

# **Análisis y Síntesis de Sistemas de Ingeniería**

**Preparación y toma de decisiones de ingeniería  
bajo criterios múltiples**  
**José Arzola Ruiz**



09

# Índice

No.	Contenido	Pag.
	Resumen	3
	Introducción	4
	Desarrollo	7
I.	Breve descripción de la metodología y los métodos desarrollados para el análisis y la síntesis de sistemas de ingeniería	7
I.1	Correspondencia entre las estructuras de los procesos de toma de decisiones y de los modelos matemáticos de los sistemas asociados	9
I.2	Principios de descomposición de la tarea de toma de decisiones en objetos complejos	35
I.3	Análisis del sistema de toma de decisiones por tareas	42
I.4	Síntesis de los sistemas de ingeniería	52
I.4.1	Preparación de decisiones en los sistemas de Ingeniería organizados en estructuras jerárquicas participativas	52
I.4.2	Toma de decisiones en los sistemas jerárquicos discretos	59
I.5	Método de Integración de Variables	80
I.5.1	Búsqueda por Localización Aleatoria del Extremo de una Función de un Código Variable	83
I.5.2	Búsqueda por Exploración Aleatoria del Extremo de una Función de Códigos Variables	95
I.6	Algunas otras investigaciones vinculadas al trabajo presentado	97
II	Conclusiones	98
III	bibliografía	100

## Resumen

En el presente trabajo se exponen los fundamentos de una metodología elaborada por el autor que permite analizar clases de problemas (tareas) de ingeniería como tareas de preparación y toma de decisiones bajo criterios múltiples. A partir del Análisis se realiza la Síntesis del Sistema. Se da un modelo general de la preparación y toma de decisiones y se estudia el vínculo existente entre la estructura del modelo matemático de preparación y toma de decisiones con la estructura de descomposición de la tarea correspondiente, coincidente con las estructuras más difundidas en las organizaciones. La Síntesis del sistema se presenta como un esquema consistente en la generación de opciones de decisión, por los diferentes componentes resultantes de la descomposición, y la selección posterior de la mejor combinación de opciones para todo el sistema. Se establece el vínculo de los resultados obtenidos con la Teoría General de Sistemas, los métodos del Análisis Multicriterial, las técnicas de optimización. Se presenta el método de Integración de Variables concebido para la solución de la etapa de síntesis del sistema de preparación y toma de decisiones. Los resultados teóricos se ejemplifican con aplicaciones prácticas realizadas con la participación directa del autor.

**Palabras claves:** Teoría de Sistemas, Toma de Decisiones, Análisis Multicriterial, Descomposición de tareas de optimización, Métodos de optimización discreta, optimización en la ingeniería.

**Abstract:** In the present work the bases of a methodology that allows analyzing classes of engineering problems (tasks) as preparing and making decisions under multiple criteria tasks, elaborated by the author, are presented. Starting from the analysis the synthesis of the system is carried out. A general model of the preparing and making decisions in engineering systems tasks is proposed and the existent relationship among the structure of the mathematical model of preparing and making decisions tasks with the structure of its decomposition, coincidental with the commonly established structures in economical and social organizations is studied. The synthesis of the system is presented as an outline that consists on decision options generation, for the different resulting components of the decomposition, and the later selection of the best, for the whole system, options combination. The linkage of the results obtained with the Systems Theory, the Multicriterial Analysis methods, the optimization techniques is settled down. The Integration of Variables method is presented conceived for the solution of the synthesis of the decisions making stage, but it is useful too for the options generations tasks. The theoretical results are exemplified with practical applications carried out with the author's direct participation.

**Key words:** Systems Theory, Decisions Making, Multiple Criteria Analysis, Optimization tasks Decomposition, Discrete optimization methods, Optimization in engineering.

## Introducción

Como parte inherente a su profesión, todo ingeniero se dedica a la solución de tareas de preparación de decisiones relacionadas con su especialidad. La solución a estas tareas resulta, sin embargo, extremadamente compleja a causa de la presencia de una serie de circunstancias:

- a) El simple cálculo de una alternativa cualquiera de solución a un problema de ingeniería suele ser muy difícil.
- b) Los objetivos humanos se someten con dificultad a la formalización matemática.
- c) Cualquier problema de ingeniería siempre es parte componente de otro problema de mayor complejidad. La mejor solución a un problema determinado puede constituir una mala solución, o incluso ser incompatible para el problema mayor del cual él forma parte.

La sola ejecución de sistemas de cálculo de ingeniería está asociada con grandes dificultades:

- a) Existencia de diferentes métodos para el cálculo de un mismo parámetro o indicador de eficiencia, con la particularidad de que algunos de ellos resultan precisos en determinadas condiciones e imprecisos en otras.
- b) Presencia de procedimientos de cálculo de carácter implícito, los que requieren de métodos numéricos para su realización.
- c) Utilización de tablas, gráficos, nomogramas en la determinación de parámetros que intervienen en los procedimientos de cálculo.

En el presente trabajo se expone una metodología de análisis y síntesis de sistemas de ingeniería que consta de tres etapas: análisis externo, análisis interno y síntesis del sistema.

Entre los resultados de investigación básica más importantes desarrollados por el autor, asociados a la metodología presentada, se destacan:

- Estudio de la correspondencia existente entre las estructuras de los modelos matemáticos de los sistemas y las estructuras de preparación y toma de decisiones

más adecuadas para su solución. Estas últimas se obtienen como consecuencia del esquema de descomposición y de solución, por partes, de la tarea original de toma de decisiones (ver epígrafe I.1).

- Formulación de principios de descomposición de las tareas de toma de decisiones en objetos complejos, enfocados a las tareas propias de la ingeniería. La aplicación práctica de estos principios facilita el estudio del sistema de mayor envergadura, del que forma parte el estudiado, la determinación de las variables de enlace entre las tareas y su descomposición en subtareas interrelacionadas (ver epígrafe I.2).
- Deducción, a partir de las bases teóricas de los clásicos y de desarrollos propios, de una metodología de análisis de sistemas. Como salida de este análisis se obtienen los modelos detallados de toma de decisiones de la tarea estudiada, los procedimientos de cálculo asociados y los procedimientos gráficos y de simulación complementarios, necesarios en el completamiento de la información requerida por el eventual decisor para buscar soluciones que satisfagan su sistema completo de preferencias (ver epígrafe I.3).
- Síntesis del sistema de preparación y toma de decisiones (ver epígrafe I.4):
  - Desarrollo de herramientas para la preparación de decisiones, es decir, propias de la generación de opciones próximas al mejor compromiso entre los indicadores de eficiencia para cada elemento del sistema resultante de la descomposición, incluyendo una metodología concreta de generación de estas opciones.
  - Desarrollo de herramientas para la toma de decisiones, es decir, propias de la conciliación de decisiones entre los elementos del sistema. Se deduce la *Tarea de Selección de Propuestas bajo Criterios Múltiples* y su generalización correspondiente a la de toma de decisiones en estructuras jerárquicas participativas y de los algoritmos necesarios en el cálculo de las evaluaciones de

las propuestas y de las pérdidas sistémicas de acuerdo con el *Programa de Tchebycheff*.

- Desarrollo del método general de *Integración de Variables*, como herramienta de la generación y selección de opciones de solución. Este método generaliza, entre otros, a los *Algoritmos Genéticos*. De este método potencialmente se puede desarrollar un número prácticamente ilimitado de algoritmos de optimización. Se han desarrollado, entre otros, el algoritmo exacto de *Selección de Propuestas* y los heurísticos *Localización Aleatoria del Extremo de una Función de un Código Variable* y *Exploración Aleatoria del Extremo de una Función de un Código Variable*. Se estudian esquemas de optimización discreta, su aplicación a tareas del diseño y la manufactura y su comparación con los Algoritmos Genéticos (ver epígrafe I.5).

El autor ha participado en no menos de 18 temas de investigación aplicada, ya concluidos exitosamente, en los que se aplican los resultados de investigación básica mencionados. Algunos de estos resultados se reflejan en los ejemplos expuestos. Estas investigaciones tienen relación con problemas de las ingenierías Mecánica, Metalúrgica, Hidráulica, Química y Eléctrica.

Los resultados se han introducido en una asignatura de pregrado y varios cursos de postgrado dedicados al tema.

Entre los colaboradores principales que tuvieron y aún tienen una participación significativa en la realización de las investigaciones de aplicación que avalan los resultados teóricos se encuentran: Alexis Cordovés, Rolando Simeón, Ricardo Avila, Benito Casals, Roberto Castillo, Raúl Santana, Genovevo Morejón, Efraím Navas, Jesús Hechavarría, Michel Lastre, Luis Suárez, Alberto Fiol y otros muchos, cuyos trabajos se encuentran reflejados en alguna medida en la bibliografía referenciada.

## Desarrollo

### I Breve descripción de la metodología y los métodos desarrollados para el análisis y la síntesis de sistemas de ingeniería

Tan solo algunas universidades de vanguardia en el mundo como el *Massachusetts Institute of Technology* (ver <http://esd.mit.edu/>) en Estados Unidos de América y otras de ese país, Europa, Asia y Australia, agrupadas en lo fundamental en el *Council of Engineering Systems Universities* (ver <http://www.cesun.org/>) empiezan a incluir, en sus sistemas de educación de pre y postgrado, enfoques orientados a la preparación y toma de decisiones de ingeniería bajo criterios múltiples.

En el presente trabajo se define el concepto *sistemas de ingeniería* como los sistemas de ayuda a la preparación y toma de decisiones bajo criterios múltiples, incluyendo indicadores de carácter subjetivo propios del diseño, la generación de tecnologías, la operación de procesos, la planeación de la producción, la logística y el mantenimiento y su integración a la gestión económica de las empresas.

Se define explícitamente por el autor, por primera vez, el concepto de preparación de decisiones, aunque de forma implícita aparece reflejado en la obra de otros muchos autores [60].

La bibliografía especializada consultada carece de una metodología alternativa para el análisis y la síntesis de sistemas de ingeniería, y de su validación en un número suficientemente amplio de aplicaciones, lo que limita la aplicación del enfoque sistémico al desarrollo de aplicaciones y a la enseñanza de la Ingeniería. La metodología propuesta está destinada, por ello, a llenar este vacío.

En el año 2000 se presentaron en el libro [4] algunos resultados del entonces llamado *enfoque integrador para la concepción y el diseño de sistemas de ingeniería, para la preparación y toma de decisiones bajo criterios múltiples*. Este enfoque constituyó el punto de partida del resultado de investigación propuesto. La metodología expuesta aporta el

primer intento reflejado en la literatura científico-técnica internacional de satisfacer la necesidad de análisis y síntesis de sistemas de ayuda a la toma de decisiones de ingeniería. La solución de estas tareas incluye como componentes, por un lado, la solución de los problemas de la descomposición de tareas de gran complejidad y de la composición de soluciones entre las tareas resultantes y, por el otro, el de la conciliación de criterios interrelacionados. Se requiere conciliar decisiones entre las partes de un sistema, las funciones de las partes y del todo, en el tiempo y persiguiendo múltiples objetivos. Esta conciliación se realiza mediante una estructura, la que necesariamente está relacionada con la estructura del modelo matemático del objeto o proceso asociado. Sin embargo, en la literatura científico-técnica disponible se estudiaban tan solo las diferentes estructuras existentes para la organización de los sistemas complejos sin establecer vínculo alguno con la estructura misma del modelo matemático del sistema analizado. Esta limitación no era superada tampoco por el enfoque integrador mencionado.

Con anterioridad se formuló por el autor la Tarea de Selección de Propuestas, estudiado sus propiedades y elaborado el método de optimización discreta asociado [3]. La formulación de esta tarea aportaba un modelo del problema de conciliación de decisiones entre subtareas derivadas de la descomposición de tareas complejas de optimización discreta. No obstante, tanto el modelo como el método de solución desarrollados consideran la posibilidad de representación de los criterios como funciones separables por objetos más una componente sistémica, con la particularidad de que la magnitud de esta componente influye sensiblemente en la convergencia del algoritmo desarrollado, el que permitió enfrentar con éxito un grupo de tareas de alta complejidad, reflejadas en tres de los ejemplos presentados.

Con vistas a superar las limitaciones mencionadas fue formulada la *Tarea Generalizada de Selección de Propuestas* [4, 16], la que presupone indicadores de eficiencia no necesariamente separables. Para la solución de esta última se requiere de procedimientos que permitan hacer evolucionar códigos de solución. Esta realidad motivó formular los

rasgos esenciales del método de Integración de Variables, el que aparece publicado por primera vez en [12] y se caracteriza, en general, por hacer evolucionar poblaciones de códigos de soluciones, independientemente de los operadores que se utilicen con este fin. Se han desarrollado algunos algoritmos del método, los que resultan competitivos en relación con otros conocidos, en particular con los Algoritmos Genéticos, en la solución de tareas complejas. En la bibliografía especializada aparecen varios otros algoritmos que pudieran ser entendidos como casos particulares de este método.

Ya en [3] se proponía un esquema general de solución al problema de toma de decisiones, para sistemas organizados en estructuras jerárquicas participativas, compuesto por dos fases bien delimitadas: la fase de preparación de decisiones o de generación de opciones de decisión, y la fase de toma de decisiones o de selección de las opciones de solución previamente generadas. Sin embargo, solo ahora esta propuesta tiene un soporte material a partir de la posibilidad de solucionar la segunda fase de este esquema para un gran número de casos, incluyendo los que han sido analizados por el autor.

### **I.1 Correspondencia entre las estructuras de los procesos de toma de decisiones y de los modelos matemáticos de los sistemas asociados**

Este tema se estudia a partir de la definición predominante de sistema como conjunto de elementos interrelacionados [34, 64, 68, 69], considerando, además, los conceptos de intensidad de los enlaces y de propiedades “emergentes”.

Sean el conjunto de objetos  $A = (A_1, A_2, \dots, A_n)$ , sus enumeraciones  $S = (1, 2, \dots, n)$ , el conjunto  $X_s = (x_1^s, x_2^s, \dots, x_q^s)$  de los posibles estados de cada objeto, sus enumeraciones  $I_s = (1, 2, \dots, q_s)$ , y el conjunto de relaciones  $G_j$  definidas entre los objetos, cada una de las cuales es un subconjunto de la multiplicación cartesiana de los elementos de  $A$ , o sea,

$$G_j \subset (A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n)$$

La *intensidad*  $g_j$  de cada relación  $G_j$  entre los elementos de un sistema es función del estado adoptado por cada objeto  $s \in S$ , o sea  $g_j = g_j(e^k)$ ,  $\forall e^k \in E = (I_1 \times I_2 \times \dots \times I_n)$ . Las

intensidades de las relaciones entre los objetos (elementos) de un sistema suelen estar restringidas superior o inferiormente.

Las propiedades resultantes de la interacción entre los elementos, denominadas en algunos trabajos como “emergentes”, Y del sistema dependen de los valores de las variables de estado. Tomando en cuenta que en este trabajo se presta principal atención a los sistemas de ingeniería, estas propiedades se denominan, en lo adelante, como indicadores de eficiencia. Algunos de estos indicadores pueden ser cuantificables como función del estado del sistema, mientras que otros pueden ser tan solo evaluables uno a uno para cada estado posible del sistema.

