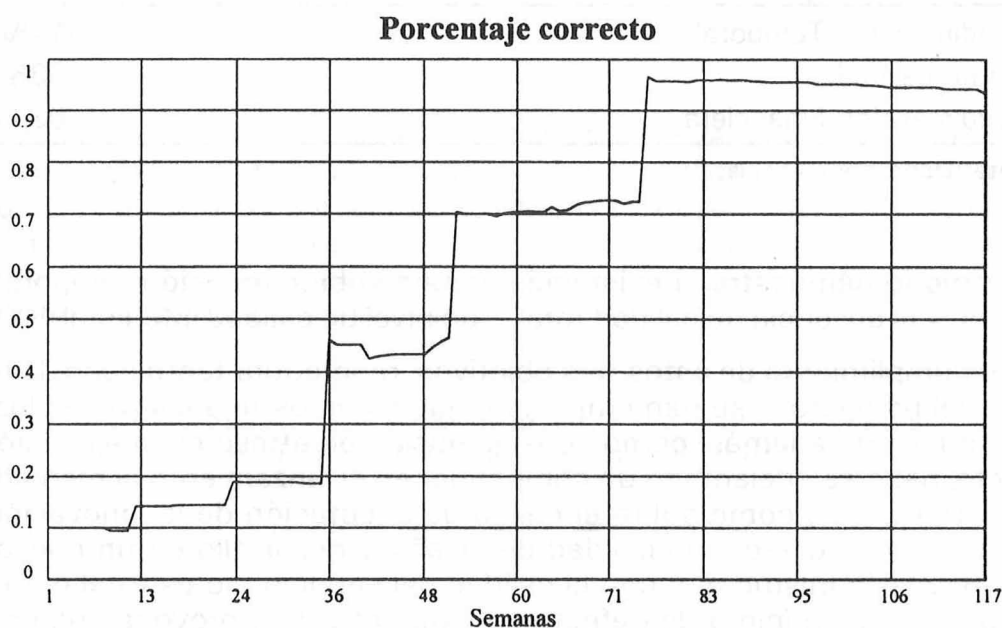
$$\text{porcentaje correcto} = \text{ratio de satisfacción}^{21} (\text{Time}) * (1/\text{ritmo})$$

De no existir ese incremento en el ritmo de trabajo, el porcentaje de tareas correctamente realizadas, seguiría una evolución idéntica a la de la variable *ratio de satisfacción* —gráfico 12—; es decir, a partir de la semana 76, no se cometerían errores en la realización de las tareas.

Si se convierte a la variable *ritmo*, en un parámetro —se le hace que asuma el valor 1 a lo largo de toda la ejecución del proyecto—; es decir, haciendo

(21) Esta es una variable que recoge la evolución que seguiría la calidad de ejecución a lo largo del desarrollo del proyecto, de no existir un fuerte ritmo de trabajo.

Gráfico 11
PORCENTAJE DE TAREAS CORRECTAMENTE REALIZADAS



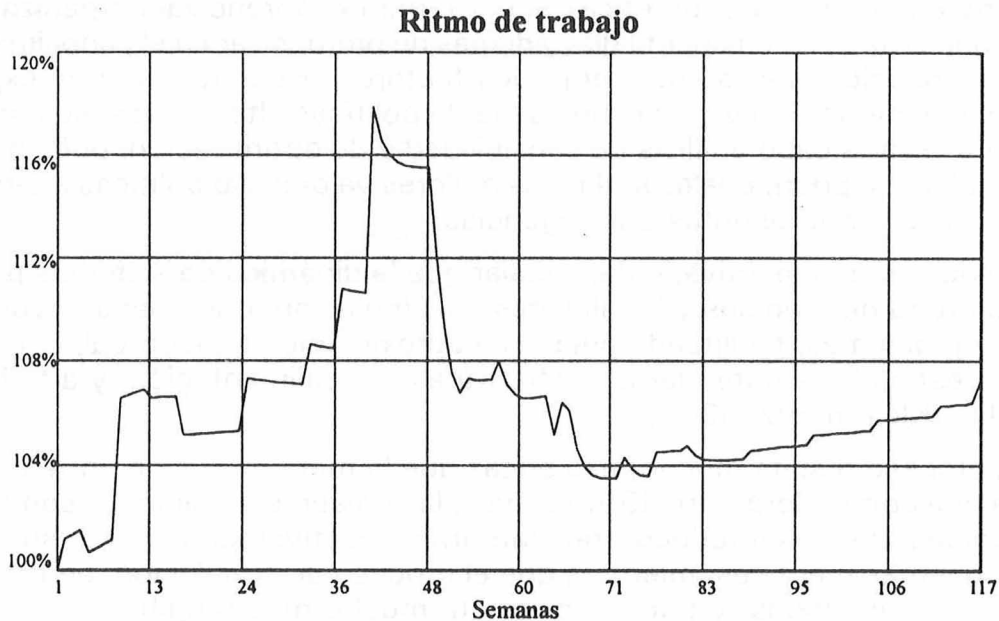
que el modelo recoja cómo la existencia de una premura temporal, no repercute en un mayor ritmo de trabajo; y se procede a llevar a cabo una nueva simulación con el modelo, se puede conocer, cual sería el efecto que esta medida, tendría sobre el resultado final del proyecto.

