



Concepción Maroto  
Javier Alcaraz  
Concepción Ginestar  
Marina Segura

# **INVESTIGACIÓN OPERATIVA EN ADMINISTRACIÓN Y DIRECCIÓN DE EMPRESAS**

**EDITORIAL  
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA**

Para citar esta publicación utilice la siguiente referencia bibliográfica:

Maroto, C., Alcaraz, J., Ginestar, C. y Segura M. (2012). *Investigación operativa en administración y dirección de empresas*. Valencia : Editorial Universitat Politècnica.

Primera edición, 2012

- © Concepción Maroto  
Javier Alcaraz  
Concepción Ginestar  
Marina Segura
- © diseño de portada : Carmen Lloret
- © de la presente edición:  
Editorial Universitat Politècnica de València  
[www.editorial.upv.es](http://www.editorial.upv.es)

*Distribución:* pedidos@editorial.upv.es  
Tel. 96 387 70 12

Imprime: By print percom sl.

ISBN: 978-84-8363-899-6  
Impreso bajo demanda  
Ref. editorial: 828

Queda prohibida la reproducción, distribución, comercialización, transformación, y en general, cualquier otra forma de explotación, por cualquier procedimiento, de todo o parte de los contenidos de esta obra sin autorización expresa y por escrito de sus autores.

Impreso en España

A nuestros alumnos de Administración y Dirección de Empresas para que el aprendizaje de la Investigación Operativa les ayude a tomar mejores decisiones en su actividad profesional.

A la Facultad de Administración y Dirección de Empresas de la Universitat Politècnica de València por su apoyo a este libro y a la docencia de la Investigación Operativa.



# ÍNDICE

<b>TEMA 1. NATURALEZA Y METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN OPERATIVA .....</b>	<b>11</b>
<b>1.1. ORIGEN Y EVOLUCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN OPERATIVA .....</b>	<b>13</b>
<b>1.2. NATURALEZA DE LA INVESTIGACIÓN OPERATIVA .....</b>	<b>14</b>
<b>1.3. APLICACIONES .....</b>	<b>17</b>
<b>1.4. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN OPERATIVA .....</b>	<b>21</b>
1.4.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	21
1.4.2. MODELIZACIÓN.....	23
1.4.3. IMPLANTACIÓN.....	29
1.4.4. DATOS.....	32
<b>1.5. RESUMEN .....</b>	<b>33</b>
<b>1.6. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>33</b>
<b>TEMA 2. FORMULACIÓN Y RESOLUCIÓN DE MODELOS DE PROGRAMACIÓN LINEAL: CONCEPTOS BÁSICOS ...</b>	<b>35</b>
<b>2.1. EL PROBLEMA: UN EJEMPLO DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA Y CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN .....</b>	<b>37</b>
<b>2.2. EL MODELO: VARIABLES, FUNCIÓN OBJETIVO Y RESTRICCIONES .....</b>	<b>38</b>
2.2.1. VARIABLES: HIPÓTESIS DE DIVISIBILIDAD Y NO NEGATIVIDAD .....	38
2.2.2. FUNCIÓN OBJETIVO Y RESTRICCIONES: HIPÓTESIS DE LINEALIDAD.....	40
2.2.3. FORMULACIÓN GENERAL DE UN PROGRAMA LINEAL: HIPÓTESIS DE CERTIDUMBRE .....	44
<b>2.3. REGIÓN FACTIBLE Y SOLUCIÓN GRÁFICA .....</b>	<b>45</b>
<b>2.4. VARIABLES DE HOLGURA .....</b>	<b>47</b>
<b>2.5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD .....</b>	<b>48</b>
2.5.1. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS COEFICIENTES DE LA FUNCIÓN OBJETIVO.....	48
2.5.2. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS SEGUNDOS MIEMBROS DE LAS RESTRICCIONES .....	50
<b>2.6. AMPLIACIÓN DEL PROBLEMA: UNA NUEVA VARIABLE .....</b>	<b>52</b>
<b>2.7. RESOLUCIÓN DE MODELOS DE PROGRAMACIÓN LINEAL CON HOJAS DE CÁLCULO .....</b>	<b>54</b>
<b>2.8. RESOLUCIÓN DE MODELOS DE PROGRAMACIÓN LINEAL CON SOFTWARE DE OPTIMIZACIÓN .....</b>	<b>56</b>
<b>2.9. CONSTRUCCIÓN DE MODELOS: ALGUNOS EJEMPLOS .....</b>	<b>59</b>
2.9.1. ERRORES FRECUENTES EN LA CONSTRUCCIÓN DE MODELOS.....	59
2.9.2. ALGUNOS MODELOS DE PROGRAMACIÓN LINEAL .....	60

<b>2.10. RESUMEN</b> .....	64
<b>2.11. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	64
<b>2.12. CASOS PRÁCTICOS</b> .....	65
<b>TEMA 3. MÉTODOS GENERALES DE PROGRAMACIÓN LINEAL</b> .....	73
<b>3.1. CONCEPTOS BÁSICOS: PUNTOS EXTREMOS Y SOLUCIONES BÁSICAS</b> .....	75
<b>3.2. EL MÉTODO SIMPLEX</b> .....	79
3.2.1. <i>CONCEPTOS GENERALES</i> .....	79
3.2.2. <i>EL MÉTODO SIMPLEX MEDIANTE ECUACIONES SIMULTÁNEAS</i> .....	79
3.2.3. <i>CRITERIOS DEL MÉTODO SIMPLEX: VARIABLE QUE ENTRA Y VARIABLE QUE SALE DE LA BASE</i> .....	82
3.2.4. <i>TABLEAU SIMPLEX</i> .....	85
<b>3.3. SOLUCIÓN BÁSICA FACTIBLE INICIAL Y LAS VARIABLES ARTIFICIALES: EL MÉTODO DE LAS DOS FASES</b> .....	89
<b>3.4. ALGORITMO DEL SIMPLEX CON VARIABLES ACOTADAS</b> .....	93
3.4.1. <i>TÉCNICA DE LA COTA INFERIOR</i> .....	93
3.4.2. <i>TÉCNICA DE LA COTA SUPERIOR</i> .....	97
<b>3.5. EL MÉTODO SIMPLEX REVISADO, EL ALGORITMO DEL PUNTO INTERIOR Y EL SOFTWARE DE OPTIMIZACIÓN</b> .....	103
<b>3.6. RESUMEN</b> .....	106
<b>3.7. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	107
<b>3.8. CASOS PRÁCTICOS</b> .....	108
<b>TEMA 4. DUALIDAD Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD</b> .....	115
<b>4.1. EL PROBLEMA DUAL Y LAS RELACIONES DE DUALIDAD</b> .....	117
4.1.1. <i>EL PROGRAMA PRIMAL Y EL PROGRAMA DUAL</i> .....	117
4.1.2. <i>RELACIONES DE DUALIDAD</i> .....	118
<b>4.2. EL ALGORITMO DUAL DEL SIMPLEX</b> .....	120
<b>4.3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS COEFICIENTES DE LA FUNCIÓN OBJETIVO</b> .....	123
4.3.1. <i>MODIFICACIÓN DE UN <math>C_j</math> CORRESPONDIENTE A UNA VARIABLE NO BÁSICA</i> .....	124
4.3.2. <i>MODIFICACIÓN DE UN <math>C_j</math> CORRESPONDIENTE A UNA VARIABLE BÁSICA</i> .....	125
4.3.3. <i>MODIFICACIONES SIMULTÁNEAS DE VARIOS COEFICIENTES</i> .....	125
<b>4.4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS SEGUNDOS MIEMBROS DE LAS RESTRICCIONES</b> .....	127
<b>4.5. PROGRAMACIÓN LINEAL PARAMÉTRICA</b> .....	130
<b>4.6. RESUMEN</b> .....	132
<b>4.7. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	132
<b>4.8. CASOS PRÁCTICOS</b> .....	133