Se denomina *sistema* a todo conjunto de los objetos, sus relaciones y las propiedades resultantes de las interacciones. Es decir, el sistema está constituido por la triada:

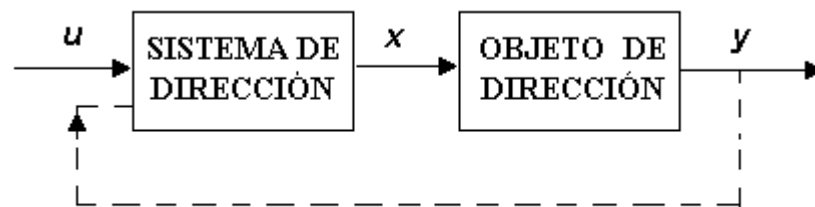
$$\text{Sistema} = (A, G, Y).$$

### **I.1.1 Sistemas de dirección**

En general, todo sistema de dirección se puede representar de la forma mostrada en la figura 1 [44, 45]. El sistema de dirección actúa sobre el sistema - objeto y obtiene información de él sobre el resultado de las acciones aplicadas anteriormente. Además, y esto resulta esencial, el sistema director recibe también acciones directivas externas que deben ser satisfechas [44, 45]. Si se toma como sistema director una empresa de producción y como sistema - objeto (o simplemente objeto) al conjunto de sus talleres, las acciones de dirección externas pueden ser ejercidas, por ejemplo, por una corporación a la que puede estar subordinada la empresa. En este caso, el sistema de dirección estudiado cumple, a los efectos de la corporación, la función de un elemento más del objeto de dirección. Como se puede apreciar, de la corporación emanan directivas de carácter general y el aparato empresarial realiza un conjunto de acciones sobre el objeto de dirección encaminadas al logro de las tareas emanadas del sistema mayor (la corporación). El objeto de dirección sufre determinadas perturbaciones del medio

circundante, es decir, influencias inesperadas sobre las cuales muchas veces no se dispone de información. Ejemplos de perturbaciones se pueden considerar el mal tiempo, variaciones en el mercado, averías en el proceso productivo, y otras.

Se necesita, de tal forma, de un sistema de dirección (del sistema objeto) que tome las decisiones adecuadas y las ejecute. Como consecuencia de las relaciones existentes entre los elementos del objeto, las decisiones que se adopten para todo el sistema tienen que estar conciliadas por los diferentes elementos del sistema de dirección. Dicho de otra forma, la estructura compleja del sistema objeto condiciona, en el caso más general, una estructura compleja del sistema de dirección [26, 34, 38, 42, 44, 52, 57, 64].



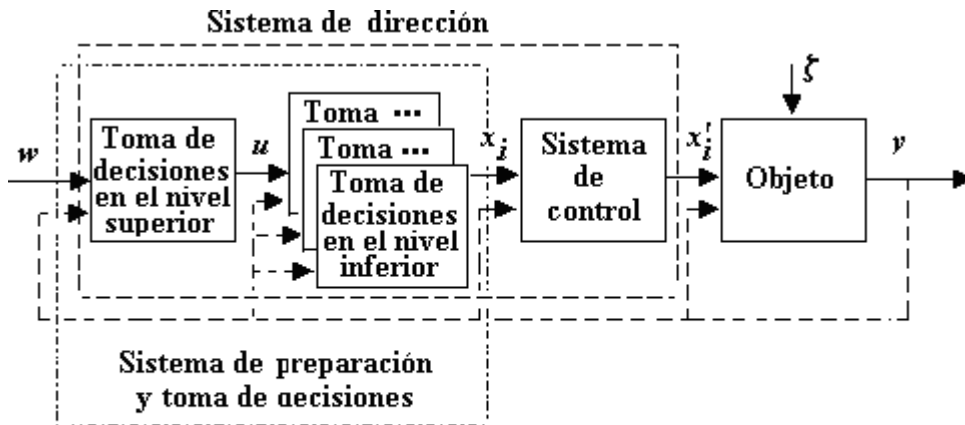
**Fig. 1. Representación general de un sistema de dirección.**

La toma de decisiones para todo el objeto requiere, como se analiza más adelante, de la preparación de decisiones por cada elemento del sistema y de la posterior conciliación de decisiones entre ellos.

Para hacer cumplir las decisiones adoptadas, el sistema director necesita de un sistema de control [45, 58, 66] encargado de asegurar la ejecución de estas decisiones. El procesamiento de la información sobre el resultado de las acciones ejecutadas y su presentación en forma asequible al sistema director requiere de un sistema de información. En el caso general, la estructura del sistema de control está estrechamente relacionada con la estructura del sistema de toma de decisiones, pero este estudio se escapa de los objetivos del epígrafe. De tal forma, el sistema de dirección analizado pudiera representarse según se muestra en la figura 2.

En lo adelante, las acciones externas serán representadas mediante la letra  $w$ ; las acciones de todo el sistema, por la letra  $u$ ; las acciones del sistema de dirección del

elemento  $i$  del sistema objeto, por  $x_i$ ; las acciones del sistema de control sobre cada elemento del sistema objeto, por  $x'_i$  (las cuales no son idénticas a las acciones del sistema de preparación y toma de decisiones, pues aunque el sistema de control procura asegurar los valores requeridos de  $x_i$ , no siempre logra alcanzarlos. Este tema se analiza convenientemente en la bibliografía dedicada a los sistemas de control [58]). Las perturbaciones se simbolizan por la letra  $\zeta$ .



**Fig. 2. Representación de un sistema de dirección por bloques principales.**

Como acciones externas se entienden las acciones del sistema de mayor envergadura al que pertenece, en calidad de elemento, el sistema de toma de decisiones.

La cibernética es la ciencia que estudia los procesos de dirección en su sentido más amplio. Los principios generales del enfoque cibernético, expuestos por primera vez por Norbert Wiener [64, 69], fundador de esta ciencia, se utilizan como una de las bases en la elaboración de la metodología presentada, en lo adelante para el análisis y la síntesis de sistemas de ingeniería para la preparación y toma de decisiones bajo criterios múltiples.

Según el primer principio, todo objeto se encuentra bajo la acción permanente de entradas, las que determinan su estado. Las entradas dirigidas permiten variar el estado del objeto con el fin de alcanzar determinados objetivos. Las perturbaciones constituyen entradas a las que no tiene acceso el sistema de dirección y reflejan, entre otras, la acción de otros elementos del mismo sistema al que pertenece, en calidad de elemento, el sistema de dirección del objeto dado o de otros sistemas. En lo adelante, las entradas

dirigidas se simbolizan por el vector  $x = x(x_1, x_2, \dots, x_n)$  y constituyen estados que se establecen para el sistema – objeto por el sistema de dirección; las perturbaciones, por el vector  $\zeta = \zeta(\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_k)$ ; y las salidas, por el vector  $y = y(y_1, y_2, \dots, y_m)$  de las propiedades del sistema, resultantes de las interacciones entre sus elementos; el vector de variables de decisión del sistema de mayor envergadura, por  $u = u(u_1, u_2, \dots, u_n)$ , las que son resultado de los estados de los elementos del sistema. Por otra parte, cada estado del sistema - objeto determina conjuntos de posibles estados de sus elementos componentes.

De acuerdo con el segundo principio, existe un conjunto  $X$ , tal que  $x \in X$  y la tarea consiste en hallar un valor  $x^*$  que asegure que  $x^* = \arg Pref [Y(x)]$ , donde  $Pref$  designa un operador de preferencia de las soluciones de todos y cada uno de los elementos del sistema, a partir de los valores adoptados por el vector función de indicadores de eficiencia de dimensión  $m$  del sistema  $Y(x)$ ;  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in X$  vectores de decisión de todos y cada uno de los  $n$  elementos del sistema,  $x_s = (x_1^s, \dots, x_r^s) \in X_s$  variables de decisión del elemento  $s$  del sistema. Por otra parte, cada uno de los elementos del sistema se encuentra en interacción con los restantes elementos. El sistema en su integridad toma también decisiones que necesariamente influyen en el comportamiento y los valores de los indicadores de eficiencia de cada uno de sus elementos. Si se designa por  $u$  el vector de variables de decisión del sistema en su integridad, entonces  $x^* = \arg Pref [Y(u, x)]$ , asegurando un conjunto de restricciones a las intensidades de las relaciones internas  $g_j = g_j(e^k)$  del sistema, para cada posible decisión  $u \in U$ . El conjunto  $U$  está dado por las restricciones a las intensidades  $h(u)$  de las relaciones del sistema con el exterior.

Según el tercer principio, las perturbaciones no son necesariamente conocidas, o bien su conocimiento puede ser incompleto. Se debe señalar una circunstancia no estudiada por Wiener en sus trabajos: las perturbaciones pueden ser el resultado de la acción sobre el sistema dado de otros sistemas que se encuentran relacionados con él; mientras mayor sea el grado de organización de un sistema, menor será la influencia de las perturbaciones sobre cada elemento que lo conforma. Así, si el sistema estudiado concilia sus decisiones

con el de mayor envergadura, del cual es un elemento componente, los valores que adoptan las variables de decisión de los otros sistemas vinculados pueden constituir simplemente datos de entrada a tomar en cuenta, mientras que, en ausencia de conciliación, los valores desconocidos de estas variables constituyen perturbaciones no conocidas.

El cuarto principio indica la necesidad en la retroalimentación del sistema de dirección con la información sobre el estado real del objeto, de forma de poder rectificar las acciones directivas según se haga necesario.

Este principio es especialmente válido para los sistemas que trabajan en tiempo real. La consideración de la dependencia de  $x$ ,  $\zeta$ ,  $y$  con respecto al tiempo es estudiada por la Teoría de Control. Los sistemas de ingeniería ocupados del diseño de productos, tecnologías, herramientas, etc., preparan decisiones que mantienen su vigencia por un período prolongado, por lo que en estos sistemas la dependencia del tiempo de las variables  $x$ ,  $\zeta$ ,  $y$  puede ser tomada en consideración mediante la actualización periódica de las condiciones iniciales.

La gran complejidad de los sistemas reales condiciona la necesidad de establecer sistemas de toma de decisiones por cada uno de los elementos del objeto de dirección y de tomar en consideración las relaciones existentes entre estos elementos, mediante la interrelación de los sistemas de dirección individuales; es decir, hace necesario el establecimiento de determinadas estructuras de los sistemas de toma de decisiones. Según se verá en lo adelante, la selección de la estructura organizativa más adecuada de los sistemas está determinada por la estructura de su descripción matemática (modelo matemático).

A partir de la definición del concepto de sistema y de la interpretación del segundo principio del enfoque cibernético realizadas, la estructura general de los modelos matemáticos de los sistemas de toma de decisiones se puede expresar como:

$$Pref \{ Y(u, x) / h(u) \geq 0; g(u, x) \geq 0 \} \quad (1)$$

Donde:

*Pref*: Designa un operador de preferencia de las soluciones de todo el sistema  $(u, x)$  a partir de los valores adoptados por  $Y(u, x)$ .

$Y(u, x)$ : Vector función de indicadores de eficiencia, de dimensión  $m$ , del sistema.

$g(x, u)$ : Vector función de dimensión  $k$  de intensidades de relaciones entre los elementos del sistema.

$h(u)$ : Vector función de intensidades del sistema de mayor envergadura, del que el sistema estudiado constituye un elemento.

$x = (x_1, \dots, x_n) \in X$ : Vectores de decisión de todos y cada uno de los  $n$  elementos del sistema.

$x_s = (x_1^s, \dots, x_r^s) \in X_s$ : Variables de decisión del elemento  $s$  del sistema.

$u = (u_1, \dots, u_p)$ : Vector de variables de decisión, de dimensión  $p$ , del sistema.

Cada componente de la decisión del sistema describe su estado y puede tener sus componentes por cada elemento. Es decir,  $u$  puede constituir una matriz, con columnas dadas por  $u_i = u_i(u_i^1, u_i^2, \dots, u_i^n)$ , donde  $u_i^s$  es la variable de coordinación  $i$  del elemento  $s$  del sistema.

Los componentes de  $u = (u_1, u_2, \dots, u_p)$  constituyen variables de decisión de todo el sistema y afectan no solo la propia calidad de funcionamiento, dada por los valores de los componentes de  $Y(u, x)$ , sino también la del sistema de mayor envergadura del cual constituye un simple elemento.

Cada una de las funciones componentes del vector función  $Y(u, x)$  define un objetivo concreto de funcionamiento del sistema. Las restricciones a las intensidades de las relaciones  $g_i^{inf} \leq g_i(x, u) \leq g_i^{sup}$  dependen, como regla, tanto de las variables de decisión de los elementos como de las de todo el sistema. En el caso general, los valores  $g_i^{inf}$  y  $g_i^{sup}$  pueden también constituir funciones del vector  $u$ . Como consecuencia de la diferenciación que establecen los elementos del sistema, una parte de las restricciones (o todas) suelen estar agrupadas por elementos. Se establecen asimismo restricciones a las variables de

decisión de los elementos  $x_i^{inf} \leq x_i \leq x_i^{sup}$ . El conjunto de restricciones del sistema condiciona la presencia de un espacio de existencia  $X_s$  para cada elemento  $s \in S$ ; del espacio de existencia  $X$  para el conjunto de variables de decisión de los elementos del sistema, y del espacio de existencia  $U$  para las variables de decisión de todo el sistema, las que relacionan el sistema dado con otro de mayor envergadura del cual es, asimismo, parte componente.

Las componentes de  $Y(u, x)$  pueden tener expresión numérica o ser tan solo evaluables subjetivamente. Para algunos de los componentes con expresión numérica de  $Y(u, x)$  puede requerirse la operación de minimización, y para otros se requiere la operación de maximización. Algunos de los indicadores de eficiencia pueden tener carácter aleatorio a partir de la indeterminación de las entradas dadas por el comportamiento azaroso del medio circundante o por cierto grado de indeterminación de la propia descripción matemática del proceso. Algunas restricciones o incluso indicadores pueden tener carácter difuso, como resultado de los límites imprecisos derivados del comportamiento borroso, impreciso, de los conjuntos de definición de las variables correspondientes. Las particularidades de cada modelo imponen enfoques particulares para la búsqueda de solución a la tarea correspondiente. En lo adelante, aquellos componentes de  $Y(u, x)$  que son cuantificables se sustituyen por los componentes de  $Z(u, x)$ , dados por  $z_j(u, x) = \theta_j y_j(u, x)$ .

Donde:

$$\theta_j = \begin{cases} 1 & \text{si el indicador } y_j(u, x) \text{ debe ser minimizado} \\ -1 & \text{si el indicador } y_j(u, x) \text{ debe ser maximizado} \end{cases}$$

mientras que los componentes no cuantificables se toman en consideración mediante la elección de una solución con valores de los componentes de  $Z(u, x)$  próximos a:

$$\text{Min} \{ Z(u, x) / h(u) \geq 0; g(u, x) \geq 0 \} \quad (2)$$

Como el modelo (2) constituye una aproximación al modelo (1), en correspondencia con lo estudiado en [38] las soluciones a (1) se encuentran entre las soluciones a (2) que se diferencian por cada uno de los criterios  $z_i(u, x)$ , en no más de una cierta magnitud  $\alpha_i$ .

Existe una gran variedad de casos particulares de posibles formulaciones del modelo general (2), las que se corresponden con respectivos enfoques de solución. A continuación se muestran algunos de ellos coincidentes con estructuras muy difundidas en las organizaciones y en la ingeniería. Los esquemas de solución expuestos se fundamentan en esquemas asociados de descomposición de las correspondientes tareas de toma de decisiones y se vinculan con la experiencia del autor. Pueden existir, seguramente, otros esquemas alternativos.

Muchos autores se han ocupado del estudio de las estructuras organizativas. Entre los trabajos que a juicio del autor tienen una fundamentación basada en enfoques sistémicos se encuentran [2, 26, 42, 44, 49, 53, 61, 68]. En el campo de las aplicaciones se establecen las estructuras de conciliación de decisiones de acuerdo con las particularidades de la tarea a solucionar [26, 42, 57, 71]. Sin embargo, en la literatura disponible no se analiza la relación existente entre la estructura matemática de la tarea de toma de decisiones y la estructura adecuada del proceso de toma de decisiones. A continuación se estudian algunas estructuras específicas del modelo (2) que sugieren esquemas de descomposición en estructuras semejantes a las utilizadas por el ser humano. Con seguridad la investigación ulterior del tema enriquecerán los resultados que se proponen.