Sorprendentemente, y tal y como se recoge en el cuadro 2, aún y cuando no se logre cumplir plenamente con el objetivo tridimensional fijado pa-

Gráfico 12
EVOLUCIÓN DEL RATIO DE SATISFACCIÓN



Gráfico 13
RITMO DE TRABAJO A LO LARGO DEL PROYECTO



ra el proyecto —nivel de calidad del 100%, e inexistencia de sobredimensión temporal y financiera—, los resultados mejoran sensiblemente con relación a la calidad —100%—, y a la sobredimensión financiera —se ve reducida un 7,3%—, sin que por ello, se vea incrementada la sobredimensión temporal.

Cuadro 2
RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Sobredimensión Temporal	17%
Nivel de calidad	100%
Sobredimensión Financiera	55,38%

Fuente: Elaboración Propia.

3. CONCLUSIONES

Así pues, y si bien la incertidumbre connatural a todo proyecto de investigación y desarrollo, no puede ser nunca totalmente eliminada, cabe indicar que una planificación y gestión flexible de éstos, permitirá una rápida corrección de cualquier disfunción que surja a lo largo del desarrollo del proyecto.

El empleo de la dinámica de sistemas, contribuye a este objetivo; ya que a través de la construcción del modelo, es posible profundizar en el conocimiento de los diversos aspectos y factores implicados en el diseño y desarrollo de un nuevo producto, pudiendo además, por medio de la realización de distintas simulaciones con el modelo, observar y analizar las consecuencias

que, tanto ciertas contingencias imprevistas, como las medidas aplicadas para paliar éstas, tendrían sobre el desarrollo del proyecto y su resultado final.

Constituye por tanto, un eficaz soporte para el aprendizaje organizativo; sobre todo si se tiene en cuenta que, además de profundizar en el conocimiento sobre las relaciones existentes entre los factores involucrados, y de experimentar, con carácter reversible, una serie de políticas alternativas, su empleo permitirá llevar a cabo análisis de sensibilidad y de optimización; pudiéndose así establecer a priori, cuáles serían los mejores valores y/o políticas alternativas a aplicar, ante distintas contingencias.

Desde esta perspectiva, cabe señalar que la dinámica de sistemas posee un rico grupo de modelos y habilidades de simulación, que pueden ayudar a resolver problemas, facilitando pues, una aproximación conceptual, que ayuda al investigador a entender las estructuras de realimentación, y a trabajar con ellas (Kleinmuntz, 1993).

Tal proceso resulta mucho más eficaz que la mera discusión entre expertos; ya que como Morecroft (1992) señala, las palabras y opiniones son fugaces sonidos, que los interlocutores capturan selectivamente según sus propios esquemas mentales; mientras que el proceso de simulación, permite visualizar los resultados, y por tanto resulta mucho más tangible.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bohn, R. E. (1994): «Measuring and managing technological knowledge», *Sloan Management Review*, otoño, pp. 61-73.
- Eden, C. (1994): «Cognitive mapping and problem structuring for system dynamics model building», *System Dynamics Review*, Vol. 10, No. 2-3, verano-otoño, pp. 257-276.
- Forrester, J. W. (1997): «Políticas, decisiones y fuentes de información para la elaboración de modelos», *Revista Asturiana de Economía*, N.º 10.
- García Rodríguez, R. (1997): «Aprendizaje de la organización, juegos de empresa y dinámica de sistemas», *Revista Asturiana de Economía*, N.º 10.
- González-Busto Múgica, B. (1997): «Introducción a un modelo de simulación para la gestión de listas de espera en centros hospitalarios», *Revista Asturiana de Economía*, N.º 10.
- Homer, J. B. (1986): «Why we iterate: scientific modeling in theory and practice», *System Dynamics Review*, Vol. 12, No. 1, primavera, pp. 1-19.
- Kleinmuntz, D. N. (1993): «Information processing and misperceptions of the implications of feedback in dynamic decision making», *System Dynamics Review*, Vol. 9, No. 3, otoño, pp. 223-237.
- Milling, P. M. (1996): «Modeling innovation processes for decision support and management simulation», *System Dynamics Review*, Vol. 12, No. 3, otoño, pp. 211-234.
- Morecroft, J. D. W. (1992): «Executive knowledge, models and learning», *European Journal of Operational Research*, No. 59, pp. 9-27.

- Pawson, R., Bravard, J. L. y Cameron, L. (1995): «The case for expressive systems», *Sloan Management Review*, invierno, pp. 41-48.
- Prahalad, C. k. y Hamel, G. (1990): «The core competence of the Corporation». *Harvard Business Review*, My-Jn, pp. 79-91.
- Rosenau, M. D. Jr. y Morán, J. J. (1993): *Managing the Development of New Products*. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Stacey, R. D. (1994): *Gestión del Caos*. Eds. S, Barcelona.
- Stacey, R. D. (1995): «The science of complexity: An alternative perspective for strategic change processes», *Strategic Management Journal*, Vol. 16, pp. 477-495.
- Stout, R. (1980): *Management or Control?* Indiana University Press, Bloomington & London.

ABSTRACT

This article synthesises the reason that justify the use of system dynamics in the planning and management of research and development projects, considering that even if its use does not manage to completely eliminate the uncertainty natural to this type of activity, it does allow obvious mistakes to be eliminated, at the same time that it establishes an assessment of the inherent risks of the identifiable uncertainties. This is due to the fact that its use obliges the members of the development team to confront an actual test that will challenge them to think of the project with the sufficient amount of detail so as to determine the proper course which would allow them to complete the job satisfactorily. Likewise, and by means of a limited example, it will be explained how it is possible to collect the most important aspects involved in the design and development process of a new product in a simulation model. In this way, it will be possible to glimpse at, through the different simulations that are performed with the model, the process of evolution that the project follows as well as the consequences that certain management measures to be implanted would have on it.

Key words: system dynamics, project management, R+D.