<b>TEMA 5. PROGRAMACIÓN ENTERA</b> .....	141
<b>5.1. INTRODUCCIÓN</b> .....	143
<b>5.2. UN PROBLEMA ENTERO SENCILLO PARA DESCONFIAR DE REDONDEOS</b> .....	144
<b>5.3. APLICACIONES DE PROGRAMACIÓN ENTERA</b> .....	146
5.3.1. <i>PROGRAMACIÓN DE INVERSIONES</i> .....	147
5.3.2. <i>PROBLEMAS CON COSTES FIJOS</i> .....	148
5.3.3. <i>PROBLEMAS DE LOCALIZACIÓN DE INDUSTRIAS Y SERVICIOS</i> .....	150
5.3.4. <i>UN PROBLEMA DE DISTRIBUCIÓN CON COSTES NO LINEALES</i> .....	151
5.3.5. <i>UN PROBLEMA DE RUTAS DE TRANSPORTE</i> .....	156
5.3.6. <i>OTRAS POSIBILIDADES DE FORMULACIÓN CON VARIABLES BINARIAS</i> .....	158
<b>5.4. TÉCNICAS DE PROGRAMACIÓN ENTERA: ALGORITMOS DE RAMIFICACIÓN Y ACOTACIÓN</b> .....	160
5.4.1. <i>INTRODUCCIÓN</i> .....	160
5.4.2. <i>RESOLUCIÓN GRÁFICA</i> .....	161
5.4.3. <i>CRITERIOS DE SELECCIÓN DEL NODO</i> .....	167
<b>5.5. LAS TÉCNICAS DE RAMIFICACIÓN Y ACOTACIÓN Y EL SOFTWARE DE OPTIMIZACIÓN</b> .....	170
<b>5.6. RESUMEN</b> .....	172
<b>5.7. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	172
<b>5.8. CASOS PRÁCTICOS</b> .....	173
<b>TEMA 6. PROGRAMACIÓN MULTIOBJETIVO</b> .....	181
<b>6.1. CONCEPTOS BÁSICOS: OBJETIVOS, METAS Y CRITERIOS</b> .....	183
<b>6.2. PROGRAMACIÓN MULTIOBJETIVO</b> .....	184
6.2.1. <i>MÉTODO DE LAS RESTRICCIONES</i> .....	188
6.2.2. <i>MÉTODO DE LAS PONDERACIONES</i> .....	189
6.2.3. <i>OTRAS TÉCNICAS MULTIOBJETIVO</i> .....	190
<b>6.3. PROGRAMACIÓN POR METAS</b> .....	190
6.3.1. <i>ESTRUCTURA GENERAL DE UN MODELO DE P. METAS</i> .....	190
6.3.2. <i>PROGRAMACIÓN POR METAS PONDERADAS</i> .....	193
6.3.3. <i>PROGRAMACIÓN POR METAS CON PRIORIDADES</i> .....	195
<b>6.4. RESUMEN</b> .....	199
<b>6.5. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	199
<b>6.6. CASOS PRÁCTICOS</b> .....	200
<b>TEMA 7. TÉCNICAS DE DECISIÓN MULTICRITERIO DISCRETAS</b> .....	207
<b>7.1. EL MÉTODO DE LAS JERARQUÍAS ANALÍTICAS</b> .....	209
7.1.1. <i>INTRODUCCIÓN</i> .....	209
7.1.2. <i>CONSTRUCCIÓN DE JERARQUÍAS</i> .....	210

7.1.3. ESTABLECIMIENTO DE PRIORIDADES.....	211
7.1.4. CONSISTENCIA LÓGICA.....	215
7.1.5. SOFTWARE.....	218
<b>7.2. EL MÉTODO PROMETHEE .....</b>	<b>222</b>
7.2.1. INTRODUCCIÓN.....	222
7.2.2. INFORMACIÓN PARA MODELIZAR LAS PREFERENCIAS.....	225
7.2.3. PROMETHEE I Y II.....	228
<b>7.3. TOMA DE DECISIONES COLABORATIVA .....</b>	<b>236</b>
<b>7.4. RESUMEN.....</b>	<b>237</b>
<b>7.5. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>238</b>
<b>7.6. CASOS PRÁCTICOS.....</b>	<b>239</b>
<b>TEMA 8. PROGRAMACIÓN NO LINEAL.....</b>	<b>243</b>
<b>8.1. INTRODUCCIÓN: CONCEPTOS PREVIOS.....</b>	<b>245</b>
<b>8.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN NO LINEAL .....</b>	<b>248</b>
<b>8.3. ALGUNAS APLICACIONES.....</b>	<b>249</b>
8.3.1. DETERMINACIÓN DEL INTERVALO DE TIEMPO ENTRE AJUSTES DE UNA MÁQUINA.....	249
8.3.2. PLANIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN .....	250
8.3.3. ALGUNAS IDEAS SOBRE LOS MÉTODOS DE PROGRAMACIÓN NO LINEAL.....	252
<b>8.4. CARTERAS EFICIENTES DE INVERSIÓN EN VALORES.....</b>	<b>255</b>
8.4.1. MODELO DE MARKOWITZ.....	255
8.4.2. MODELO DE MERCADO DE SHARPE.....	260
<b>8.5. RESUMEN.....</b>	<b>264</b>
<b>8.6. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>264</b>
<b>8.7. CASOS PRÁCTICOS.....</b>	<b>264</b>
<b>TEMA 9. TÉCNICAS METAHEURÍSTICAS: ALGORITMOS GENÉTICOS.....</b>	<b>267</b>
<b>9.1. ALGORITMOS GENÉTICOS .....</b>	<b>269</b>
9.1.1. CODIFICACIÓN DE LAS SOLUCIONES .....	272
9.1.2. FUNCIÓN DE EVALUACIÓN .....	273
9.1.3. SELECCIÓN .....	273
9.1.4. CRUCE.....	276
9.1.5. MUTACIÓN .....	281
9.1.6. APLICACIONES: EL PROBLEMA DEL VIAJANTE .....	282
<b>9.2. TABU SEARCH .....</b>	<b>291</b>
<b>9.3. SIMULATED ANNEALING.....</b>	<b>294</b>
<b>9.4. RESUMEN.....</b>	<b>297</b>
<b>9.5. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>297</b>
<b>9.6. CASOS PRÁCTICOS.....</b>	<b>298</b>

---

<b>ANEXO 1. SOLVER DE LA HOJA DE CÁLCULO EXCEL</b> .....	301
<i>A1.1. FORMULACIÓN DE UN MODELO DE OPTIMIZACIÓN</i> .....	303
<i>A1.2. RESOLUCIÓN DE UN MODELO DE PROGRAMACIÓN LINEAL</i> .....	306
<i>A1.3. RESOLUCIÓN DE OTROS TIPOS DE MODELOS</i> .....	312
<i>A1.4. CONSTRUIR BUENOS MODELOS EN HOJAS DE CÁLCULO</i> .....	313
<b>ANEXO 2. SOFTWARE DE MODELIZACIÓN Y OPTIMIZACIÓN:</b>	
<b>LINGO</b> .....	317
<i>A2.1. PRESTACIONES DE LINGO</i> .....	319
<i>A2.2. DEFINICIÓN Y RESOLUCIÓN DE MODELOS</i> .....	320
<i>A2.3. LENGUAJE DE MODELIZACIÓN</i> .....	322
<i>A2.4. TIPOS DE VARIABLES: ACOTADA, LIBRE, ENTERA Y BINARIA</i> .....	326
<i>A2.5. MENÚS: FILE, EDIT, LINGO, WINDOW Y HELP</i> .....	327
<i>A2.6. FUNCIONES</i> .....	331
<b>ANEXO 3. SOFTWARE MULTICRITERIO PARA LA TOMA DE</b>	
<b>DECISIONES COLABORATIVA</b> .....	333
<i>A3.1. MODELIZACIÓN: DISEÑO DE LA JERARQUÍA DE DECISIÓN</i> .....	335
<i>A3.2. MÉTODOS MULTICRITERIO</i> .....	336
<i>A3.3. TOMA DE DECISIONES COLABORATIVA</i> .....	338
<i>A3.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS</i> .....	339



# TEMA 1

## NATURALEZA Y METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN OPERATIVA

<b>1.1. ORIGEN Y EVOLUCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN OPERATIVA</b> ...	13
<b>1.2. NATURALEZA DE LA INVESTIGACIÓN OPERATIVA</b> .....	14
<b>1.3. APLICACIONES</b> .....	17
<b>1.4. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN OPERATIVA</b> .....	21
<i>1.4.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA</i> .....	21
<i>1.4.2. MODELIZACIÓN</i> .....	23
<i>1.4.3. IMPLANTACIÓN</i> .....	29
<i>1.4.4. DATOS</i> .....	32
<b>1.5. RESUMEN</b> .....	33
<b>1.6. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	33



En este capítulo veremos en primer lugar el origen y evolución de la Investigación Operativa, que debemos conocer para entender su interés en los estudios de administración y dirección de empresas. Dado que no existe una definición de Investigación Operativa, generalmente aceptada, recogemos varias propuestas en el apartado segundo, tratando de reflejar tanto la visión clásica como otras más actuales de la disciplina. En el apartado tercero describiremos la metodología de la Investigación Operativa, analizando con detalle las fases de formulación del problema, modelización e implantación. Por último, veremos algunas aplicaciones en administración y dirección de empresas.