Sea (2) representable en la forma:

$$\text{Min } \{ Z(z_1(x_1), \dots, z_n(x_n)) / g(x_s) \geq 0; \forall s \in S \} \quad (3)$$

Donde:

$Z(z_1, \dots, z_n)$ : Vector de funciones monótono crecientes de sus argumentos, de dimensión  $m$  de todo el sistema.

$g(x_s)$ : Vector de funciones, de dimensión  $r_s$ , de intensidades de relaciones del elemento  $s$  del sistema.

$x_s$ : Vector de variables de decisión, de dimensión  $n_s$ , del elemento  $s$  del sistema.

$z_s$ : Vector de funciones, de dimensión  $m_s$  del elemento  $s$  del sistema.

La solución de (3) se reduce a la solución independiente de tareas de menor dimensión:

$$\text{Min } \{ z_s(x_s) / g_s(x_s) \geq 0; \forall s \in S \} \quad (4)$$

Es decir, si la tarea de toma de decisiones tiene la estructura o es próxima al modelo (3), entonces ella puede ser resuelta mediante la búsqueda de soluciones a las subtareas componentes, lo que es consecuencia de la debilidad de los enlaces de los elementos del sistema entre sí.

En este caso, el modelo (3) de la tarea de toma de decisiones se denomina directamente descomponible. La estructura organizativa más adecuada del sistema se conoce como *estructura descentralizada* y se caracteriza por la existencia de sistemas independientes por cada elemento del sistema. No se requiere, por tanto, la conciliación de decisiones entre los subsistemas (subtareas).

La aplicación de esta estructura en sistemas, que no satisfacen plenamente los requisitos anteriores, conduce a sistemas de toma de decisiones que, aunque simples, se caracterizan por espacios reducidos de existencia de solución para cada sistema como resultado de la no consideración de las relaciones entre los elementos, lo que condiciona la máxima intensidad e indeterminación de las perturbaciones que actúan sobre los sistemas aislados. Al mismo tiempo, en la mayoría de los casos las soluciones eficientes de los sistemas se hallan en la frontera de existencia de solución, por lo que la reducción de este espacio equivale a la disminución del número de posibles alternativas a seleccionar y, por lo tanto, a la reducción, como regla, de la calidad de la solución.

En la práctica del diseño de sistemas prevalece la tendencia a la solución independiente de las tareas, lo que se corresponde con la organización de estructuras de este tipo. No obstante, como los sistemas reales se caracterizan por la presencia de relaciones esenciales entre los elementos del sistema objeto, se puede concluir que el campo de aplicación de esta estructura está básicamente restringido a los casos cuando el costo de diseño e implantación de un sistema de dirección para la conciliación de decisiones entre los elementos del sistema objeto es mayor que las pérdidas derivadas de su ausencia, o cuando el conocimiento insuficiente de las tareas vinculadas impide el desarrollo de procedimientos efectivos de conciliación de decisiones.

### **Ejemplo 1: Generación de tecnologías de soldadura por explosión**

Una de las vías de conciliar propiedades mecánicas y tecnológicas diferentes, con bajos costos de producción, la constituyen las tecnologías de soldadura y conformado por explosión. El uso de la energía de la explosión para la fabricación de semiproductos y piezas se caracteriza por equipamientos relativamente sencillos, por concentrar altos niveles de energía en pequeños volúmenes y costos relativamente bajos. Sin embargo, requiere de métodos cuidadosos de manipulación y de la generación de tecnologías científicamente fundamentados [24].

Los bimetales fabricados con tecnologías de soldadura por explosión pueden ser aplicadas con efectividad en el desarrollo, por ejemplo, de partes componentes de recipientes sometidos a alta presión y que trabajan en medios altamente corrosivos en la industria biotecnológica, química, petroquímica, metalúrgica, entre otras muchas aplicaciones. Estas tecnologías no requieren de instalaciones complejas y resultan económicamente competitivas con respecto a otras tecnologías de fabricación de bimetales que sí las requieren.

### **Formulación del problema de generación de la tecnología**

La tarea de generación de tecnología de soldadura por explosión de metales consiste en lo siguiente: se requiere definir el tipo y la altura de la capa de un material explosivo dado depositada sobre una de las piezas de metal, denominada pieza volante, la separación entre las planchas, de materiales y espesores dados, de forma tal de asegurar, una vez provocada la explosión, la unión bimetálica, caracterizada por una resistencia al cizallamiento no inferior a la requerida por el decisor, con una probabilidad de confianza preestablecida.

De tal forma, se dispone de los siguientes datos:  $M_1$ - material base,  $M_2$ - material de la plancha volante,  $s$ -

espesor de la plancha volante,  $\tau^{min}$ - valor mínimo de la resistencia al cizallamiento de la unión soldada, determinado por las condiciones de operación del compuesto bimetálico.

Un determinado tipo de explosivo distribuido con igual altura sobre toda la plancha volante se corresponde con una velocidad de detonación dada, la que se determina por las propiedades del explosivo. Una variable de decisión está constituida, sin dudas, por la distancia de separación entre planchas, otra está constituida por el tipo de explosivo a utilizar y la tercera, por la altura del explosivo. En este caso, el objetivo consistiría en minimizar la velocidad de detonación que asegura la resistencia al cizallamiento. Si se adopta como tercera variable de decisión la velocidad de detonación, entonces el objetivo sería minimizar la altura del explosivo. Esta última composición de variables es la que se utiliza en este ejemplo.

Dado el desarrollo alcanzado hasta el momento en el estudio de los fenómenos físicos que tienen lugar durante la soldadura por explosión, la única vía de caracterización de las propiedades es la experimentación.

Así, la composición de variables de decisión de la tarea estudiada es  $D$ - velocidad de detonación de la sustancia explosiva empleada,  $h$ - espacio que separa las planchas que se sueldan,  $E$ - tipo de explosivo a seleccionar. El indicador de eficiencia adoptado es  $H$ - altura de explosivo depositado sobre la plancha volante. Se requiere satisfacer la restricción  $\tau(D, h, E) - 3S \geq \tau^{min}$ .

Donde:

$\tau$ : Resistencia al cizallamiento promedio, obtenida como resultado de la explosión.

$S$ : Error estándar de la ecuación de regresión obtenida como resultado del procesamiento de los datos del diseño experimental. El coeficiente 3 establece el requisito de asegurar una probabilidad no inferior al 99,8% de superar la resistencia al cizallamiento requerida por el decisor.

De tal forma, el modelo matemático para generar la tecnología se puede plantear de la siguiente forma:

$$\text{Minimizar } H(D, E)$$

Asegurando el cumplimiento de la restricción

$$\tau(D, h, E) - 3S \geq \tau^{min}$$

Se adicionan restricciones a los intervalos de variación admisibles a la separación entre planchas y a la velocidad de detonación del explosivo.

Para cada par de metales y cada tipo de explosivo que se va a utilizar se requiere realizar su caracterización con el fin de identificar los parámetros del modelo a emplear. En lugar de la función objetivo propuesta se puede introducir más de un objetivo, tomando en cuenta el costo del explosivo a utilizar, etc. Pero para esto se requeriría de la descripción matemática del proceso de soldadura por explosión de un amplio surtido de bimetales y de tipos de explosivos.

Aunque el diseño de la instalación tecnológica a la que prestará servicio el bimetal tiene que ver con la elección de los metales componentes y de sus dimensiones, no tiene sentido, en el estado actual del conocimiento de esta tecnología, integrar en un solo sistema la tecnología de fabricación de la instalación con la de fabricación del bimetal, por lo que el sistema de generación de la tecnología de fabricación del bimetal responde necesariamente, por el momento, a una estructura descentralizada. Por supuesto, en el software desarrollado se tiene la posibilidad de incrementar paulatinamente los pares de metales componentes y los posibles explosivos a emplear. Pero, por el momento, el modelo matemático expuesto se soluciona para bimetales y explosivos seleccionados por el usuario, entre los ya estudiados. Se hace uso del método de Exploración en una Red de Variables con penalización por el incumplimiento de las restricciones.

Sea (2) representable en la forma:

$$\text{Min} \{ Z(Z_1(u, x_1), \dots, Z_n(u, x_n))/h(u) \geq 0; g_s(u, x_s) \geq 0; \forall s \in S \} \quad (5)$$

Es decir, la eficiencia y las condiciones de funcionamiento de todo el sistema y de cada uno de sus elementos dependen del valor de todas y cada una de las variables de coordinación, las que, en este caso, *no son separables por los elementos del sistema*.

La solución de (5) se reduce a la solución de

$$\text{Min} \{ Z(Q_1(u), \dots, Q_n(u)) / h(u) \geq 0 \} \quad (6)$$

Donde:

$$Q_s(u) = \text{Min} \{ Z_s(u, x_s) / g_s(u, x_s) \geq 0 \} ; \quad \forall s \in S, u / h(u) \geq 0 \quad (7)$$

$$x_s = x_s^{opt}(u) \quad (8)$$

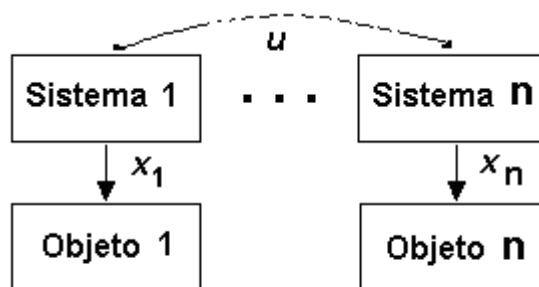
Si la estructura de la tarea de toma de decisiones tiene la forma o resulta próxima a (5), entonces ella puede ser solucionada mediante:

- La búsqueda de solución a (7), para cada elemento  $s$  del sistema, para valores discretizados admisibles de las variables de coordinación  $u$ , o todos sus valores admisibles, en el caso de un número finito de valores de  $u$  discreta.
- La determinación de las funciones de aproximación  $Q_s(u)$  y  $x_s = x_s^{opt}(u)$ .
- La solución del modelo aproximatorio (6) con el fin de hallar valores próximos al óptimo de  $u = (u_1, u_2, \dots, u_k)$ .

- El cálculo de los valores de  $x_s^{opt}(u)$ , para  $u = u^{opt}$ .

La estructura organizativa más adecuada del sistema se denomina *estructura disperso-conciliada* y se caracteriza por la solución independiente de las tareas de toma de decisiones, para diferentes valores de las variables de coordinación  $u$ , en el caso de las tareas discretas, o la elaboración de funciones de aproximación para cada elemento concreto del sistema, que caracterizan la influencia de sus propias decisiones sobre los indicadores del sistema. A partir de las funciones  $Q_s(u)$  se puede hallar los valores más adecuados de  $u$ . En la práctica, la solución de tareas de toma de decisiones por esta estructura se realiza para los casos en los que la dimensión del vector  $u$  es muy pequeña, dada la complejidad de elaboración de las funciones  $Q_s(u)$ ,  $x_s = x_s(u^{opt})$  con errores de aproximación aceptables para dimensiones de  $u$  superiores a 4.

En el proceso de funcionamiento, cada órgano ejecuta la recepción y la elaboración de la información correspondiente y la entrega de la acción directiva a los objetos subordinados. Para la realización de la función de toma de decisiones, cada órgano local entra en intercambio informativo con los otros órganos de toma de decisiones. Como resultado de este intercambio se concilian las acciones de los diferentes sistemas entre sí. En la figura 3 se brinda una representación gráfica de esta estructura.



**Fig. 3. Estructura disperso-conciliada.**

**Ejemplo 2: Conciliación del régimen térmico en hornos metódicos y del régimen de deformación del acero en molinos de laminación**

Se dispone de un sistema computacional destinado para la síntesis de calibraciones de molinos de laminación de perfiles [4, 17]. Este sistema permite, entre otras tareas, elaborar funciones  $E_L(T, p)$  que

caracterizan la energía necesaria para deformar 1 tonelada de palanquilla hasta el perfil requerido como función de la temperatura de inicio de laminación (fin del calentamiento).

Un segundo sistema [4, 17] debe elaborar el régimen térmico de un horno de calentamiento de forma tal de minimizar la energía total en calentar y en deformar cada tonelada de palanquilla procesada.

### Formulación de la tarea de conciliación

Minimizar

$$E_T = E_H(T, \rho) + E_L(T, \rho) \quad (9)$$

Asegurando

$$T_{sup}(T, \rho) \geq T_{sup}^{min} \quad (10)$$

$$\Delta T_{s.c.} \leq \Delta T_{s,c}^{max} \quad (11)$$

Donde:

$E_H(T, \rho)$ : Energía necesaria para calentar cada tonelada de palanquillas desde la temperatura circundante hasta la temperatura  $T$ , con una productividad  $\rho$ .

$E_L(T, \rho)$ : Energía necesaria para deformar la palanquilla desde sus dimensiones iniciales a las del producto terminado.

$T_{sup}$ : Temperatura calculada de la superficie del acero a la salida del horno.

$T_{sup}^{min}$ : Valor mínimo establecido para  $T_{sup}$ .

$\Delta T_{s,c}$ : Diferencia de temperatura calculada entre la superficie y el centro de la palanquilla a la salida del horno.

$\Delta T_{s,c}^{max}$ : Valor máximo establecido, como dato de entrada, para  $\Delta T_{s,c}$ .

La solución de la tarea de optimización formulada por alguno de los métodos iterativos de la Programación No lineal constituye la solución a la tarea de conciliación del funcionamiento de ambos sistemas, en correspondencia con la estructura disperso-conciliada.

Sea (2) representable en la forma:

$$\text{Min} \{ Z(u_1(x_1), \dots, u_n(x_n)) / g(u_1(x_1), \dots, u_n(x_n)) \geq 0 \} \quad (12)$$

Entonces, su solución es equivalente a la tarea de optimización en variables "agregadas"

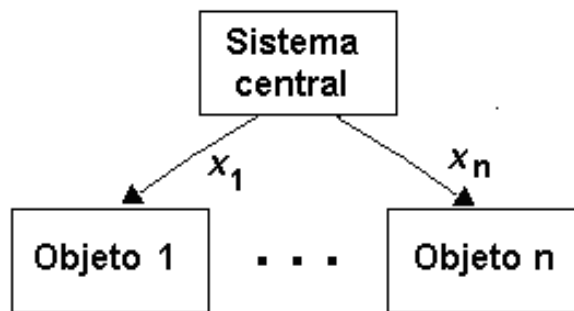
$$u_s: \quad \text{Min} \{ Z(u_1, \dots, u_n) / g(u_1, \dots, u_n) \geq 0 \} \quad (13)$$

La solución de (12) en las variables originales se determina por las raíces de las expresiones:  $u_s(x_s) = u_s^* ; \forall s \in S$  (14)

Donde:

$u_s^*$ : Valor adoptado por  $u_s$  en la solución a (13).

Si la estructura de la tarea de toma de decisiones tiene la forma o resulta próxima a (12), entonces ella puede ser solucionada mediante la búsqueda de solución a la tarea en variables agregadas (13) y de los valores de las variables de decisión para cada elemento del sistema asociados a la solución encontrada. En este caso se requiere un órgano de toma de decisiones que solucione la tarea (13) y las  $n$  tareas (14), lo que no niega la posibilidad de establecer subsistemas por elementos especializados en el cálculo de (14). Esta tarea se denomina agregable directamente. La estructura organizativa más adecuada del sistema se denomina *estructura centralizada directa* (Fig. 4) y se caracteriza por la toma centralizada de decisiones por el sistema central y su implementación directa a los elementos del sistema objeto.