## 1.1. ORIGEN Y EVOLUCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN OPERATIVA

Fue en Inglaterra donde se utilizó por primera vez el nombre “Investigación Operativa” (*Operational Research*), cuando se creó en 1936 en la RAF un grupo de científicos con el fin de estudiar cómo operar con el radar, que se denominó Sección de Investigación Operativa por estar relacionado más con las operaciones del nuevo equipo que con el desarrollo del mismo. El éxito de esta primera sección fue tal que al finalizar la Segunda Guerra Mundial otras naciones aliadas disponían de grupos de apoyo similares para la toma de decisiones en sus operaciones militares (Keys, 1995). Sin embargo, Kirby (2000) sitúa el nacimiento formal de la Investigación Operativa en 1938.

El impacto positivo de la Investigación Operativa durante la Segunda Guerra Mundial propició su introducción posterior en el sector industrial y en el comercial a ambos lados del Atlántico. En Inglaterra se concentró en dos industrias, la minería del carbón y la industria del hierro y el acero. Paradójicamente la enseñanza de la Investigación Operativa empezó antes en Estados Unidos que en Inglaterra. Fue en EEUU donde se escribió el primer libro de texto: Churchman, C. W., R.L. Ackoff y E.L. Arnoff (1957): *Introduction to Operations Research*. John Wiley. New York. Así en los años 60 la industria americana fue receptiva a las técnicas de la Investigación Operativa debido a la formación de sus gestores (Kirby, 2000).

Debemos decir que estos orígenes de la Investigación Operativa representan la historia oficial mayoritariamente aceptada. Otros autores como el profesor Bueno (1971) completan esta visión y creen que hay tres cauces básicos que influyeron en la aparición de la Investigación Operativa: los modelos económicos, las operaciones militares y las matemáticas. Así encuentra antecedentes, entre otros, en el modelo de equilibrio general de Walras en el que plantea con un sistema de ecuaciones lineales el equilibrio de la producción, en el Tableau Économique de Quesnay (1758) y en las tablas Input-Output de Leontiev (1936). Por otra parte, la relevancia de la Investigación Operativa en el pensamiento económico del último siglo se pone de manifiesto en que un buen número de Premios Nobel de Economía (empezaron en 1969) corresponden a autores que han trabajado en programación lineal y otras técnicas cuantitativas como la programación no lineal y la teoría de juegos. Entre estos los premios Nobel podemos citar a Samuelson (1970), Leontiev (1973), Kantorovich (1975), Simon (1978), Solow

(1987), Markowich y Sharpe (1990), Selten, Nash y Harsanyi (1994), Aumann (2005) y Hurwicz (2007).

Keys (1995) considera el periodo 1945-1975 como un periodo de crecimiento y estabilidad, que denomina la “Edad de Oro” de la Investigación Operativa clásica. En esta etapa la Investigación Operativa es un apoyo a la gestión en la industria y otras organizaciones, se crean sociedades profesionales y se implantan programas académicos en las universidades.

El trabajo histórico realizado por Kirby (2000) destaca la rápida difusión de las técnicas de Investigación Operativa después de la revolución de las tecnologías de la información y las comunicaciones de los años 80. Así a primeros de los 90 se disponía ya de códigos de programación lineal y no lineal en las hojas de cálculo, cuyas prestaciones actuales han mejorado mucho. Esta situación de la Investigación Operativa ofrece nuevos retos y oportunidades para la administración y dirección de empresas. Por ejemplo, ahora millones de usuarios de Microsoft Excel pueden crear y resolver modelos que permiten mejorar la toma de decisiones empresariales, a nivel operativo, táctico y estratégico. Adicionalmente, las técnicas de Investigación Operativa son y seguirán siendo parte integrante de las aplicaciones de ayuda a la toma de decisiones conocidas como *Decision Support System (DSS)* y de los *sistemas expertos*.

## **1.2. NATURALEZA DE LA INVESTIGACIÓN OPERATIVA**

Desde sus orígenes la Investigación Operativa no ha tenido una definición precisa generalmente aceptada y a lo largo de su evolución se ha debatido ampliamente sobre su metodología. Ackoff y Sasieni (1979) definen la Investigación Operativa como “la aplicación del **método científico** mediante equipos interprofesionales a los problemas de gobierno de sistemas organizados para proporcionar soluciones que sirvan lo mejor posible a la organización considerada como un todo”. Las principales características de la Investigación Operativa puestas de manifiesto en esta definición, ya aparecen en el primer libro de texto de la materia publicado en 1957. Concretamente el énfasis en el método científico, los **equipos interdisciplinarios**, la ayuda a la toma de decisiones, obtención de la **mejor solución** y el **enfoque global**.

Para Assad, Wasil y Lilien (1992) la Investigación Operativa –Operations Research/Management Science (OR/MS)- es la aplicación del método científico a la toma de decisiones o a profesiones que abordan la mejor manera de diseñar y operar con los sistemas, normalmente en condiciones donde se requiere la asignación de recursos escasos.

Keys (1995) considera que la Investigación Operativa es una **tecnología**. La Investigación Operativa utiliza los métodos científicos en los que basa su trabajo de observación, modelización, pensamiento, experimentación y medios de investigación lógicos y sistemáticos. Sin embargo, no utiliza estos métodos con el mismo propósito

que la ciencia. La ciencia es descriptiva, la Investigación Operativa prescriptiva. El objetivo de la Investigación Operativa es **proporcionar información** y diseñar medios de mejorar la efectividad de las organizaciones.

Las dos características básicas de la **tecnología** vista desde este nuevo modelo son sus **objetivos** y sus métodos. El objetivo de la Investigación Operativa es la producción de información sobre los sistemas que puede permitir **mejorar la efectividad de la organización**. Los **métodos** utilizados para producir esta información son de **carácter científico**. Es decir, están basados en medidas, análisis y validación más que en gustos, intuiciones y juicios. Si consideramos que la tecnología se encarga de diseñar sistemas, tanto físicos como abstractos, la **Investigación Operativa es una tecnología que diseña sistemas abstractos** que consisten en información que es útil para la planificación, organización, control y otras actividades necesarias para las operaciones de una organización.

Para Keys, la **Investigación Operativa es una tecnología que diseña sistemas abstractos, por medios científicos, para mejorar la efectividad de las organizaciones**. Las implicaciones para la enseñanza de la Investigación Operativa son que ésta debe tener dos componentes. Por una parte, se debe enseñar mediante medios formales los modos de trabajo, tales como el análisis cuantitativo y la aplicación de métodos científicos. Y por otra, hay que completar esta educación con la aplicación de las habilidades anteriores a problemas reales. Este enfoque es el que consideramos adecuado para la enseñanza y el aprendizaje de la Investigación Operativa en los estudios de Administración y Dirección de Empresas.

Robinson (2000) define la Investigación Operativa como la aplicación del método científico para mejorar la efectividad de las operaciones, las decisiones y la gestión. Robinson considera que uno de los motivos por los que la disciplina se ha mantenido invisible o visible, pero mal interpretada es porque se ha practicado bajo diversas denominaciones. Además de **Operations Research**, se han utilizado los nombres casi sinónimos de **Management Science** -Ciencia de la Administración-, **Decision Technology**, **Decision Support**, **Police Science**, **Systems Analysis** (con aplicaciones relativas a gestión y decisiones), **Management Technology** and **Management Analytics**. La denominación más actual es **Business Analytics**, que integra metodologías analíticas, tanto descriptivas como prescriptivas.

Una característica importante de la Investigación Operativa consiste en mantener la **óptica global** en sus proyectos, analizando los problemas particulares dentro del marco en el que aparecen. Tanto en las definiciones clásicas como en las más modernas de Investigación Operativa el **concepto de sistema** es fundamental. Veamos algunos ejemplos que lo ilustran.

Muchas empresas calculan los costes unitarios de producción a nivel de taller de máquinas o líneas de producción, considerando todos los costes de los recursos utilizados. Cuanto menores sean los costes unitarios de producción mayor es la eficiencia. Esta forma de proceder es válida sólo para procesos de producción que

constan de una única fase y además no tengan dificultades para vender el producto. Cuando la empresa tiene procesos de producción complejos con varios productos (por ejemplo, las empresas de pavimentos cerámicos, Castellón) y cada línea produce diferentes partes –a menudo en pequeños lotes– que se utilizan como inputs en fases posteriores del proceso de producción. Esta forma de actuar incentiva que las máquinas estén produciendo todo el tiempo. Si las líneas de producción que siguen en el proceso de fabricación no requieren inmediatamente estos productos intermedios, la empresa tendrá que almacenarlos temporalmente incurriendo en un coste por estos stocks intermedios que no se atribuyen a la línea que los generó. Por tanto, la línea de producción parece eficiente, mientras la empresa tiene que hacer frente a unos costes excesivos provocados por esos productos intermedios.

Como hemos comprobado en el ejemplo anterior, la eficiencia de una operación o división particular de una empresa puede conducir a deteriorar su comportamiento global en cuanto a sus objetivos y metas. El concepto de eficiencia mide lo bien que se utilizan los recursos en una actividad dada. Así, podemos hablar de *eficiencia técnica*, que no tiene por qué coincidir con la *eficiencia económica*, que maximiza la diferencia entre ingresos y costes. Sin embargo, a las empresas lo que les interesa es lograr sus objetivos, que podemos evaluar a través de su *efectividad*. El que varias partes de un sistema operen de manera eficiente no implica necesariamente que el sistema en conjunto sea efectivo en el logro de sus objetivos. Con esto no queremos decir que la eficiencia sea contraria a la efectividad. Nada más lejos. La **verdadera eficiencia se mide teniendo en cuenta los objetivos globales de la empresa**. Eficiencia y efectividad son conceptos complementarios. En síntesis, podemos decir que *efectividad* tiene que ver con “*hacer las cosas correctas*” y la *eficiencia* con “*hacer correctamente las cosas*” (Daellenbach y McNickle, 2005).

Veamos otro ejemplo para ilustrar el concepto de sistema en Investigación Operativa. En una empresa con cinco departamentos (compras de materias primas, producción, comercialización, finanzas y personal) el de comercialización propone incrementar la duración de la garantía de uno de sus productos para hacer frente a la competencia. ¿Cuál es el sistema? ¿Y el entorno?

El departamento de comercialización consta de distribución, ventas y servicios al cliente. La empresa supone que al prolongar el período de garantía aumentarán las ventas. Sin embargo, también aumentarán los costes de garantía debido al servicio de clientes. Por lo tanto, el sistema estudiado podría reducirse a ventas y servicios al cliente (sistema 1), con todas las otras operaciones de la empresa, los clientes y las empresas competidoras formando el entorno del mismo. El objetivo del sistema 1 consiste en encontrar el período de garantía que maximice la diferencia entre beneficios por ventas y costes de garantía.

El sistema 1 considera la calidad del producto como parte del entorno, pero la calidad del producto afectará tanto a las ventas como a los costes de garantía. Por este motivo, el sistema 1 podría ampliarse para incluir producción (sistema 2). El objetivo de este sistema mayor es determinar la combinación óptima de calidad del producto y el

período de garantía para maximizar los beneficios. La calidad del producto también se ve afectada por la calidad de las materias primas empleadas, que son parte del entorno del sistema 2. Entonces el sistema 2 podría ampliarse aún más para incluir también la obtención de materias primas y llegar al sistema 3. El sistema 3 también podría ampliarse para incluir otros productos de la empresa, si las ventas de estos productos se pueden ver afectadas por los cambios en el período de garantía del primer producto, obteniéndose el sistema 4.

En la figura 1.1. podemos observar cómo cada sistema está incluido en otro más grande. Con este ejemplo queremos ilustrar el hecho de que la Investigación Operativa siempre intenta resolver los conflictos de intereses dentro de la empresa, de forma que el resultado sea el mejor para la empresa en términos de sus objetivos. Esto no significa que el estudio siempre deba considerar de forma explícita todos los aspectos, sino que los objetivos que se buscan deben ser consistentes con los de la propia empresa.

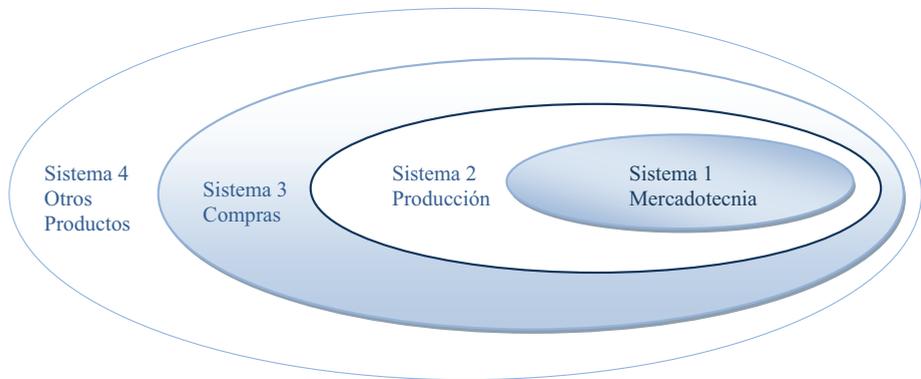


Figura 1.1. Ejemplo para ilustrar el concepto de sistema

### 1.3. APLICACIONES

Después de la Segunda Guerra Mundial, el ejército tanto británico como americano mantuvo grupos activos de Investigación Operativa. Como resultado ahora existe un gran número de personas llamadas "investigadores de operaciones militares", que están aplicando el punto de vista de la Investigación Operativa a problemas de defensa nacional. También se está usando ampliamente la Investigación Operativa en otros tipos de organizaciones y en el mundo empresarial. De hecho, casi todas las empresas más grandes del mundo y muchas medianas tienen establecidos grupos de Investigación Operativa.

Entre las industrias que aplican Investigación Operativa se pueden citar la de aviación y proyectiles, la informática, la de energía eléctrica, la electrónica, la agroalimentaria, la metalúrgica, la minera, del papel, del petróleo, transporte, así como las instituciones financieras, los organismos públicos y los hospitales. Las empresas finalistas de los premios Franz Edelman de la Sociedad **INFORMS** (*Institute for Operations Research and the Management Science*) proporcionan excelentes ejemplos de aplicaciones reales de Investigación Operativa (<http://www.informs.org>).

Entre los finalistas de **2012** están las empresas Hewlett-Packard (HP), Intel y **TNT Express**. Esta última obtuvo el premio por su programa de “Optimización Global”, que utiliza métodos avanzados para optimizar la red de transporte de la compañía. Este programa resuelve problemas de localización de almacenes, rutas óptimas de camiones, gestión de flotas y programación de personal.

En **2011** obtuvo el citado premio *Midwest Independent Transmission System Operator* (*Midwest ISO*), que es una organización sin ánimo de lucro y gestiona el **mercado de la energía eléctrica** en 13 estados de EEUU (región norte-centro) y uno de Canadá (Manitoba). Tiene el control operativo de más de 1.500 plantas de producción de energía y 55.000 millas de líneas eléctricas. Notifica a las plantas cada 5 minutos la cantidad de energía que se requiere para satisfacer la demanda. Utiliza un modelo de programación lineal para calcular los niveles de producción y establecer el precio de mercado de la electricidad. El tamaño del modelo tiene hasta 3 millones de variables continuas y 4 millones de restricciones. La solución del modelo proporciona los niveles de producción de las plantas y los precios de la energía (precios sombra o costes de oportunidad). También utiliza un modelo de programación entera para determinar cuando una planta tiene que estar produciendo o estar parada. Las empresas mantienen el control físico de las plantas y de las líneas de transmisión. *Midwest ISO* gestiona la energía en tiempo real para ofertar y comprar según demanda, administra el mercado y maximiza el beneficio de la sociedad que paga la electricidad más barata. En definitiva, con ayuda de técnicas que se tratan en el libro, en este caso se determina el precio al que la electricidad se compra y se vende y lo que es más importante está disponible cuando se necesita, donde se necesita y de forma segura.

En **2009** destacamos a **HP** con dos herramientas de Investigación Operativa para gestionar la cartera de productos y a la cadena de **hoteles Marriot** por un optimizador de precios. También en 2009 se encontraba entre las empresas finalistas **Zara** por aplicar Investigación Operativa para mejorar su proceso de distribución. **Cocacola Enterprises**, la empresa embotelladora y distribuidora más grande del mundo de productos de cocacola (cocacola, fanta, sprite, minute maid, etc) también fue reconocida en 2007 por su aplicación para programar las rutas diarias de 10.000 camiones.

Comentaremos la aplicación de Zara con un poco más de detalle. La cadena de suministro de Zara consta de 2 almacenes principales localizados en España, que periódicamente reciben los envíos de prendas finalizadas de los proveedores y reabastece a todas las tiendas de Zara 2 veces a la semana. La clave está en determinar

el número exacto de cada talla (hasta 8) y cada artículo (hasta 3.000 a la vez) que debe incluir en cada envío a cada tienda (más de 1.500). Hasta 2005 Zara utilizaba un procedimiento que requería un gran número de empleados para determinar los envíos a cada tienda. La empresa desarrolló un proceso de toma de decisiones alternativo basado en métodos de Investigación Operativa, que incluye métodos de previsión y un modelo de **programación entera** mixta de gran tamaño. La implantación de este nuevo proceso presentaba muchas dificultades técnicas. Una de ellas incluir la incertidumbre de las previsiones y las políticas de inventario de las tiendas, así como la integración de un modelo matemático complejo con muchas bases de datos grandes. También tenían que disponer de la infraestructura software y hardware necesaria para resolver miles de problemas de optimización en un par de horas cada día. Adicionalmente, presentaba retos relacionados con los recursos humanos, porque la cultura de Zara valora mucho la intuición y los juicios personales en la toma de decisiones. En 2007 se completó el desarrollo de este nuevo proceso, apoyado en técnicas de Investigación Operativa, en todas sus tiendas y artículos y desde entonces se utiliza.