**Fig. 4. Estructura centralizada directa.**

**Ejemplo 3: Planificación de la producción de un grupo de talleres que trabajan en paralelo**

Se parte del supuesto que la efectividad de todo el sistema empresarial depende básicamente de la asignación de volúmenes de producción a ser ejecutados por los diferentes elementos del sistema productivo, considerando los gastos generales en cumplir la tarea productiva como único indicador de eficiencia y los costos unitarios por producto, productividad y fondo de tiempo disponible en cada taller, independientes del volumen y las condiciones de realización del proceso productivo. Para el caso en que la capacidad de la empresa esté determinada por un grupo de talleres que trabajan en paralelo, obviando el carácter multicriterial del problema, se pudiera utilizar el siguiente modelo de Programación Lineal:

$$\text{Minimizar} \quad \sum_{i=1}^{\bar{i}} \sum_{j=1}^{\bar{j}} c_{ij} u_{ij} \quad (15)$$

$$\text{Asegurando:} \quad \sum_i \frac{u_{ij}}{p_{ij}} \leq T_j, j = (1, \dots, \bar{j}), \quad (16)$$

$$\sum_j u_{ij} \geq d_i, i = (1, \dots, \bar{i}) \quad (17)$$

Donde:

$c_{ij}$ : Coeficiente de costo para la producción del producto  $i$  en la unidad (taller)  $j$ .

$p_{ij}$ : Productividad nominal durante la producción del producto  $i$  en la unidad  $j$ .

$T_j$ : Tiempo nominal disponible en la unidad  $j$ .

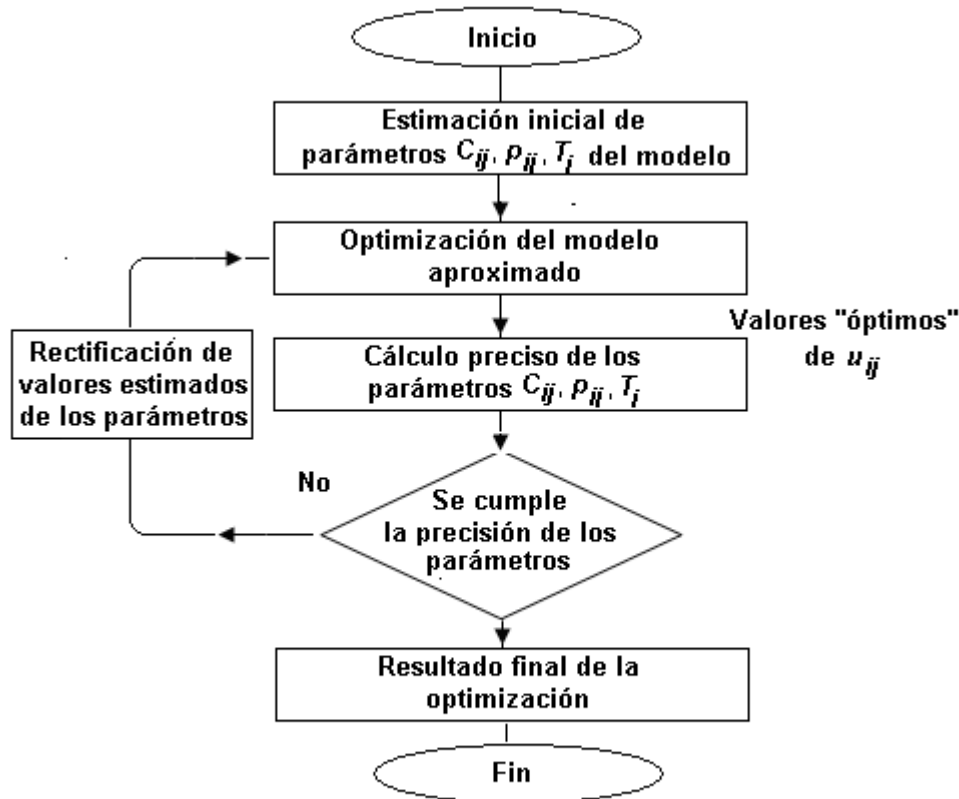
$u_{ij}$ : Producción a planificar del producto  $i$  en la unidad  $j$ .

$d_i$ : Demanda existente del producto  $i$ .

Las restricciones (16) limitan el fondo de tiempo a utilizar por cada uno de los talleres, mientras (17) aseguran el cumplimiento de los compromisos asumidos por la empresa en cada uno de los diferentes productos. El modelo pudiera contener restricciones a cualquier tipo de recursos. Con el fin de tomar en consideración la dependencia existente de los parámetros del modelo con respecto a los valores de las variables, el autor ha utilizado con éxito, en esta y otras aplicaciones, el esquema algorítmico mostrado en la figura 5. La rectificación de los parámetros del modelo se efectúa por los métodos iterativos de búsqueda de raíces a procedimientos de cálculo.

En realidad los resultados de trabajo del grupo de talleres dependen no solo de la distribución adecuada de volúmenes de producción, sino también de la calidad de ejecución de las tareas  $u_{ij}$  establecidas para cada taller  $j$  de la empresa. En el ejemplo 6 se estudia la influencia de la secuenciación de ejecución de la tarea productiva en los diferentes talleres sobre la eficiencia general del sistema productivo.

La generalización de este esquema es aplicable a la utilización de procedimientos de optimización orientados a modelos con estructura específica, tales como los estudiados por el Análisis Matemático clásico, la Programación Lineal, Cuadrática y Geométrica, entre otros, como herramientas de solución por aproximaciones sucesivas a modelos complejos de la ingeniería.



**Fig. 5. Esquema de solución de modelos aproximados mediante la corrección iterativa de sus parámetros.**

Sea (2) representable en la forma:

$$\text{Min} \{ Z(Z_1(u_1, x_1), \dots, Z_n(u_n, x_n)) / h(u) \geq 0; g_s(u_s, x_s) \geq 0; \forall s \in S \} \quad (18)$$

Es decir, la eficiencia y las condiciones de funcionamiento de todo el sistema y de cada uno de sus elementos dependen del valor de todas y cada una de las variables de decisión de todo el sistema y de cada elemento componente. Se utilizan dos esquemas posibles:

a) La solución de (15) se reduce a la solución de

$$\text{Min} \{ Z(Q_1(u_1), \dots, Q_n(u_n)) / h(u) \geq 0 \} \quad (19)$$

Donde:

$$Q_s(u_s) = \text{Min} \{ Z_s(u_s, x_s) / g_s(u_s, x_s) \geq 0 \}; \quad \forall s \in S, u / h(u) \geq 0 \quad (20)$$

$$x_s = x_s(u^{opt}) \quad (21)$$

Si la estructura de la tarea de toma de decisiones toma la forma (18) entonces ella puede ser solucionada mediante:

- La búsqueda de solución a (20), para cada elemento  $s$  del sistema, para valores discretizados admisibles de las variables de coordinación  $u$  (o todos sus valores admisibles, en el caso de  $u$  discreta).
- La determinación de las funciones de aproximación  $Q_s(u_s)$ ,  $x_s = x_s(u_s^{opt})$ .
- La solución de los modelos aproximatorios (19) con el fin de hallar valores próximos al óptimo de  $u = (u_1, u_2, \dots, u_n)$  correspondientes a valores establecidos de las variables de coordinación por el nivel central a los sistemas de toma de decisiones de todos y cada uno de los elementos del sistema.
- El cálculo de los valores de  $x_s^{opt}(u_s)$ , para  $u_s = u_s^{opt}$ .

Esta tarea se denomina agregable indirectamente. La estructura organizativa más adecuada del sistema se denomina por muchos autores *estructura jerárquica* y se caracteriza también por la toma centralizada de decisiones por el sistema central y su implementación con ayuda de los sistemas locales. La calidad de funcionamiento de esta estructura depende de la calidad de elaboración de las funciones de aproximación (20) y (21). Estas últimas constituyen reglas de conducta de los sistemas del nivel inferior [4, 17]. El autor de este trabajo hace extensiva la denominación de *estructura centralizada* a esta forma organizativa. Al igual que para la estructura disperso-conciliada la solución de tareas de toma de decisiones, por esta estructura, se realiza para los casos en los que la dimensión de los vectores  $u_s$  es muy pequeña. Esto está dado por la complejidad de elaboración de las funciones de aproximación  $Q_s(u_s)$ ,  $x_s = x_s(u_s^{opt})$ , con errores de aproximación aceptables, para dimensiones de  $u_s$  superiores a 4 (para cada  $s \in S$ ).

En la figura 6 se ilustra el modo de funcionamiento de esta variante de la estructura centralizada: el sistema de mayor nivel elabora acciones directivas que son de obligatorio cumplimiento para los sistemas del nivel inferior [3, 4, 17, 23]. Para un funcionamiento eficiente de esta estructura se requiere de la utilización de funciones de aproximación de las acciones óptimas de los sistemas del nivel inferior, dependientes de la acción directiva recibida del nivel superior. Este tipo de estructura resulta muy frecuentemente apropiada,

entre otros, para los sistemas de operación de procesos, en los que el tiempo de preparación de decisiones resulta muy limitado [45, 48, 53, 58, 66]. La calidad de funcionamiento del sistema depende de la calidad de elaboración de las funciones de aproximación mencionadas, las que constituyen *reglas de conducta* [3, 17, 23] del sistema.

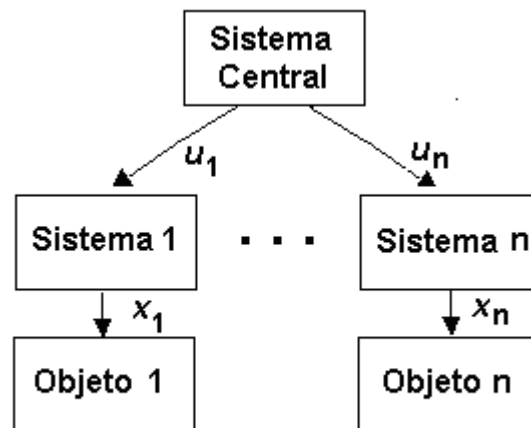


Fig. 6. Estructura centralizada.

#### Ejemplo 4: Operación de hornos de calentamiento en talleres de laminación

El estudio de esta tarea se inicia por la de mayor envergadura, de la cual ella forma parte, en calidad de subtarea. El sistema de toma de decisiones del taller de laminación debe solucionar la tarea de compatibilización del trabajo de diferentes agregados del taller al ritmo del proceso productivo, y asegurar el cumplimiento del gráfico operativo de trabajo establecido por el sistema de toma de decisiones empresarial. El objetivo del trabajo del sistema de toma de decisiones del taller consiste en la minimización de los gastos totales en calentamiento y laminación del metal, asegurando el cumplimiento de determinada tarea productiva (productividad establecida) y las propiedades mecánicas previstas para las diferentes hornadas .

La solución al modelo matemático (9)-(11) para diferentes valores de  $p$  permite hallar funciones de aproximación (es decir, próximas por sus valores numéricos), a los valores óptimos de  $T = (T_1, \dots, T_n)$  con respecto a  $p$ , donde  $T_i$  es la temperatura establecida para la zona  $i$  del horno. Estas funciones de aproximación constituyen *reglas de conducta*, las que pueden ser elaboradas separadamente para cada marca de acero  $r$  y se estudian en [17]. De tal forma, se obtiene un cierto número de funciones  $T_{i,r}(p)$ , cada una de las cuales determina el valor que se debe asignar a la temperatura  $T$  de cada zona del horno, en dependencia de la productividad que haya sido establecida por el nivel superior de la estructura centralizada estudiada, para cada marca de acero que se esté laminando [4, 17].

## Ejemplo 5: Operación óptima de ruedas desecantes

Las ventajas energéticas, económicas y medioambientales de la moderna tecnología de deshumidificación basada en ruedas desecantes han determinado el incremento de sus aplicaciones, en los últimos años, en diversos procesos industriales, los servicios y los sistemas de acondicionamiento de aire [23, 29, 30].

Se requiere elaborar un sistema automatizado para la operación de ruedas desecantes, tomando en consideración que su costo y el de una computadora personal son del mismo orden de magnitud, por lo que el sistema para la operación de la rueda tiene que ser suficientemente sencillo para poder ser implementado en un chip e integrado con el control.

Para la solución de la tarea de operación de estas ruedas se debe tener en cuenta la siguiente composición de variables:

- Variables asociadas con la necesidad a satisfacer.

$Mpi$ : Flujo de aire de proceso, el que se determina por los requerimientos de operación del sistema de acondicionamiento de aire, al que presta servicio la rueda, o bien el flujo de aire que se requiere deshumidificar en el objeto al que presta servicio.

$Wpo^{requerido}$ : Humedad requerida del aire a la salida de la rueda, determinada por la aplicación concreta.

- Indicador que caracteriza la eficiencia de la rueda.

Mínima temperatura del aire de proceso ( $Tpo$ ) a la salida de la rueda, lo que se corresponde con el mínimo consumo energético para el acondicionamiento del aire.

- Restricciones a tener en consideración.

Se debe asegurar la humedad requerida ( $Wpo^{req}$ ) a la salida de la rueda desecante

Se debe cumplir el balance energético en la rueda.

- Variables de decisión.

$rph$ : Velocidad de rotación de la rueda desecante

$TR$ : Temperatura del aire de regeneración.

En condiciones de operación manual, los valores de ambas variables las establece el operador buscando el mejor proceso de transferencia de calor y masa. Para su automatización se requiere elaborar un procedimiento que permita la determinación de sus valores óptimos sin la intervención humana.

- Datos de entrada.

$Tpi$ : Temperatura del aire de proceso a la entrada de la rueda desecante

$Wpi$ : Humedad del aire de proceso a la entrada de la rueda desecante

Ambos datos están determinados por las condiciones ambientales, que deben de ser medidas para una correcta operación

Así, la tarea de operación de redes desecantes se puede expresar por el siguiente modelo de optimización

$$\left. \begin{array}{l}
 \text{Minimizar: } T_{po} \\
 \text{Asegurando:} \\
 W_{po} = W_{po}^{req} \\
 \text{Energía de entrada al proceso} = \text{Energía de salida al proceso}
 \end{array} \right\} \quad (22)$$

La realización de un plan experimental permite elaborar funciones de aproximación de  $T_{po}$  y  $W_{po}$  dependientes de las entradas del proceso, lo que permite, asimismo, solucionar el modelo matemático anterior con ayuda de métodos numéricos conocidos de la Programación No lineal, para valores de las entradas correspondientes también a un diseño experimental (realizado, fuera de línea, en una PC). Como resultado del procesamiento de las soluciones obtenidas del modelo de optimización, se obtienen funciones de aproximación:

$$\left. \begin{array}{l}
 r_{ph}^{opt} = r_{ph}^{opt}(T_{pi}, W_{pi}, W_{po}^{req}, M_{pi}) \\
 TR^{opt} = TR^{opt}(T_{pi}, W_{pi}, W_{po}^{req}, M_{pi})
 \end{array} \right\} \quad (23)$$

Las funciones (23) permiten calcular, con un error conocido y determinado por los errores estándar de las ecuaciones obtenidas, los valores óptimos de ambas variables de decisión como función de las condiciones de operación. La implementación de ambas expresiones permiten establecer una estructura centralizada del sistema de operación en la que el nivel central establece los valores  $W_{po}^{req}$ ,  $M_{pi}$  y cada uno de los dos sistemas del nivel inferior calculan los valores requeridos de  $r_{ph}$  y  $TR$  para valores medidos de  $T_{pi}$ ,  $W_{pi}$ . En la elaboración de funciones de este tipo el autor utiliza asiduamente funciones de aproximación logarítmico-posinomiales o logarítmico-signomiales [4, 17, 23]. En caso que la precisión de las funciones (23) sea inferior a los requerimientos establecidos, en lugar de estas funciones se puede implementar un algoritmo de operación basado en comandos del tipo “if condición then acción” a partir de los resultados obtenidos de la solución fuera de línea del modelo matemático (22), o bien implementar un sistema extremal para la búsqueda, en los entornos determinados por los intervalos de confianza de ambas variables, de sus valores óptimos (de mínimo consumo energético), a partir de los valores calculados por ambas reglas de conducta.

b) Su solución es equivalente a:

$$\text{Min} \{ Z(Z_1(u_1^*, x_1), \dots, Z_n(u_n^*, x_n)) / h(u^*, x) \geq 0; x_s \in X_s^\alpha; \forall s \in S \}, \quad (24)$$

donde:

$$u^* = \arg \{ \text{Min} [ Z(Q_1(u_1), \dots, Q_n(u_n)) / h(u) \geq 0 ] \} \quad (25)$$

$$Q_s(u_s) = \text{Min} \{ Z_s(u_s, x_s) / g_s(u, x_s) \geq 0 \} ; \quad \forall s \in S, u / h(u) \geq 0 \quad (26)$$

$$\left. \begin{aligned} X_s^\alpha &= \{ x_s / Z_s^{\text{min}} \leq Z_s(u_s^*, x_s) \leq Z_s^{\text{min}} + \alpha \} \\ Z_s^{\text{min}} &= \text{Min}[Z_s(u_s^*, x_s) / g_s(u_s^*, x_s) \geq 0] \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

La tarea de toma de decisiones con la forma (18) puede ser solucionada a partir de la búsqueda de solución a (24), para valores de  $u^*$  hallados mediante la solución del modelo aproximatorio de optimización (25). En la determinación de las funciones  $Q_s(u_s)$ , que forman parte de este modelo, se aproximan los valores óptimos de las funciones  $z_s(u_s, x_s)$  en el espacio de existencia de cada elemento  $s$  del sistema. En esta aproximación predomina la influencia de  $u$ . Es decir, las funciones  $Q_s(u_s)$  reflejan la influencia del sistema estudiado sobre el de mayor envergadura, del cual él es parte componente. Los espacios de búsqueda de solución se reducen a los conjuntos  $X_s^\alpha$  de soluciones próximas al óptimo local de cada elemento  $s$  del sistema. La estructura organizativa más adecuada se denomina *estructura jerárquica* y se caracteriza por la toma centralizada de decisiones en variables agregadas, las que permiten realizar una previa conciliación de los espacios de existencia locales y la búsqueda de la solución de mejor compromiso, en las variables de decisión de los sistemas del nivel inferior que mejor satisfacen los intereses de todo el sistema. La calidad de funcionamiento de esta estructura depende de la calidad de elaboración de los modelos de aproximación (25), de la generación de espacios  $X_s^\alpha$  suficientemente completos, para valores  $\alpha$  dados, y de la utilización de métodos adecuados para seleccionar la mejor combinación de opciones entre los elementos del nivel inferior mediante la búsqueda de solución al modelo (24).