En general, la **programación lineal** y la **programación entera** se han utilizado con éxito en la solución de problemas relativos a la asignación de medios de producción, mezcla de materiales, distribución, transporte, selección de inversiones y planificación de la agricultura entre otros muchos. Una aplicación muy relevante de la programación lineal en el campo de la economía es el análisis envolvente de datos DEA (Data Envelopment Analysis), desarrollado por Charnes, Cooper y Rodhes (1978). DEA es una técnica basada en programación lineal que nos permite medir empíricamente la eficiencia productiva de unidades de decisión como grupos de empresas del mismo sector, instituciones financieras, hospitales, instituciones educativas, etc. y determinar las empresas que se encuentran en la *frontera eficiente* de producción. La eficiencia se mide mediante la suma ponderada de los outputs sobre los inputs, calculando la estructura de pesos mediante programación lineal. Además, los conceptos de la programación lineal guían y facilitan los análisis y la interpretación de los resultados de los modelos DEA. En la actualidad éste sigue siendo un campo muy activo de trabajo, tanto por las aplicaciones como por la investigación que se realiza.

La **programación no lineal** se utiliza también en determinados problemas de asignación de recursos, selección de carteras eficientes, diseño de nuevos productos, problemas de producción, mezclas en procesos químicos, etc. La **programación multiobjetivo** y la **programación por metas** cuentan también con muchas aplicaciones tales como la gestión de recursos naturales (Weintraub y otros, 2007), la programación de medios de publicidad, la gestión de usos del suelo, la localización de servicios públicos y la planificación de recursos en centros hospitalarios por citar sólo algunas. Otras técnicas de Investigación Operativa como la teoría de inventarios, la teoría de juegos y la simulación se han utilizado en una gran variedad de contextos.

La Investigación Operativa comparte con la Inteligencia Artificial el objetivo de proporcionar métodos y procedimientos para la resolución de problemas y la toma de decisiones. La Inteligencia Artificial es de carácter deductivo y cuenta con conocimiento de expertos y métodos heurísticos. La Investigación Operativa se basa

fundamentalmente en algoritmos matemáticos. Una integración cuidadosa de estos dos enfoques presenta un futuro prometedor de cara a las prestaciones y aceptación de los sistemas. Los **Sistemas de Ayuda a la Toma de Decisiones** integran técnicas de Investigación Operativa e Inteligencia Artificial en sistemas de información que son muy útiles en el proceso de toma de decisiones. Esta integración puede hacer más accesibles a los decisores las técnicas de Investigación Operativa y por otra parte, los modelos pueden utilizar técnicas de Inteligencia Artificial. Destacan también las técnicas de búsqueda heurística tales como los algoritmos genéticos, tabu search y simulated annealing.

Los **modelos de Investigación Operativa** son comunes en **finanzas**, agrupándose muchas veces bajo el nombre de **ingeniería financiera**. Análogamente la **ingeniería del marketing** habitualmente significa Investigación Operativa aplicada al marketing. En este campo se aplica tanto para decisiones estratégicas (planificación, cartera de productos, etc.) como a nivel táctico (diseño de producto, publicidad, etc.). También juegan un papel importante en el análisis de los mercados electrónicos. Otras oportunidades vendrán de la mano del comercio y la inversión electrónica, desde la banca online hasta los seguros online.

En cuanto a la gestión de la cadena de suministros, la economía digital ofrece oportunidades para utilizar la Investigación Operativa en la planificación de recursos en la empresa, planificación y programación de la producción avanzadas teniendo en cuenta la información que se puede obtener por internet, que mejorará la coordinación y colaboración entre proveedores y clientes. El crecimiento de la comunicación y computación móviles aumentará las aplicaciones de ayuda a la toma de decisiones en camiones de transporte. Así hay empresas que optimizan la carga y rutas de camiones utilizando aplicaciones web para obtener los datos y distribuir las soluciones. Internet también facilita la ampliación de la gestión de la cadena de suministros en la dirección de integrar el diseño del producto, ventas y clientes.

Por último, debemos hacer hincapié en los puntos fuertes de la **Investigación Operativa** en la era de la economía digital: explota la gran cantidad de datos disponibles, puede manejarse con la creciente complejidad debido a su carácter analítico y con la incertidumbre, la modelización **aumenta la comprensión de los procesos de negocio, puede hacer experimentos virtuales sin riesgo para las empresas y provee de tecnología de decisión** para la automatización de decisiones recurrentes en tiempo real, como en las aplicaciones web. En definitiva, la Investigación Operativa del futuro es la Investigación Operativa en tiempo real. Los clientes habitualmente preguntan cuándo van a tener disponible su pedido. Los proveedores basan su respuesta en el inventario y en la producción en curso y la programada. Sin embargo, deberían poder responder después de ejecutar un algoritmo de programación con la orden potencial incluida. Para lograr las prestaciones requeridas en tiempo real necesitaremos recurrir a veces a algoritmos heurísticos como los que se abordan en el último capítulo del libro.

## 1.4. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN OPERATIVA

Daellenbach y McNickle (2005) establecen claramente tres grandes fases en la metodología de la Investigación Operativa que son la formulación del problema, la modelización y la implantación, que a su vez desagregan en las subfases que indicamos en la figura 1.2.

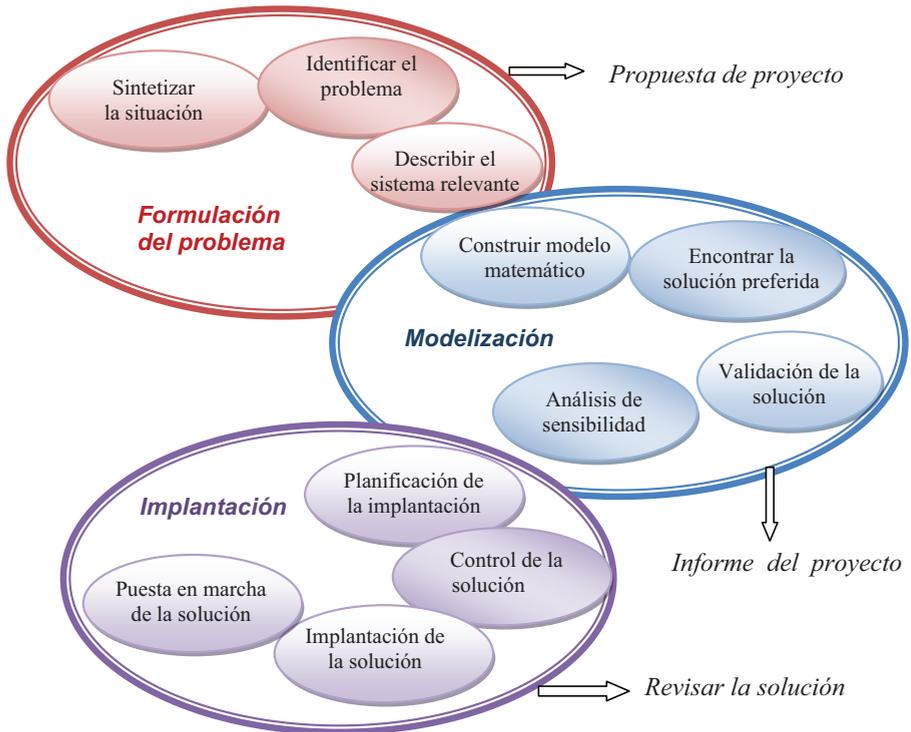


Figura 1.2. Metodología de la Investigación Operativa

### 1.4.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

En primer lugar debemos hacer una **síntesis de la situación**, por ejemplo a través de **gráficos o diagramas** que nos ayudarán en la fase de identificación del problema, tras la cual debemos identificar la estructura, los procesos de transformación, los componentes, inputs y outputs del sistema relevante. Para que exista un problema debe haber un individuo o grupo de individuos, que llamaremos **responsables de la decisión** (decisor), que no estén satisfechos con la situación actual o que tengan necesidades

insatisfechas, como alcanzar algunas metas u objetivos. Además conocen cuando las metas u objetivos se han alcanzado en un grado satisfactorio y tienen control sobre los aspectos de la situación que afectan al grado en que se logran los objetivos. Los cuatro elementos de un problema son:

- El **responsable** de la decisión.
- Los **objetivos** del responsable de la decisión.
- La **medida** de la eficiencia para valorar el grado de logro de los **objetivos**.
- Las **alternativas de acción** o **variables decisión** para alcanzar los objetivos.