El autor de este trabajo denomina *estructura jerárquica participativa* a esta forma de organización de los sistemas para diferenciarla de la estudiada anteriormente.

En esta estructura (Fig. 7), el sistema del nivel superior elabora acciones directivas, generalizadoras del funcionamiento de todo el sistema, para cada sistema del nivel inferior; cada uno de estos últimos halla alternativas de cumplimiento de la acción recibida ordenadas

de acuerdo con un criterio local de eficiencia y entrega estas opciones, en calidad de propuestas, al sistema del nivel superior. En una tercera etapa, el sistema del nivel superior selecciona una combinación de propuestas de los sistemas del nivel inferior que satisface, de la mejor manera (optimiza), un criterio de eficiencia generalizador para todo el sistema [3]. Este tipo de estructura resulta muy apropiada para los sistemas de carácter organizativo. La optimalidad de las decisiones adoptadas mediante la solución del sistema (24)-(27) se demuestra en el trabajo [35] y en [3, 4] y se deducen los algoritmos de cálculo del error de una solución aproximada.

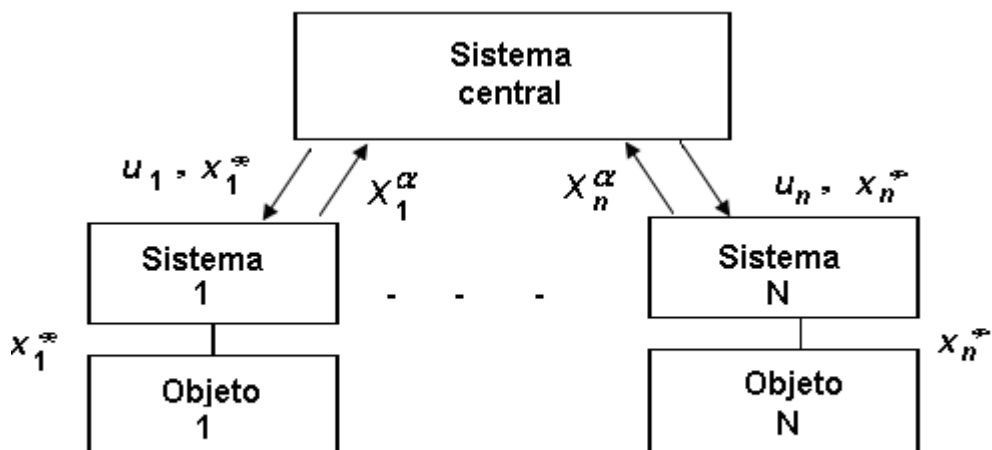


Fig. 7. Estructura jerárquica participativa.

**Ejemplo 6: Conciliación de gráficos de producción de grupos de talleres que trabajan en paralelo**

Sea un grupo de talleres de producción  $S = (1, 2, \dots, s_0)$  que trabajan en paralelo, es decir, tienen comunidad de fuentes de suministro de materia prima y comunidad de potenciales consumidores de su producción terminada. De tal forma, ninguno de los talleres del grupo consume la producción de los restantes directa o indirectamente. A cada uno de estos talleres el nivel superior (empresarial) le establece un plan volumétrico de producción de diferentes tipos de productos. Se requiere elaborar las secuencias de todos los talleres que realicen de la mejor forma el plan establecido, con el mínimo de costos empresariales. Sea la demanda de la producción del grupo de talleres expresada por:

$$A(t) = \{A_1(t), \dots, A_m(t), \dots, A_{m_0}(t)\} \quad (28)$$

Cada elemento de  $S$  tiene que cumplir un plan establecido por la empresa a partir del empleo de un modelo del tipo (15)-(17) expuesto en el ejemplo 3, de cada uno de los productos  $m$  del conjunto de productos  $M$  a satisfacer por el grupo de talleres (valores de los vectores  $u_s$  del nivel jerárquico superior, expresados como cantidades de producción de cada uno de los productos a ejecutar en cada taller en el período planificado).

Se busca solución a la tarea de obtención de combinaciones  $\alpha$ -óptimas de secuencias de trabajo de todos los talleres. Se supone que para cada taller aislado existe un método de generación de secuencias  $\alpha$ -óptimas en la realización de la tarea a él asignada, tomando en consideración las restricciones internas de ese taller. Sea el conjunto de secuencias  $\alpha$ -óptimas de cada taller:

$$K_s = (1, 2, \dots, k, \dots, k_s), \quad (29)$$

ordenados por los valores de pérdidas en el taller:

$$Z_1^s < Z_2^s < \dots < Z_k^s < \dots < Z_{k_s}^s \quad (30)$$

Dado el producto de conjuntos:

$$E = K_1 \times \dots \times K_s \times \dots \times K_{s_0} \quad (31)$$

Se requiere minimizar una función objetivo. En calidad de esta última se adopta la suma de las pérdidas locales más las pérdidas sistémicas:

$$Z = \sum_{s \in S} Z_k^s + \varepsilon(e^k) \quad ; \quad \forall e^k \in E \quad (32)$$

Los elementos de la serie de pérdidas asociadas a las diferentes opciones de gráficos pueden estar constituidos por magnitudes vectoriales. En ese caso (32) expresa un vector de funciones.

Esta tarea se enfrenta en por primera vez por el autor de este trabajo [3]. Posteriormente, ha sido trabajado intensamente por muchos autores [34, 71, 72]. En los ejemplos 10, 11, 12 y 14 se proponen esquemas de solución a tareas de ingeniería de alta complejidad, utilizando el esquema de descomposición propio de esta estructura.

En la estructura jerárquica las decisiones son preparadas conjuntamente por el centro (sistema de toma de decisiones de todo el objeto) y por los sistemas de toma de decisiones del nivel inferior (ocupados en la toma de decisiones de cada elemento componente del objeto complejo), con la particularidad de que el centro soluciona tareas en variables agregadas, mientras que cada sistema del nivel inferior actúa sobre el elemento correspondiente, con total independencia, persiguiendo un objetivo local y asegurando el cumplimiento de la decisión agregada del centro [34].

El proceso de generación de los espacios  $X_s^\alpha$ ,  $\forall s \in S$  constituye un proceso de preparación de decisiones, mientras que el proceso de selección de la combinación más adecuada de decisiones constituye un proceso de toma de decisiones.

En los sistemas con estructura jerárquica participativa de tres niveles la determinación de la acción directiva  $u$ , de todo el sistema, obedece al mismo enfoque, quedando todo el proceso de preparación y toma de decisiones como sigue:

- A partir de la acción directiva  $w$ , procedente del primer nivel, en el segundo nivel se genera, con ayuda del modelo matemático (20), el espacio  $U_s^\alpha$  de posibles opciones del sistema estudiado.
- Se selecciona, por el sistema de mayor envergadura (primer nivel), la opción que satisface el mejor compromiso entre los indicadores de eficiencia a ese nivel, considerando el conjunto de sistemas que se encuentran en el segundo nivel.
- Entrega de la acción directiva  $u$  a los sistemas del tercer nivel.
- Generación de los espacios  $X_s^\alpha$ ,  $\forall s \in S$  por los sistemas de tercer nivel al sistema del segundo nivel.
- Selección por el sistema mayor (del segundo nivel) de aquella combinación de opciones que mejor satisface las preferencias a ese nivel.

De tal forma, tiene lugar un proceso de determinación, paso a paso, de los valores de las variables de decisión, desde el mayor nivel de agregación hasta el menor.

Los sistemas de ingeniería están destinados a la solución de tareas de preparación y toma de decisiones, relacionadas con la actividad del ingeniero en las instituciones productivas y se caracterizan por el carácter global de las decisiones que se requieren preparar. No existen tareas de ingeniería aisladas y, por lo tanto, las soluciones preparadas por diferentes sistemas requieren, en el caso general, ser conciliadas entre sí.

Por esta razón, los principios para el diseño de sistemas de ingeniería se subordinan a las leyes generales de la Teoría de Sistemas [48, 52, 64, 68, 69]. En particular, la tarea de conciliación del funcionamiento de estos sistemas obedece a las leyes generales de la

conciliación de los sistemas. Así mismo, la definición de las tareas a ser solucionadas responde a las leyes generales de descomposición de la tarea de toma de decisiones de los objetos complejos.

Por lo anterior, resulta de particular importancia el estudio de enfoques adecuados para la conciliación de la toma de decisiones, en particular para la organización de la toma de decisiones en los sistemas jerárquicos. En lo adelante se utilizan los esquemas de organización de las estructuras de preparación y toma de decisiones sobre la base de la estructura de los modelos matemáticos de los procesos correspondientes.

Se requiere, por tanto, definir cuales son las tareas que han de solucionarse y cómo ellas se relacionan. En otras palabras, es preciso disponer de metodologías prácticas que permitan insertar la tarea objeto de estudio en el entorno donde ella se debe solucionar y descomponerla, en caso de necesidad, en subtareas relacionadas.

## **I.2 Principios de descomposición de la tarea de toma de decisiones en objetos complejos**

En la literatura dedicada al tema de la gestión empresarial se encuentra una inmensa cantidad de obras que abordan la esencia de este problema. Sin embargo, muy pocas entre ellas [44, 50] analizan el vínculo entre los aspectos espacial, funcional, multicriterial y del tiempo en el establecimiento de jerarquías de tareas de toma de decisiones. Con el fin de definir el contenido de estas tareas en complejos organizativos y tecnológicos y las relaciones mutuas existentes, fueron enunciados los principios cuya aplicación práctica a los objetos reales, de carácter organizativo, conducen a estructuras de tareas semejantes a las que se han venido conformando en los sistemas organizativos como resultado de su evolución histórica.

En correspondencia con estos principios [3, 4, 15], la tarea de toma de decisiones se descompone, en primer lugar, espacialmente: el sistema de toma de decisiones de todo el objeto dirige los de cada uno de los elementos que lo conforman. A cada nivel de

descomposición espacial corresponde una descomposición por funciones, y en cada nivel de descomposición funcional tiene lugar una descomposición en el tiempo. Como resultado se obtiene una jerarquía interrelacionada de tareas de toma de decisiones, así como la estructura misma del sistema.

La aplicación práctica de estos principios a las empresas industriales conduce a determinada concepción para la organización de sus estructuras de toma de decisiones, consistente en lo siguiente:

- La descomposición espacial de la tarea de toma de decisiones determina la existencia de un sistema de toma de decisiones de la empresa en su conjunto y, subordinado a éste, un sistema de toma de decisiones local para cada taller que participa en la producción material.
- La descomposición de la tarea de toma de decisiones del sistema empresarial por funciones permite distribuir esta tarea por subsistemas, racionalmente, a partir del siguiente razonamiento: el proceso productivo de una empresa se resume como la preparación de determinados recursos para su transformación en producción terminada, la que con posterioridad es realizada por el aparato de ventas. Los recursos, por su naturaleza, se desglosan en materiales, técnicos, humanos y financieros. De tal forma, el sistema de toma de decisiones de toda empresa se descompone en los siguientes sistemas funcionales:
  - Sistema de toma de decisiones de los recursos materiales.
  - Sistema de toma de decisiones de los recursos técnicos.
  - Sistema de toma de decisiones de los recursos humanos.
  - Sistema de toma de decisiones de los recursos financieros.
  - Sistema de toma de decisiones de la producción.
  - Sistema de toma de decisiones de las ventas.

La armonización del funcionamiento de los sistemas mencionados, así como su vinculación con el exterior (con otros sistemas) puede ser considerada como una

función de toma de decisiones adicional. Al sistema encargado de cumplir esta función se le puede denominar, por ejemplo, sistema de toma de decisiones técnico-económica de la empresa, sistema de coordinación, etcétera.

- La descomposición en el tiempo de cada una de estas funciones conduce a la determinación de las tareas que han de ser solucionadas. En la figura 8 se muestra la jerarquía de tareas de toma de decisiones de la producción de las empresas industriales obtenida como resultado de la aplicación de los principios mencionados, partiendo de una perspectiva anual. Del sistema de planeamiento anual se reciben las cifras pronósticos de producción para el año en curso, desglosadas por trimestres. El comportamiento real de los indicadores económicos y del mercado puede, y normalmente lo hace, condicionar la modificación de estas cifras durante el año, las que son desglosadas por trimestres y meses.

El nivel de toma de decisiones empresarial debe asegurar el balance de los flujos materiales entre los elementos de su descomposición espacial, en el tiempo. El hecho de que la demanda se precise, por lo general, en cada mes (y en ocasiones se rectifica varias veces durante el mes), impone la necesidad de elaborar mensualmente las secuencias de trabajo de los talleres y de rectificar, de forma periódica, estas secuencias durante el mes. Las secuencias deben ser compatibilizadas entre sí, ya que solo de esta forma se puede asegurar su viabilidad y el logro de un nivel adecuado de eficiencia general del sistema.

Las secuencias concretas que garantizan el cumplimiento de la tarea mensual de cada taller son emitidas, en calidad de propuestas, por los correspondientes sistemas locales de toma de decisiones. La selección de una combinación de secuencias se realiza en el nivel superior, por el sistema correspondiente. En la solución de las tareas señaladas, además de la consideración de los enlaces materiales, ocupa un lugar importante la consideración de los parámetros generados

por el sistema de toma de decisiones de los recursos técnicos: máquinas o agregados en los que se debe fabricar determinado producto, duración de las operaciones tecnológicas, etcétera.

El servicio de despacho de la empresa (en las grandes empresas, por supuesto), asegura el balance, al ritmo del proceso, de todos los talleres y áreas. Una de las tareas más importantes que se solucionan a este nivel consiste en la selección adecuada de los lotes de productos intermedios para su transformación posterior en producción terminada. De la solución racional de esta tarea depende, en gran medida, el logro de altos niveles de eficiencia económica.

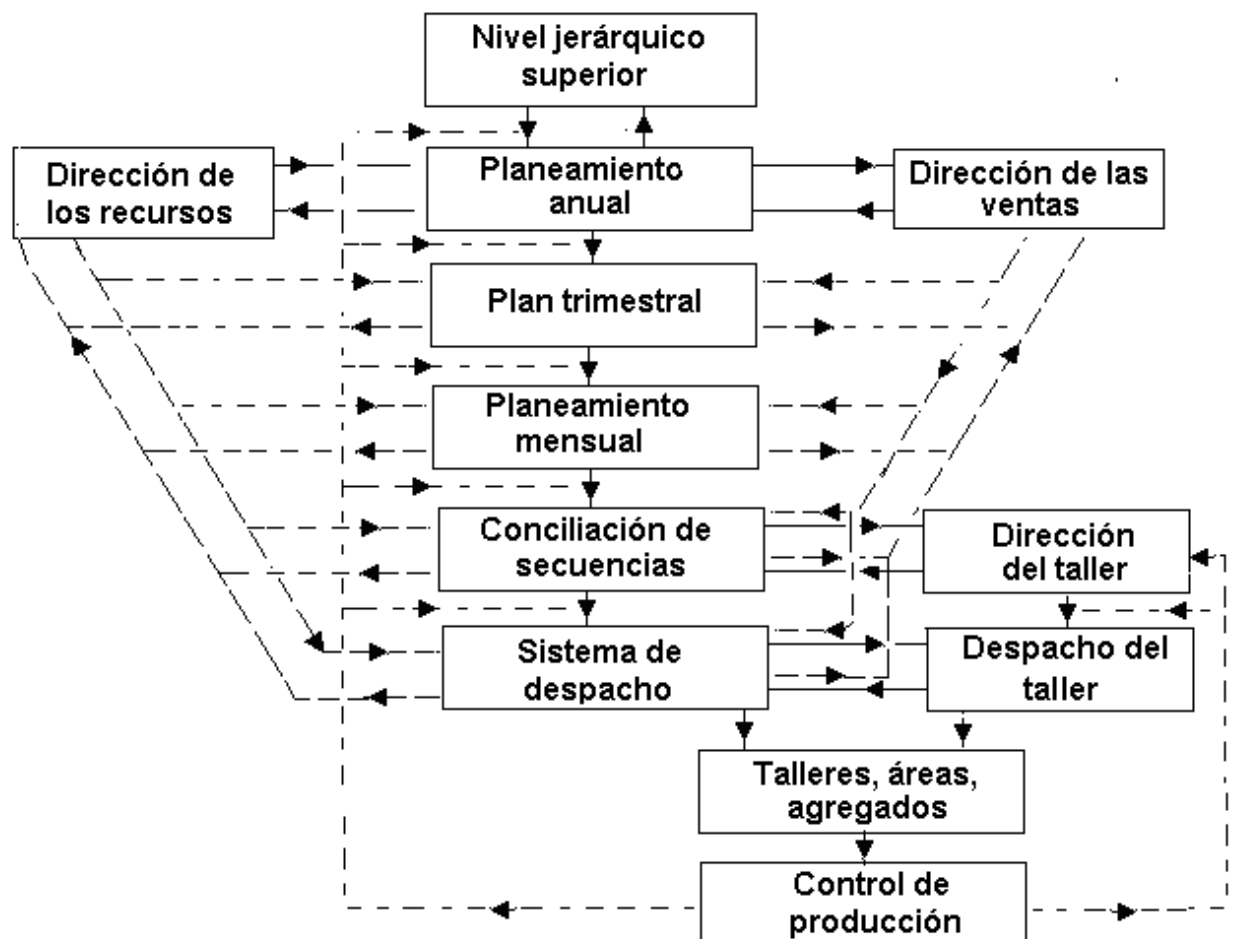


Fig. 8. Jerarquía de tareas de dirección de la producción industrial.

En el nivel inferior de la jerarquía (taller), se realiza la coordinación interna del trabajo de las áreas y los agregados. Es decir, tiene lugar la toma de decisiones de

las operaciones del taller. A este nivel se preparan las propuestas operativas al sistema de despacho centralizado de la empresa. La toma de decisiones de las operaciones está estrechamente relacionada con la conducción de los procesos tecnológicos, pues las decisiones operativas de carácter productivo constituyen acciones directivas a los sistemas de toma de decisiones de los procesos tecnológicos. De tal forma, el sistema automatizado de operación y control de cada agregado del taller se encuentra bajo subordinación funcional del sistema de toma de decisiones corriente del taller en cuestión.

Los sistemas ocupados de la operación y el control de los agregados, áreas y talleres entregan información primaria, que es almacenada, clasificada y acumulada por el sistema de control de producción, el que transfiere la información requerida para la rectificación de las decisiones a cada nivel en el tiempo.

La planeación de la producción a cada nivel de descomposición en el tiempo tiene que considerar las restricciones que imponen todos los sistemas funcionales relacionados con la toma de decisiones de los diferentes tipos de recursos y por el sistema de toma de decisiones de las ventas. En la medida que disminuye la duración del período de planeación, se reduce también la indeterminación en el comportamiento de todo tipo de parámetros e indicadores. Así, las tareas de planeación anual toman en consideración restricciones de disponibilidad de tiempo de trabajo y tal vez de otros recursos, el comportamiento esperado del mercado, etc. Las tareas de planeación trimestral y mensual, a pesar de tener también un carácter de distribución volumétrica, operan con información más precisa. En la etapa de generación y conciliación de secuencias productivas se toman en consideración el comportamiento detallado de todos los recursos y el gráfico detallado de entrega de la producción terminada.

La descomposición asociada al diseño de la tecnología resulta generalmente más sencilla que la asociada a la toma de decisiones empresarial. En efecto, los diferentes elementos componentes de talleres, agregados, equipos, etc., se especializan en el

cumplimiento de determinadas funciones, por lo que la descomposición espacial y funcional generalmente coinciden [74]. Por otra parte, la síntesis de tecnologías tiene lugar para períodos indeterminados, mientras permanezcan las condiciones para las que se realiza este diseño, por lo cual la descomposición en el tiempo carece de sentido. No obstante, esta información es utilizada por el sistema de toma de decisiones de la producción, el que debe seleccionar la tecnología más apropiada para fabricar cada artículo en los agregados tecnológicos que correspondan.

Como resultado, la descomposición de las tareas de diseño de tecnologías tiene lugar para los elementos componentes de talleres, agregados y equipos objetos del diseño.

De igual forma, el diseño de instalaciones y equipos complejos se descompone en tareas de diseño de cada uno de los elementos que los conforman. Por ejemplo, el diseño de un automóvil se descompone en tareas de diseño del motor, sistema de embrague, sistema de frenos, etc. En todos los casos, independientemente de su naturaleza, la síntesis del sistema complejo requiere de la solución de un grupo de subtareas de diseño y de la conciliación del diseño del sistema complejo en su integridad.

#### **Ejemplo 7: Integración del diseño, la generación de tecnologías, la fabricación y la planeación de la producción de piezas**

El problema estudiado en el presente ejemplo ha sido objeto de investigación, no siempre con éxito, en numerosos trabajos. Entre ellos se encuentran [2, 4, 18, 28, 39, 48, 53, 71] y otros muchos.

Las tareas de integración de los sistemas CAD/CAPP/CAM/CAP (para el diseño, la generación de tecnologías, la fabricación y la planeación de producción) obedecen a los mismos principios que los restantes sistemas. Por ello, se analiza, en una primera fase, la tarea de toma de decisiones de mayor envergadura, a la que se subordina, en calidad de subtarea, el diseño de la pieza, herramienta, instalación, etc., de que se trate. En una segunda etapa, se realiza el análisis de la tarea de diseño. La tarea de planeación del proceso de fabricación se subordina, sin dudas, al diseño del producto a fabricar. Esta subordinación obedece necesariamente a los principios de organización de la estructura centralizada, ya que se requiere fabricar exactamente lo que se diseñó. El sistema CAPP es el encargado de generar las diferentes opciones de fabricación del producto para los agregados productivos del taller en cuestión, por lo que suministra

*propuestas* al sistema de toma de decisiones de la producción del taller. La propuesta seleccionada *para cada fase dada de fabricación de cada producto en cada agregado tecnológico* debe ser implementada *en el momento establecido* por el sistema de toma de decisiones de la producción del taller. El cumplimiento de las tareas productivas puede y debe ser realizado mediante la transferencia de la información directiva desde el CAPP hasta el agregado tecnológico de que se trate.

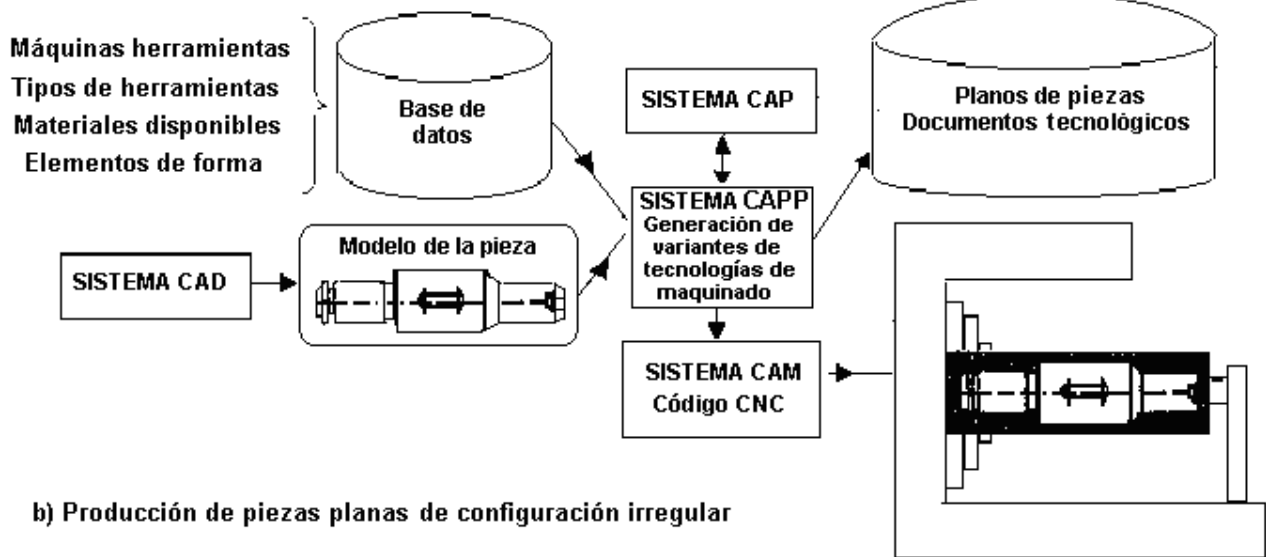
De la descomposición en el tiempo de la tarea de toma de decisiones de la producción, ilustrada en la figura 8, se deduce la existencia de transferencia de información directiva entre el sistema de toma de decisiones de los recursos técnicos y el de la elaboración de secuencias de producción, según se muestra en la figura 9. El sistema de toma de decisiones de los recursos técnicos genera opciones de tecnologías, las que son utilizadas por el sistema de toma de decisiones de producción en la etapa de generación de secuencias productivas. Una vez seleccionada la opción adecuada de tecnología, el sistema de fabricación utiliza la información correspondiente para fabricar las piezas (maquinadas, cortadas en chapas, etc.). Así, el sistema de toma de decisiones de los recursos técnicos incluye el diseño de la pieza (sistema CAD), la generación de opciones de tecnologías de fabricación (sistema CAPP) y la transferencia de la información al sistema CAM para la fabricación, por la opción de tecnología seleccionada por el sistema de toma de decisiones de la producción (sistema CAP).



**Fig. 9. Flujo de información directiva.**

En la figura 10 se muestra la estructura general de la integración CAD/CAPP/CAM/CAP, incluyendo la relación de intercambio de información directiva con el sistema CAP en los ejemplos de la fabricación de piezas maquinadas en máquinas herramienta y de piezas planas de configuración irregular cortadas en chapas. En la figura se entiende como CNC el control numérico computarizado. Esta relación consiste en la entrega, por el sistema CAPP, de opciones de fabricación en diferentes máquinas de cada una de las piezas programadas y la selección, por el sistema CAP, de la opción más apropiada para cada pieza, tomando en consideración las complejidades operativas surgidas en el taller. Una vez definida la opción de fabricación más adecuada, el sistema CAPP suministra la información necesaria al sistema CAM para efectuar la fabricación.

### a) Maquinado de piezas



### b) Producción de piezas planas de configuración irregular

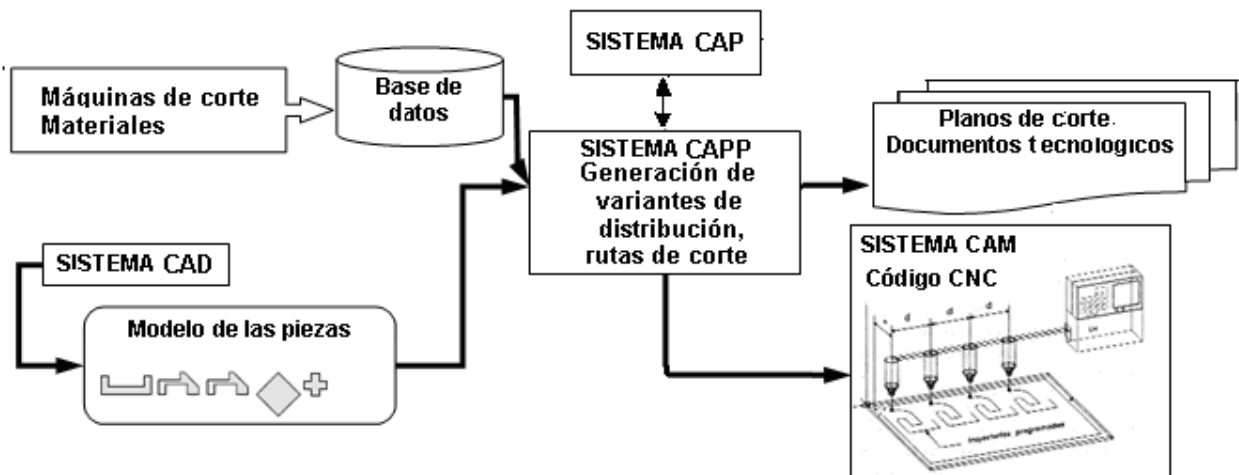


Fig. 10. Integración de sistemas CAP, CAD, CAPP, CAM para la fabricación de piezas.

En los ejemplos 11 y 14 se presentan esquemas de solución a los problemas de fabricación de piezas maquinadas en tornos y de piezas planas en máquinas de corte, respectivamente.

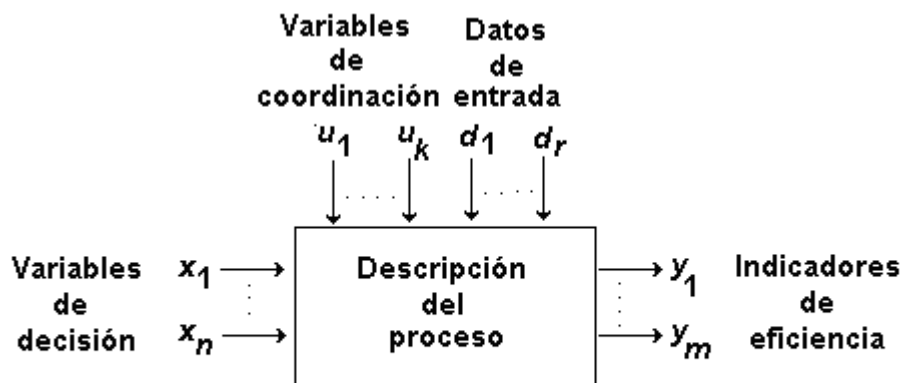
En este ejemplo se reflejan algunos resultados obtenidos en investigaciones aplicadas realizadas con la participación del autor de este trabajo.