La segunda fase de la formulación del problema, la identificación del mismo, consiste en definir estos cuatro elementos. En la tercera fase se define el sistema relevante para el problema que hemos identificado, incluyendo su entorno. El decisor tiene un papel esencial en esta fase de formulación del problema.

En la práctica, la determinación de estos cuatro componentes puede no ser tan fácil de obtener simplemente preguntando al decisor. Éste a veces sólo tiene una vaga sensación de que las cosas podrían ir mejor. Debemos explorar y clarificar la situación a través de las personas implicadas. A veces puede ocurrir que la persona que toma las decisiones no tiene acceso a la información para una toma de decisiones efectiva y el que tiene la información no tiene suficiente autoridad para tomar decisiones. En estos casos lo primero que hay que hacer es cambiar la estructura de la organización, reasignando los roles en la toma de decisiones. En la mayoría de las aplicaciones reales, la formulación del problema no se logra en estas tres etapas, sino que la formulación inicial va detallándose con sucesivas reformulaciones, a medida que se va conociendo el problema en profundidad. De hecho, continúa hasta que el proyecto finaliza. Sin embargo, en esta fase radica el éxito o fracaso de muchos proyectos.

Una vez que conocemos suficientemente bien el problema y el sistema relevante es cuando podemos hacer un juicio sobre si la Investigación Operativa puede obtener una solución al problema. Por tanto debemos preguntarnos:

¿Podemos expresar el problema en términos cuantitativos?

¿Los datos requeridos están disponibles o pueden obtenerse a un coste razonable?

¿El coste del análisis justifica los posibles beneficios que se obtengan de la implantación de los resultados? ¿Cuánto se pueden cumplir las expectativas del decisor?

Si respondemos afirmativamente a estas preguntas, entonces la fase de formulación concluye con una propuesta, que será el documento sobre el cual el decisor estimará ir adelante o no con el proyecto. Por tanto, la propuesta es una pieza clave. No debemos prometer más de lo podemos obtener con los recursos disponibles. Dado que la Investigación Operativa tiene mucho en común con la investigación científica, debemos guiarnos por la **ética** del método científico.

La siguiente anécdota de Ackoff pone de manifiesto tanto la dificultad de la formulación del problema en algunos casos reales, como el hecho de que no siempre podemos resolver una situación insatisfactoria haciendo modelos. Tan importante es saber para qué son útiles los modelos y cuándo nos permiten mejorar la toma de decisiones, como reconocer cuándo no son la herramienta adecuada. La administración de un gran edificio de oficinas recibió quejas durante años por el excesivo tiempo que el personal gastaba en la espera de los ascensores en el vestíbulo principal. Varios equipos de Investigación Operativa analizaron este problema del excesivo tiempo de espera. Se propusieron distintas soluciones como dedicar unos ascensores para los pisos bajos y otros sólo para los altos. Sin embargo, se llegó a la conclusión de que una reducción importante sólo sería posible instalando nuevos ascensores con un gran coste asociado. Un miembro del último equipo preguntó por qué se quejaba el personal y tras las oportunas averiguaciones resultó que se debía al aburrimiento. Entonces el equipo de Investigación Operativa propuso instalar espejos. Algunos trabajadores los utilizaban para hacerse un último chequeo personal o bien para observar a otros sin que fuera tan obvio. Cuando se implementó esta solución desaparecieron las quejas (Ackoff, 1981). Actualmente, las pantallas con información de interés para el personal puede conseguir el mismo efecto que los espejos hace años.

La Investigación Operativa, en muchos casos, no pretende encontrar la solución óptima, sino encontrar algún grado de mejora respecto a la situación previa. Uno de los padres fundadores de la disciplina lo explicaba en términos coloquiales de la siguiente manera: “la Investigación Operativa es el arte de proporcionar malas soluciones a los problemas, que en caso contrario tendrían soluciones peores”.

#### 1.4.2. MODELIZACIÓN

La fase que distingue a la Investigación Operativa de otros métodos de abordar la resolución de problemas es la modelización. Según Daellenbach y McNickle (2005), a menudo la Investigación Operativa se ve como un conjunto de técnicas y herramientas matemáticas, visión que no favorece nada a la disciplina en detrimento de su potencial. La fase de modelización empieza expresando el sistema, relacionado con el problema, en términos cuantitativos. Un modelo matemático expresa en términos cuantitativos las relaciones entre varios componentes relevantes del sistema, que se ha definido en la fase de formulación. A veces estas relaciones se pueden representar en una hoja de cálculo y otras es necesario formular las relaciones en términos de expresiones matemáticas, tales como ecuaciones, desigualdades o funciones. El término modelo se utiliza en un sentido amplio, dado que puede tener tanto forma de tabla como de expresiones matemáticas.

Llamamos **variables decisión** a las alternativas de acción o aspectos controlables del problema. La terminología de **alternativas de acción** se utiliza cuando su número es discreto y normalmente pequeño. La medida del comportamiento o medida de la efectividad son los aspectos que miden en qué grado se alcanzan los objetivos de la empresa. Si esta medida de la efectividad se puede expresar como una función de las variables, la denominamos **función objetivo**. Nuestra meta es encontrar los valores de

las variables decisión que maximizan o minimizan la función objetivo. Los **parámetros o coeficientes** representan los aspectos no controlables del problema. Y las **restricciones** son las expresiones matemáticas que limitan el rango de valores que pueden asumir las variables decisión. Desde principios de los años 50 se han desarrollado una serie de modelos matemáticos, con su propio procedimiento de resolución, tales como la programación lineal y sus numerosas extensiones, modelos de redes como el camino crítico, etc. Son lo que denominamos modelos de propósito general. Cualquier problema que satisface las hipótesis de un modelo general puede ser abordado y resuelto de esta manera. Para los problemas que no se ajustan a ninguna técnica particular de Investigación Operativa, se debe desarrollar un modelo de propósito especial, que tendrá una estructura única para el problema en cuestión. Asimismo se tiene que inventar un procedimiento de resolución para ese caso concreto. Por último, cuando todos los inputs y relaciones son conocidos decimos que el problema es determinístico, mientras que si algunos inputs o resultados están sometidos a incertidumbre, como las influencias probabilísticas, el modelo se conoce como probabilístico o estocástico.

Un **modelo** matemático para que sea útil debe permitir tomar **mejores decisiones** cuando se utiliza y además ser:

- **Simple:** Los modelos simples son más fáciles de entender por el que toma las decisiones. Será más fácil que el decisor siga la lógica de una hoja de cálculo, que de un grupo de ecuaciones. Sin embargo, cuando no queda más remedio que hacer modelos complicados, debemos hacer aproximaciones adecuadas a la situación real.
- **Completo:** El modelo debe incluir todos los aspectos significativos del problema que afectan a la medida de la efectividad. Puede ser necesario hacer dos modelos, uno con y otro sin determinados aspectos para comparar y juzgar la relevancia de los mismos.
- **Fácil:** Debemos obtener las respuestas del modelo, como la solución óptima, con un esfuerzo computacional razonable. Además, debe ser fácil de preparar, actualizar y cambiar los parámetros y obtener respuestas rápidamente.
- **Adaptable:** Normalmente cambios razonables en la estructura del problema no invalidan el modelo. Si los cambios invalidan el modelo, puede ser posible adaptar el modelo con pequeñas modificaciones. Un modelo adaptable se conoce como un modelo **robusto**.

En la práctica podemos encontrar útiles estas propiedades en un modelo, sin embargo el usuario puede sólo apreciar alguna de ellas. Así, el decisor y el usuario del modelo pueden estar más interesados en las propiedades deseables del **proceso de modelización**, que en las del modelo mismo. La **credibilidad** y **confianza** del usuario están más relacionadas con el proceso y la interacción con la persona que formula el modelo que con el modelo mismo. En este sentido, es importante tener en cuenta los siguientes aspectos:

**El modelo es apropiado para la situación estudiada.** El modelo produce resultados relevantes con el menor coste posible y en el tiempo requerido por el decisor. Un “buen” modelo de Investigación Operativa no necesariamente tiene que mostrar los detalles o parecerse al sistema físico que pretende optimizar. Además, un buen modelo debe permitirnos medir el logro alcanzado en los objetivos del decisor.

**El modelo tiene que producir información que es relevante y apropiada para la toma de decisiones.** Si el modelo satisface estas dos últimas propiedades y podemos demostrarlas ante el decisor y el usuario, entonces es más probable que encuentren el modelo **útil**. Por último, debemos destacar que algunas de las propiedades de los buenos modelos entran en conflicto. Un modelo simple puede no tener en cuenta todos los aspectos relevantes. Un modelo robusto puede no ser sencillo. Un modelo que incluye todos los aspectos significativos puede no ser fácil de manipular. El que construye el modelo debe equilibrar estos aspectos y adoptar un compromiso, que debe tener en cuenta los recursos y el tiempo disponible para el análisis. También debería tener en cuenta los posibles beneficios. Así, puede ser económicamente más ventajosa la utilización de estrategias simples y rápidas que proporcionen el 50% de los beneficios, que un modelo sofisticado y caro que logre el 90% de los beneficios potenciales. El coste de desarrollo del modelo matemático, la recolección de datos, computar la mejor solución, implementar el modelo y mantenerlo crece más que proporcionalmente con la sofisticación del modelo, mientras que los beneficios crecen menos que proporcionalmente.