### I.3 Análisis del sistema de toma de decisiones por tareas

Las tareas de preparación de decisiones derivadas de la aplicación de los principios de descomposición enunciados anteriormente se someten a análisis externo e interno (Fig. 11). La necesidad en la realización de estas etapas de análisis se fundamenta en los principios del enfoque cibernético de Norbert Wiener [69], completados con resultados de investigación propios.

El análisis externo consta de las siguientes etapas:

- **Estudio de la tarea de mayor envergadura.** Se estudia la tarea mayor a la cual se encuentra subordinado el sistema objeto de análisis. Solo de esta forma se puede asegurar que el sistema objeto de análisis se inserta adecuadamente en el “medio ambiente” en el que deberá funcionar. Aquellas variables de decisión de la tarea de mayor envergadura que determinan el enlace con la tarea estudiada se denominan variables de coordinación. En otras palabras, las variables de coordinación son aquellas cuyos valores se definen durante la solución de otra tarea de toma de decisiones de mayor envergadura (en el espacio, la función y/o el tiempo), con respecto a la cual la tarea en análisis constituye una subtarea.



**Fig. 11. Clasificación de la información involucrada en el análisis externo de los procesos de preparación de decisiones.**

- **Determinación de los indicadores de eficiencia.** Son aquellos indicadores que caracterizan la calidad de las soluciones posibles de la tarea analizada y que pueden resultar de interés al potencial usuario del sistema. Estos se definen mediante el estudio de la bibliografía asociada, encuestas entre empresarios y especialistas vinculados con tareas de la clase estudiada y pueden tener carácter cuantificable (ser calculables) o no cuantificable (evaluados subjetivamente). Ejemplos de indicadores cuantificables son:
  - Costo de fabricación.
  - Durabilidad (de un producto, una herramienta, una obra constructiva, etc.).
  - Indicadores de resistencia mecánica.
  - Ganancia esperada.

- Otros indicadores calculables.

Ejemplos de indicadores no cuantificables son:

- Comodidad en el uso de un producto, herramienta, etcétera.
- Factibilidad de fabricación.
- Valor estético de un producto.
- Otros indicadores de carácter subjetivo.

La evaluación de los indicadores de eficiencia no cuantificable está relacionada, generalmente, con la observación de las imágenes gráficas asociadas a las diferentes alternativas de solución generadas por el sistema, o bien con ayuda de herramientas de simulación no incluidas en el modelo de optimización utilizado.

- **Estimación inicial de la composición de las variables de decisión y de los datos de entrada de la tarea.** Las variables de decisión son aquellas que pueden ser modificadas a voluntad por el usuario del sistema, con el fin de obtener el mejor compromiso posible entre los indicadores de eficiencia del proceso. Este mejor compromiso está condicionado por la importancia relativa que el usuario le concede a cada indicador. Los datos de entrada son parámetros propios del proceso que adoptan valores conocidos, con distribuciones de probabilidad determinadas o que pueden ser, incluso, desconocidos. Durante el análisis interno se precisa la composición final de ambos tipos de entradas.
- **Verificación de la independencia mutua de las entradas.** En el proceso de análisis se verifica la independencia de cada una de las variables consideradas como entrada, con respecto a las restantes. Si alguna supuesta entrada puede calcularse como función de otras, entonces pasa a constituir una variable intermedia de cálculo.
- **Determinación de variables intermedias de interés.** Son aquellas cuyos valores pueden influir en la decisión final del decisor, incluidas aquellas que deben ser restringidas superior o inferiormente.

- **Descomposición de la tarea estudiada en elementos componentes.** Esta fase prepara al analista para el estudio posterior de los mecanismos de composición de soluciones (o de conciliación de decisiones) que se realiza en las fases posteriores de análisis y síntesis del sistema.
- **Elaboración del modelo conceptual de preparación de decisiones.** A partir del análisis externo de la tarea de ingeniería estudiada queda definido el conjunto de indicadores cuantificables a optimizar, el conjunto de variables intermedias a restringir y el conjunto de indicadores de carácter subjetivo a evaluar. Así, en correspondencia con la formulación (2), se plantea el modelo conceptual de preparación y toma de decisiones.

$$\left. \begin{array}{l} \min_x z_1(x_1, \dots, x_n; y_1, \dots, y_m; g_1, \dots, g_r) \\ \quad \quad \quad \cdot \\ \quad \quad \quad \cdot \\ \quad \quad \quad \cdot \\ \min_x z_m(x_1, \dots, x_n; y_1, \dots, y_m; g_1, \dots, g_r) \end{array} \right\} \quad (33)$$

Asegurando el cumplimiento de:

$$\left. \begin{array}{l} g_i^{\text{inf}} \leq g_i(x_1, \dots, x_n; y_1, \dots, y_m; g_1, \dots, g_r) \leq g_i^{\text{sup}}; \quad i = (1, \dots, r) \\ x_i^{\text{inf}} \leq x_i \leq x_i^{\text{sup}}; \quad i = (1, \dots, n). \end{array} \right\} \quad (34)$$

Donde:

$$z_j(u, x) = \theta_j y_j(u, x),$$

$$\theta_j = \begin{cases} 1 & \text{si el indicador } y_j(u, x) \text{ debe ser minimizado} \\ -1 & \text{si el indicador } y_j(u, x) \text{ debe ser maximizado} \end{cases}$$

$g_i^{\text{inf}}, g_i^{\text{sup}}$ : Límites inferior y superior que puede adoptar la variable intermedia restringida  $j$ .

$x_i^{\text{inf}}, x_i^{\text{sup}}$ : Límites inferior y superior que puede adoptar la variable de decisión  $x_i$ .

Concluido el análisis externo se pasa al interno. Este último concluye con la determinación del algoritmo más racional para calcular los indicadores de eficiencia cuantificables y las variables intermedias de interés a partir de las variables de entrada como parte componente del algoritmo de generación de opciones, así como de los procedimientos de simulación complementarios que permiten precisar el comportamiento de las opciones generadas, una a una, y de generación de las imágenes gráficas necesarias para evaluar con efectividad los indicadores de eficiencia no cuantificable.

El análisis interno consta de las siguientes fases:

- **Modelación matemática.** Se determinan aquellas relaciones que permiten explicar las salidas (indicadores de eficiencia), a partir de las entradas del proceso (variables de coordinación, de decisión y datos de entrada). En esta fase quedan precisados los datos de entrada de la tarea, los que están constituidos por los parámetros constantes y por toda clase de información de entrada no asociada directamente a la tarea estudiada.
- **Organización racional de los procedimientos de cálculo.** Se precisa la composición de las variables de decisión y el orden de los cálculos que conducen a procedimientos con la menor cantidad posible de ciclos, quedando definidos los algoritmos de cálculo del proceso. Aquí se emplean diferentes métodos, desde los trabajos fundacionales de D.F. Rudd y Ch. C. Watson [60], los que aportaron los principios básicos para la solución de este problema, hasta los métodos más modernos como el de los Grafos Dicromáticos [47].
- **Identificación de todos y cada uno de los componentes del modelo matemático conceptual de preparación y toma de decisiones.** Se realiza la descripción detallada del procedimiento de cálculo básico a ser insertado en el procedimiento de generación de opciones, el cual puede tener carácter implícito, que permite calcular las salidas  $y_j(x)$ ,  $g_i(x)$  y la determinación de los procedimientos gráficos y de simulación complementarios que aportan la información requerida por

el decisor para precisar el comportamiento, una a una, de las opciones de solución generadas a partir del cálculo básico implementado en el procedimiento de generación de opciones. El resultado final del análisis interno es el punto de partida del proceso de síntesis.

El análisis interno puede requerir de profundas revisiones bibliográficas sobre el tema, la realización de investigaciones encaminadas a completar la descripción matemática del proceso, a la organización de procedimientos eficientes de simulación, etc. La separación del proceso de análisis en dos partes es convencional: una vez realizado el análisis interno se retorna al externo con el fin de precisar la composición de variables. El proceso de análisis puede requerir de varias iteraciones.

La metodología de análisis expuesta no resta validez a otras en el campo de la Informática, las que se presentan en los trabajos de un gran número de autores [22], sino que las complementa.

#### **Ejemplo 8: Análisis externo de la tarea de diseño de troqueles simples y progresivos de corte y punzonado**

##### **Estudio del sistema de mayor envergadura**

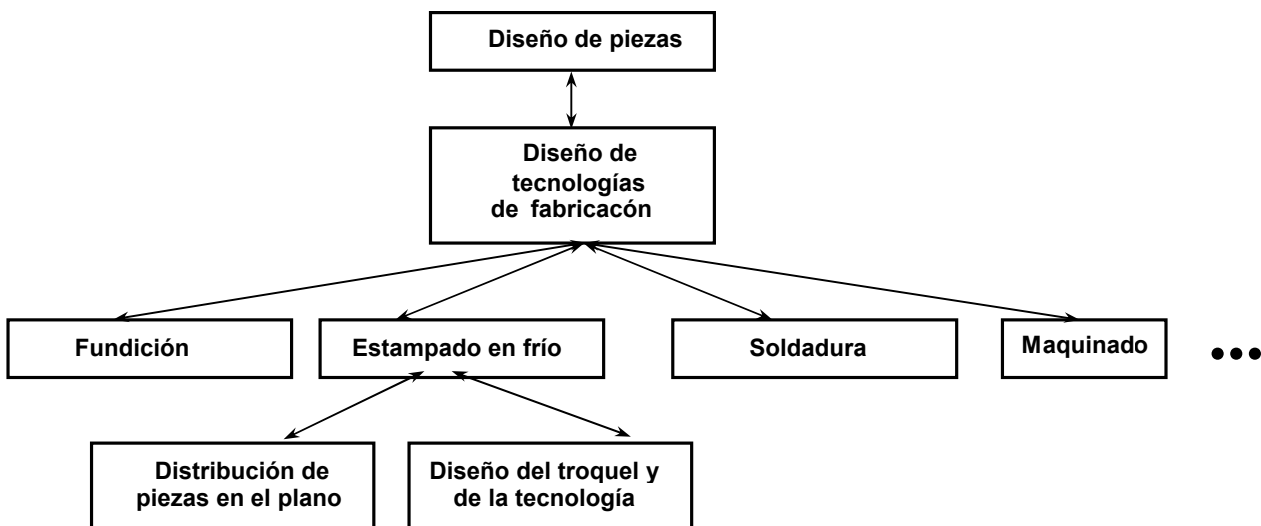
La fabricación de piezas por corte y punzonado, al igual que por las restantes tecnologías de estampado en frío, se subordina a la tarea general de diseño de tecnologías de fabricación de piezas, las que pueden ser fabricadas por una secuencia dada de tecnologías o bien por una tecnología específica [37, 65, 67].

En efecto, un sistema encargado del diseño de piezas, puede requerir, por ejemplo, de la generación de la tecnología de fabricación de una pieza en particular por conformado en frío, específicamente por corte y punzonado con ayuda, en el caso estudiado en este ejemplo, de troqueles simples y progresivos. Como elementos determinantes de la generación de esta tecnología se encuentran, necesariamente, la distribución de las piezas en el semiproducto y el diseño del troquel más adecuado para fabricar la pieza en cuestión. La tarea de diseño de un troquel tiene que conciliarse con la tarea de distribución de las piezas, lo que determina el ancho del semiproducto a utilizar. Quedan, además, definidos otros parámetros de la tecnología, tales como la productividad de la instalación de conformado, el número de carreras útiles

utilizadas, la fuerza de trabajo a emplear (en dependencia del grado de automatización que se decida), la vida útil de la herramienta, etcétera.

De esta manera, la tarea de diseño de troqueles simples y progresivos se subordina a la tarea general de fabricación de piezas, la que incluye la determinación de las secuencias óptimas de fabricación, la asignación, en una primera etapa, de tareas concretas de generación de tecnologías a sistemas particulares concebidos con este objetivo (de maquinado, fundición, estampado en frío y en caliente, laminación, extrusión, etc.). En el proceso de generación de tecnologías concretas los sistemas del nivel inferior entregan, en una segunda etapa, opciones de tecnologías, las que incluyen propuestas de piezas intermedias para la continuación de su fabricación por otras tecnologías. En una tercera etapa, el nivel superior (el de fabricación) selecciona aquella combinación de opciones que mejor satisfacen los requisitos generales de fabricación de la pieza terminada.

En la figura 12 se muestra la jerarquía de tareas de preparación de decisiones asociada al diseño de herramientas de estampado en frío en general, y de corte y punzonado en particular. Según puede observarse de esta jerarquía, la configuración y especificaciones técnicas de la pieza a fabricar son procesadas por un sistema encargado de determinar la secuencia de operaciones tecnológicas más adecuadas. Los sistemas encargados de la generación de las diferentes tecnologías particulares y del diseño del herramental asociado dan respuesta a las correspondientes fases de fabricación. En el caso del conformado en frío por corte y punzonado se destacan como tareas clave, indisolublemente vinculadas, las tareas de distribución de la pieza en el semiproducto y del diseño del troquel.



**Fig. 12. Jerarquía de los procesos tecnológicos.**

**Análisis de la tarea de distribución de piezas en el semiproducto.**


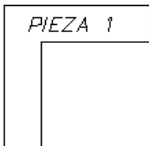
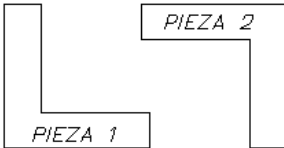
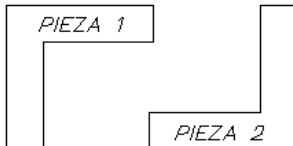
El análisis de la tarea se realizará a partir del estudio de la composición de variables de entrada y salida y su desglose en objetivos (indicadores de eficiencia) y variables de decisión.

## Indicadores de eficiencia

Aprovechamiento de la chapa

**Apch**

### Variables de decisión

1	Desplazamiento entre piezas en el eje X	<b>DespX</b>	
2	Desplazamiento entre piezas en el eje Y	<b>DespY</b>	
3	<p>VARIANTE 1 1 PIEZA A ANALIZAR</p>  <p>VARIANTE 2 1 PIEZA A ANALIZAR</p> 	<p>VARIANTE 3 2 PIEZAS A ANALIZAR</p>  <p>VARIANTE 4 2 PIEZAS A ANALIZAR</p> 	<b>VarN</b>

**Fig. 13. Variantes y posiciones de las piezas a analizar.**

En la solución de la tarea de distribución de piezas en la chapa se utiliza un algoritmo heurístico basado en el método de Exploración de la Programación No lineal para cada una de los posibles esquemas de distribución mutua entre las piezas, ilustrados en la figura 13.

### **Conciliación de las tareas de distribución de piezas en el semiproducto y del diseño de troqueles de corte y punzonado simples y progresivos**

Del estudio realizado se infiere que la tarea de diseño de troqueles de corte y punzonado simples y progresivos está directamente vinculada a la distribución de las piezas en el semiproducto. Se trata, en realidad, de dos tareas mutuamente relacionadas, por lo que se requiere definir un esquema racional para la conciliación durante la preparación de decisiones asociadas a ambas tareas. El esquema de conciliación adoptado consiste en la generación de una serie ordenada de opciones de distribución de piezas en el semiproducto y la selección, entre éstas, de aquella que asegura el mejor compromiso razonable entre los indicadores de eficiencia de todo el proceso. En otras palabras, en la solución de ambas tareas se utiliza una estructura de conciliación de decisiones disperso-conciliada.

En la primera etapa se genera una serie ordenada de opciones que satisfacen un criterio local de eficiencia, y en la segunda, a los índices de las diferentes opciones de distribución se les atribuye el carácter de posibles valores de una variable de decisión de la tarea de diseño del troquel requerido para conformar la pieza procesada. El criterio de preferencias utilizado en la segunda etapa puede tener un carácter más general que en el de la primera. En efecto, durante la distribución de las piezas en la chapa se puede influir directamente tan sólo en el aprovechamiento de la chapa y en los gastos asociados, mientras que en la segunda etapa se influye directamente sobre otros indicadores: costos totales de fabricación, precisión del corte, consumos energéticos, etcétera.