Aunque el **proceso de modelización** matemática puede considerarse como un proceso científico, hay ciertos **aspectos que están más próximos a un arte que a una ciencia**. Se considera un arte porque hay que desarrollar modelos sencillos, que sean buenas aproximaciones a la realidad. Hay pocos consejos que se puedan dar al respecto, salvo que la habilidad y destreza necesaria se puede adquirir con la práctica. Los expertos recomiendan empezar por modelos simples, que se van enriqueciendo hacia modelos más elaborados mediante la incorporación de aspectos adicionales del problema. Otro consejo que se puede dar es trabajar con ejemplos numéricos, así como la utilización de gráficos y diagramas.

La construcción de modelos en la práctica de la administración y dirección de empresas es valiosa al menos por las siguientes razones (Eppen y otros, 2000):

1. Los modelos obligan a definir explícitamente los objetivos.
2. Los modelos obligan a identificar y registrar los tipos de decisiones que influyen en dichos objetivos.
3. Los modelos obligan a identificar y registrar las interacciones entre todas esas decisiones y sus respectivas ventajas y desventajas.
4. Los modelos obligan a pensar en las variables que se van a incluir y a definir las en términos cuantitativos.

5. Los modelos nos obligan a considerar qué datos son pertinentes para la cuantificación de dichas variables y a determinar las interacciones entre ellas.
6. Los modelos obligan a reconocer las restricciones pertinentes en los valores que las variables pueden adoptar.
7. Los modelos permiten comunicar ideas y conocimientos, facilitando el trabajo en equipo.

Tras la construcción del modelo, manipulamos el modelo cuantitativo para explorar la respuesta del comportamiento del sistema a los cambios en los inputs, es decir exploramos el espacio de soluciones. El fin es encontrar la solución preferida en los términos de los objetivos del decisor. Si éste está interesado en un objetivo principal lo que tenemos que hacer es encontrar la solución óptima. Así, si la medida de la eficiencia es el beneficio, la solución óptima es la que maximiza el beneficio. A continuación con la validación y evaluación de la solución, se establece la credibilidad del modelo, en el sentido de ser una representación válida de la realidad. Nos debemos preguntar qué mejora en términos de beneficios o ahorros de costes sobre el modo actual de operación y cuál es el rango de beneficios potenciales que se pueden esperar. Las respuestas a estas cuestiones determinarán si debemos abandonar el proyecto, reorientarlo o continuar en la línea que llevamos.

En síntesis, podemos decir que para encontrar la solución del modelo podemos hacerlo mediante enumeración si el número de alternativas es relativamente pequeño (decenas), con los métodos de búsqueda como los de eliminación de intervalo, los métodos basados en un algoritmo, los métodos clásicos del cálculo, los métodos de solución heurística y la simulación. Los métodos de resolución más potentes son los basados en **algoritmos**. Un algoritmo es un conjunto de operaciones lógicas y matemáticas que se repiten en una secuencia determinada. Cada repetición de estas reglas se llama **iteración**. Un algoritmo empieza con una solución que se va mejorando en cada iteración, cuya solución obtenida se convierte en la solución inicial de la siguiente iteración. Este proceso se repite hasta que se cumple la regla de parada. Ésta puede indicar que se ha alcanzado la solución óptima, que no se ha obtenido una solución posible o que se ha llegado al número de iteraciones o tiempo de computación establecido.

Para que un algoritmo sea un método de resolución práctico debe tener una serie de propiedades:

- Cada solución sucesiva debe mejorar la anterior
- Las soluciones sucesivas deben converger, estando cada vez más próximas a la solución óptima.
- La convergencia a la solución óptima debe ocurrir en un número razonable de iteraciones.
- El esfuerzo computacional de cada iteración tiene que ser suficientemente pequeño para ser económicamente aceptable.

La cota superior del número de iteraciones depende de los beneficios potenciales del problema. Lo que puede ser razonable para encontrar la estrategia óptima de ampliación en una gran empresa, puede ser excesivo para encontrar la ruta óptima de reparto en una ciudad. En problemas reales para hacer estos cálculos se necesita un computador. Muchas técnicas generales de Investigación Operativa como la programación lineal o la programación entera utilizan algoritmos para encontrar la solución óptima.

Cuando los modelos son de gran complejidad o computacionalmente intratables con los medios disponibles, los métodos heurísticos pueden ser la única alternativa posible, como veremos en el último capítulo del libro (algoritmos genéticos y otros metaheurísticos). Los métodos heurísticos utilizan la ingenuidad, la creatividad, la intuición, el conocimiento o la experiencia humana para encontrar buenas soluciones o mejorar una existente. A veces se puede encontrar explicación de por qué unas reglas conducen a buenas e incluso soluciones óptimas. Otras se utilizan porque han demostrado que funcionan bien. Los **métodos heurísticos** en general no garantizan la solución óptima, aunque puede ser posible probar que la encuentran en algunos casos. Utilizando la terminología de Herbert Simon, podríamos decir que los métodos heurísticos están normalmente asociados con la palabra “satisfacer” más que con la de optimizar. Por último, la simulación se utiliza en sistemas dinámicos complejos, especialmente en los que hay que contemplar aspectos estocásticos. En este caso, como en el de los métodos heurísticos, el analista debe esperar obtener buenas políticas, más que la óptima.

Las dos últimas etapas de la fase de modelización consisten en la validación del modelo, evaluar la solución y realizar el análisis de sensibilidad. Concretamente, el objetivo de la validación es establecer si el modelo es matemáticamente correcto, lógicamente consistente y refleja suficientemente bien la realidad. La validación del modelo tiene dos facetas, la validación interna se conoce como **verificación** y la validación externa que se denomina **validación**. La verificación implica analizar si el modelo es matemáticamente correcto y lógicamente consistente. El mejor método para verificar un modelo es analizando los resultados que se obtienen probando el modelo con datos numéricos que tengan un amplio rango de valores. Esto implica verificar si las expresiones son dimensionalmente consistentes. También debemos verificar la corrección de las constantes numéricas. Debemos ir verificando el modelo a medida que lo vamos desarrollando, poniendo de manifiesto el mencionado solape entre las distintas fases de la metodología. En modelos complejos con muchas expresiones interrelacionadas debemos comprobar la consistencia lógica.

La validación externa es mucho más complicada que la verificación. Lo que es o no una aproximación suficiente es una cuestión de juicio. Esto dependerá fundamentalmente del propósito del modelo y del uso de la solución. Un análisis exploratorio tendrá suficiente con una aproximación, mientras que un modelo para tomar decisiones diarias tendrá que reflejar mucho mejor la realidad. Por tanto, la validación es una fase que se solapa con la definición del sistema relevante y con la construcción del modelo. Debemos tener claro que no se puede demostrar que un

modelo es válido, sólo podemos comprobar que no es válido. Esto tiene que ver con la credibilidad del modelo. Si el modelo es creíble, el usuario tendrá confianza en él. Por tanto, en la validación externa juegan un papel importante el decisor y el usuario. La verificación y la validación son vistas como fases que se llevan a cabo cuando se ha completado la fase de modelización. Este es un planteamiento erróneo. Si se hace en este momento, los errores o hipótesis cuestionables harán que se pierda buena parte del trabajo. La evaluación de todos los aspectos del modelo es un proceso continuo.

En cuanto a la evaluación de la solución, el principal objetivo es determinar los beneficios esperados, tales como beneficios o ahorros netos, que puede producir la implantación de la solución. Normalmente esta evaluación se realiza mediante simulaciones con el computador, comparando la situación actual y la propuesta con el mismo conjunto de datos. Si el sistema no está aún en funcionamiento se evalúa estimando los beneficios potenciales mediante datos artificialmente generados. Algunas reglas para llevar a cabo la evaluación de la solución son:

- La evaluación de la solución propuesta debe estar basada en observaciones del comportamiento real (simulado) en un periodo de tiempo suficiente.
- Los datos deben ser independientes de los datos utilizados para obtener la mejor política.
- Las pruebas no deben dar sólo el comportamiento esperado, sino también alguna medida de su variabilidad.
- Por último, queremos resaltar la similitud entre los proyectos de Investigación Operativa y los proyectos de investigación y desarrollo de nuevos productos. Hay que invertir una cierta cantidad de fondos antes de poder saber el éxito potencial del proyecto.

El último paso de la modelización consiste en realizar lo que se denomina análisis "What if". ¿Cómo le afecta a la solución elegida o a la solución óptima los cambios individuales o simultáneos de los inputs no controlables del sistema? ¿Cuánto cuesta en términos de reducción de beneficios la utilización del modelo con parámetros incorrectos? El análisis de sensibilidad nos permite responder a estas preguntas y es, sin duda, uno de los pasos más importantes del método de la Investigación Operativa. El conocimiento que se obtiene del problema a partir del análisis de sensibilidad puede ser más valioso que la propia solución. En síntesis, el **análisis de sensibilidad** consiste en la **evaluación sistemática de la respuesta de la solución óptima a las modificaciones de los datos de entrada**. Este análisis nos permite:

- Determinar la **exactitud necesaria** de los **datos** de entrada para el modelo.
- Establecer **intervalos de control** para las modificaciones en los **parámetros** y **datos** de entrada para los cuales la solución óptima permanece cercana al óptimo.
- Evaluar el **coste de oportunidad** de los **recursos escasos**.

Como veremos, algunas técnicas y en especial la programación lineal proporcionan cierta cantidad de análisis de sensibilidad, ya sea como subproducto de los cálculos

algorítmicos o con poco esfuerzo adicional. En otros casos, el análisis de sensibilidad requiere volver a resolver el problema para varias combinaciones de los datos de entrada.

Cuando se termina la fase de modelización preparamos un informe detallado del análisis realizado, sus logros y las recomendaciones para su implantación. Este documento vuelve a ser tan importante como la propuesta, dado que sobre el mismo se decidirá sobre la implantación.

### 1.4.3. IMPLANTACIÓN

En la fase de implantación, en primer lugar debemos preparar un plan detallado sobre las diversas tareas de esta fase, su asignación a personas y su coordinación. Tras lo cual se proponen los procedimientos para el establecimiento y mantenimiento de controles de la solución recomendada. Por ejemplo, se especificará para qué rango de valores de los parámetros del modelo la solución actual permanece válida y el procedimiento exacto de actualización cuando se salgan de estos rangos.

En la implantación de la solución se hacen los cambios requeridos para pasar de la situación actual a la propuesta. Una parte de este paso es la preparación de una completa documentación del modelo, del software desarrollado para su utilización y los correspondientes manuales de usuario. Por último, después de que la solución haya sido probada durante un cierto tiempo debemos revisarla de nuevo. En esta fase se debe comprobar en qué medida la solución satisface las expectativas en términos de beneficios logrados y costes incurridos, así como un chequeo de su adecuada utilización y posibles recomendaciones a la luz de la experiencia adquirida. Este paso puede dar lugar a un informe final.

El **proceso de implantación** está lleno de **dificultades** que son fundamentalmente de **naturaleza humana**. Esto se acentúa en los proyectos que tratan de mejorar operaciones existentes. Los problemas de implantación pueden proceder de tres causas: las relativas a la implantación de tareas físicas, tales como la complejidad de la solución, la sensibilidad de los beneficios o costes a las desviaciones de las reglas prescritas y cuánto se desvía la solución propuesta de la vigente, que cuanto mayores son, más grandes serán los problemas de la implantación. La segunda causa de problemas tiene que ver con los usuarios y otros individuos afectados por la solución, tales como sus personalidades, su motivación y su orgullo en el trabajo. Por último, la tercera causa de problemas en la fase de implantación se encuentra en el entorno del proyecto, como el apoyo de la alta jerarquía al proyecto y su solución (cuanto menos visible y explícito sea ese apoyo al proyecto, menor será la colaboración de los usuarios) y las implicaciones organizativas de la solución (si el departamento del usuario es más dependiente de otro o si los usuarios ven que la solución amenaza la seguridad de su trabajo prestarán menor apoyo).

Generalmente concentramos más nuestra atención en el primer factor que es una cuestión de tecnología, desprovista de aspectos humanos. Los factores segundo y tercero son de naturaleza cualitativa y suelen descuidarse y pasarse por alto, sin embargo son serias restricciones a la implantación. Desde este punto de vista podemos ver la **implantación** como un **problema de relajar las restricciones humanas versus ajustes de la solución técnica**. Una manera de relajar estas restricciones es involucrando más al usuario desde el principio del proyecto y preparándolo para que entienda la solución. El éxito de la implantación casi se puede garantizar si el **decisor** y el **usuario** se sienten propietarios de los resultados del análisis. Pueden desarrollar este sentimiento de propiedad si pueden contribuir al proyecto de diversas maneras, con su experiencia y profundo conocimiento de las operaciones. Por tanto, el analista les debe mantener informados y solicitar su opinión y consejo respecto a muchas ideas. Si sienten que han **contribuido de forma significativa al proyecto**, querrán ver puesta en marcha la solución y tendrán un papel activo en el proceso de implantación.

Ya hemos dicho que la planificación de la implantación debe iniciarse desde el comienzo del proyecto, cuando se establecen los primeros contactos con el patrocinador. Una guía general para planificar la implantación es la siguiente:

Identificar a todos los implicados en el problema, en particular a los responsables de tomar las decisiones y a los usuarios. Los primeros porque son los que tienen que aprobar la implantación y los segundos porque su cooperación es necesaria para la utilización continuada de la solución.

- Establecer líneas efectivas de comunicación con los decisores y usuarios del problema.
- Explorar y gestionar las expectativas previas del proyecto.
- Mantener a los propietarios y usuarios del problema regularmente informados.
- Comprobar la disponibilidad y fuentes de todos los datos necesarios.
- Encargar el equipo y software requerido, si es necesario.
- Desarrollar todo el software necesario para la implantación y uso de la nueva solución.
- Planificar y ejecutar el proceso real de implantación, como la preparación de todos los datos en la forma requerida, manuales de usuario, sesiones de formación, etc.
- Sesiones de seguimiento regulares con los usuarios.

Las técnicas de gestión de proyectos nos pueden ayudar a realizar adecuadamente la planificación de la implantación.

En cuanto a la fase de control y mantenimiento de la solución debemos hacer lo siguiente:

- Para cada parámetro y restricción debemos indicar los cambios cuantitativos para los cuales la solución permanece óptima o cuasi óptima.
- Indicar las relaciones estructurales entre inputs, variables y resultados que asume el modelo.
- Especificar cómo medir los inputs y cada cuanto tiempo para ver si los cambios son significativos y las medidas a tomar en su caso.
- Asignar las responsabilidades para el control de cada ítem y quien tiene que ser notificado de los cambios detectados.
- Especificar cómo se tiene que ajustar la solución en respuesta a los cambios cuantitativos en los inputs y quién y qué acciones se deben tomar en el caso de posibles cambios estructurales.

El trabajo no termina con la implantación, sino que es esencial realizar un seguimiento del comportamiento del modelo durante algún tiempo. Si hay algún mal entendido o incorrecta aplicación hay que tomar medidas. Por ejemplo, corrigiendo los manuales, haciendo sesiones de formación, etc. Una de las últimas cosas que se deben hacer es auditar la solución. Esto implica evaluar el grado en que se han alcanzado los beneficios esperados del proyecto. Para que sea válida la comparación entre los beneficios antes y después del proyecto, como ya hemos indicado con anterioridad, debemos utilizar los mismos datos. Si se encuentran importantes discrepancias entre los beneficios reales y los estimados en el proyecto debemos analizar y explicar las causas. Esto no es sólo importante para el patrocinador del proyecto, sino también para el que desarrolla el modelo, pues de esta manera puede obtener un feedback cuantitativo y cualitativo de su propia actuación. Por último, como indican Daellenbach y McNickle (2005) es rara la implantación de todas las recomendaciones de un proyecto de Investigación Operativa. Por tanto, la meta del analista debería ser lograr un grado suficientemente alto de implantación, para poder obtener la mayor parte de los beneficios potenciales.

Como hemos comentado en el apartado anterior, la **Investigación Operativa pretende mejorar la efectividad del sistema a nivel global**. Esto sólo es posible si se implementa la solución tan completamente como sea posible. **Asegurar la implantación de la solución** es una de las primeras cosas que deben tenerse en cuenta en las fases de formulación y modelización. Todas las medidas que incrementen las posibilidades de una completa implantación deben de comenzar y ser planificadas desde el principio del proyecto y continuar a lo largo de todas las fases. Aunque ya lo hemos mencionado, queremos insistir en que el orden natural en el que se han descrito las **fases de un proyecto de Investigación Operativa** es el orden en el que se inician normalmente, pero cada paso se suele **solapar con precedentes y siguientes**. En cuanto a la elección del modelo más apropiado se debe tener en cuenta el coste tanto del desarrollo como de la

**Para seguir leyendo haga click aquí**