### **Análisis externo de la tarea de diseño del troquel**

Los troqueles de corte y punzonado de chapas constituyen herramientas muy utilizadas en la industria mecánica para la producción de piezas planas de las más disímiles configuraciones.

Del estudio del sistema de mayor envergadura realizado se destacan como *variables de coordinación* las determinadas por la configuración de la pieza terminada, las especificaciones técnicas de la pieza, el tamaño del lote a producir.

A partir de encuestas realizadas a especialistas y empresarios dedicados al diseño y la fabricación de troqueles, fueron definidos los siguientes *indicadores de eficiencia* para el caso específico de los troqueles de corte y punzonado simples y progresivos:

<b><i>Aprovechamiento de la chapa</i></b>	<b><i>Apro</i></b>
Productividad de la prensa	<b><i>Prod</i></b>
Fuerza de corte	<b><i>Fuer</i></b>
Costo de fabricación	<b><i>Cost</i></b>
Durabilidad del troquel	<b><i>Dura</i></b>
Precisión	<b><i>Itac</i></b>

Para actuar sobre los valores posibles de los indicadores de eficiencia el decisor (o el sistema de ayuda a la decisión) puede modificar los valores de las siguientes variables de decisión.

1. Tipo de troquel ***TTroq***

[Simple / placa guía / armazón de columnas]

2. Distribución de piezas en la chapa [1,2,3,4]	<b><i>DpCh</i></b>
3. Elementos reguladores del paso	
♦ Recortadores laterales [uso o no]	<b><i>ReLat</i></b>
4. Tipo de corte [de la pieza / del desecho]	<b><i>TiCor</i></b>
5. Número de pasadas	<b><i>NuPas</i></b>
6. Sistema de alimentación [manual / automático].	<b><i>SiAli</i></b>
7. Elementos centradores	<b><i>EICen</i></b>
8. Tipo de matriz y filo.	<b><i>MaPar</i></b>
9. Elementos de posicionamiento	
♦ Regla guía	<b><i>ReGui</i></b>
♦ Presionador lateral	<b><i>PreLa</i></b>
10. Material de la matriz	<b><i>MatMa</i></b>
11. Material del punzón	<b><i>MatPu</i></b>
12. Bases	
♦ Tipo (fundida o laminada)	<b><i>BasTip</i></b>
♦ Posición de las columnas	<b><i>PoCol</i></b>
♦ Forma de la columna	<b><i>TiCol</i></b>

Es decir, todas las variables de decisión son de naturaleza discreta y constituyen decisiones generales que determinan la configuración del diseño.

El análisis interno incluye toda una metodología de cálculo de ingeniería propia de esta especialidad y los procedimientos gráficos y de simulación por elementos finitos que han de permitir completar la evaluación del decisor de las diferentes opciones de solución generadas por el sistema que ha de ser sintetizado, posteriormente.

## I.4 Síntesis de los sistemas de ingeniería

### I.4.1 Preparación de decisiones en los sistemas de ingeniería organizados en estructuras jerárquicas participativas

En correspondencia con lo analizado en el epígrafe I.1, como contenido de la función de preparación de decisiones en los sistemas de ingeniería organizados en estructuras jerárquicas participativas se entiende la generación de opciones  $\alpha$  - óptimas de decisión en presencia de múltiples objetivos, a partir de la definición siguiente.

Sea la tarea de minimización simultánea de  $r$  criterios cuantificables  $z_1, \dots, z_r$  definidos en un espacio  $D$ . El espacio de soluciones  $D^{\alpha_j} \subset D, j \in (1, r)$  se denomina *espacio de soluciones  $\alpha_j$  - óptimas* y la solución  $x_i \in D$  *solución  $\alpha_j$  - óptima* si

$$x_i \in D^{\alpha} \Leftrightarrow z_j(x_i) - z_j^{id}(x_i) \leq \alpha_j$$

Donde:  $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_m), \quad D = \{x \in X / g_k(x) \geq b_k; \forall k \in (1, \dots, m)\}$

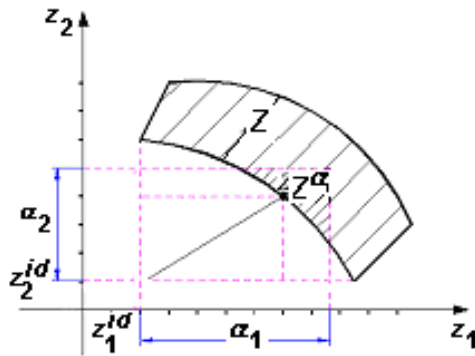
Los valores de los parámetros  $\alpha_j$  determinan las soluciones  $\alpha_j$  - óptimas de la tarea mencionada, minimizando tan solo el criterio  $z_j$  o, en otras palabras, el sacrificio que el decisor está dispuesto a asumir por el criterio  $z_j(x)$  en aras de encontrar el mejor compromiso posible entre todos los indicadores de eficiencia, incluidos los de carácter no cuantificable (subjetivos).

Los valores  $\alpha_j$  se seleccionan suficientemente grandes para obtener un conjunto de soluciones  $D^{\alpha}$ , entre las que el decisor puede elegir aquella que satisface plenamente su sistema completo de preferencias. En la práctica, puede ser generado un número predeterminado de opciones de solución próximas al sistema de preferencias del decisor, lo que necesariamente se corresponde con un valor  $\alpha_j$  desconocido de antemano.

En ausencia de indicadores no cuantificables de eficiencia o, lo que resulta equivalente, en el caso que no se requiera conciliar las decisiones del sistema dado con las de otros sistemas que se encuentran al mismo nivel jerárquico, el sistema de preferencias del

decisor se satisface, evidentemente, por alguna solución del conjunto  $N$  de soluciones eficientes, mediante alguno de los procedimientos iterativos de optimización multiobjetivo que utilizan el programa de Tchebycheff, lexicográfico o aumentado de Tchebycheff que aparecen en la bibliografía [32, 40, 41, 43, 51, 63, 70].

En presencia de indicadores no cuantificables, el problema consiste en generar soluciones en un entorno al mejor compromiso entre los indicadores cuantificables, tal y como se ilustra en la figura 14.



**Fig. 14. Ilustración del espacio  $Z^\alpha$  de búsqueda de la mejor solución de compromiso.**

El espacio de criterios  $Z^\alpha$  se determina mediante la generación de soluciones  $\gamma$ -óptimas del programa de Tchebycheff, lexicográfico o aumentado de Tchebycheff para valores de  $\gamma$  dados por

$$\gamma = \max \{w_j \alpha_j^s / j \in (1, \dots, r)\},$$

Donde:  $\alpha_j^s = \alpha_j - \bar{z}_j$

$\bar{z}_j$  : Valor del criterio  $j$  en la solución eficiente seleccionada por el decisor.

Es decir, mediante la generación de los valores de  $x$  asociados a todos los valores de  $\beta$  tales que  $\beta^{min} \leq \beta \leq \beta^{min} + \gamma$ .

Donde:

$\beta^{min}$ : Valor de  $\beta$  en la solución óptima al programa de Tchebycheff, lexicográfico o aumentado de Tchebycheff.

Por otra parte, el espacio de soluciones asociado a  $Z^\alpha$  es el espacio  $D^\alpha = \bigcap_{i=1}^r D^{\alpha_i}$ , por lo

que el espacio de búsqueda de la mejor solución de compromiso entre los indicadores de eficiencia de la tarea de optimización multiobjetivo está constituido por la intersección entre los espacios de soluciones  $\alpha_j$ -óptimas por todos y cada uno de los criterios de optimalidad. Esta afirmación se ilustra convenientemente en la figura 14 y fue demostrada con todo rigor por V. R. *Jachaturov* [38].

### **Búsqueda del mejor compromiso entre indicadores cuantificables de eficiencia**

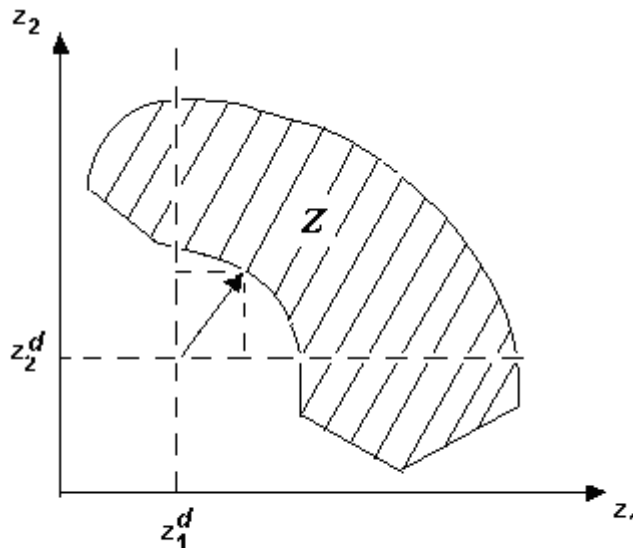
El problema de búsqueda del mejor compromiso entre los indicadores cuantificables de eficiencia constituye un problema de muestreo de la región de soluciones eficientes del problema de optimización con múltiples criterios asociado por cualquiera de los métodos iterativos que aparece en la literatura [32, 40, 43, 70]. Algunos de estos métodos presuponen la existencia de un analista encargado de presentar diferentes opciones a un decisor, el que elige la solución que prefiere, o bien muestra indiferencia entre algunas de ellas, de un conjunto de opciones presentadas. La búsqueda se limita a la región de soluciones eficientes.

En este trabajo se parte, sin embargo, del supuesto de que para el decisor, aunque resultan importantes los valores que adquieren los indicadores cuantificables de eficiencia, no es menos importante el comportamiento de otros indicadores que no pueden ser presentados como criterios de optimización. Por esta razón, utiliza un sistema de ingeniería, con ayuda del cual él mismo se ocupa de hacer un muestreo de la región de soluciones eficientes con el fin de *aproximarse al mejor compromiso entre los indicadores cuantificables de eficiencia* y de generar, posteriormente, un conjunto de opciones, incluso no eficientes, entre las que debe elegir, con ayuda de procedimientos gráficos y de

simulación del comportamiento del proceso asociado, aquella solución que lo satisface plenamente.

Sin negar la validez de los métodos iterativos señalados en la literatura, el autor de este trabajo ha experimentado con éxito el siguiente procedimiento, basado en la idea del método del vector de criterios de aspiración de Wierzbicki [44]:

- Generación de la solución eficiente  $\bar{z}_i$ , correspondiente a valores iguales de los coeficientes de peso  $w_i, \forall i \in (1, \dots, m)$ . La solución encontrada será denominada *solución realista*.



**Fig. 15. Muestreo de la Región de Soluciones Eficientes en la proximidad de la solución deseada.**

- Determinación de valores deseables  $z_i^d$  de cada indicador cuantificable de eficiencia a partir del conocimiento de sus valores ideales  $z_i^{id}$  y de la solución realista  $\bar{z}_i, \forall i \in (1, \dots, m)$ .
- Si la diferencia  $z_i^d - z_i^{id}$  es superior a un valor predeterminado, se sustituye  $z_i^{id} = z_i^d$  y se retorna al inicio del procedimiento. En caso contrario, el decisor mejora uno a uno los valores de los indicadores mediante el incremento del peso  $w_j$  correspondiente. En estas condiciones se sustituyen los restantes pesos por el

algoritmo:  $w_i = w_i \times cte$ ,  $cte = (1 - val) / (1 - oldval)$ , donde  $val$  es el nuevo valor asignado a  $w_j$  y  $oldval$  es su valor anterior.

En muchas tareas prácticas el decisor puede, a partir del conocimiento previo que tiene del problema estudiado, determinar valores  $z_i^d > z_i^{id}$  desde la primera iteración.

### Ejemplo 9: Diseño óptimo multiobjetivo de paredes refractarias y aislantes

Se requiere determinar los materiales y el espesor de una pared refractaria y aislante de  $n$  capas compuesta de ladrillos, asegurando el mejor compromiso posible entre los indicadores de eficiencia: Espesor total ( $z_1$ ), costo material ( $z_2$ ), densidad del flujo calórico ( $z_3$ ), temperatura externa ( $z_4$ ) [5].

En la figura 16 se ilustra el análisis externo de esta tarea.

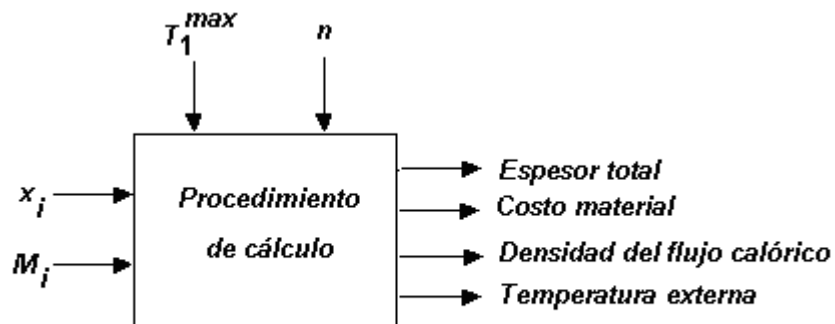


Fig. 16. Análisis externo de la tarea de diseño de paredes refractarias.

En calidad de variables de coordinación se determinaron: temperatura del objeto aislado, la que resulta próxima a la temperatura interna de la pared ( $T_1^{max}$ ) y número seleccionado de capas ( $n$ ).

En calidad de variables de decisión se determinaron: espesor de la capa  $i$  ( $x_i$ ) y material a utilizar en la construcción de la capa  $i$  ( $M_i$ )

### Formalización matemática

$$\text{Minimizar: } Z = \max \left\{ w_1 \frac{|z_1 - z_1^d|}{|z_1^d|}, w_2 \frac{|z_2 - z_2^d|}{|z_2^d|}, w_3 \frac{|z_3 - z_3^d|}{|z_3^d|}, w_4 \frac{|z_4 - z_4^d|}{|z_4^d|} \right\} \quad (35)$$

Donde:

$w_1, w_2, w_3, w_4$ : Coeficientes que reflejan la importancia concedida a los indicadores  $z_1, z_2, z_3, z_4$ , respectivamente.

$z_1^d, z_2^d, z_3^d, z_4^d$ : Valores deseados de los indicadores  $z_1, z_2, z_3, z_4$ , respectivamente.

$z_1(x) = x_1 + x_2 + \dots + x_n$ : Espesor total de la pared.

$z_2(x) = c_1 x_1 + c_2 x_2 + \dots + c_n x_n$ : Costo material de la pared.

$z_3(x) = q$ : Densidad del flujo calórico a través de la pared.

$z_4(x) = T_{n+1}$ : Temperatura externa de la pared.

$c_i$ : Costo de la unidad de volumen del material utilizado en la capa  $i$ .

Se debe de asegurar el cumplimiento de las siguientes restricciones:

$$T_i \leq T_i^{max}(M_i), \quad i = 2, \dots, n \quad (36)$$

$$0 \leq x_i \leq x_i^{max}, \quad i = 1, \dots, n \quad (37)$$

$$x_i \in (d_i^1, \dots, d_i^{k_i}), \quad i = 1, \dots, n \quad (38)$$

Donde:

$T_i$ : Temperatura interna del punto de la capa  $i$  mas próximo al ambiente aislado.

$x_i^{max}, T_i^{max}(M_i)$ : Valores máximos del espesor y la temperatura, respectivamente, del material  $M_i$  de la pared, sin afectar sus propiedades físicas.

$d_i^k$ : Espesor de la capa  $i$  de la pared, en la variante  $k$  de disposición de los ladrillos.

Las restricciones (36) establecen que no puede ser superado el valor máximo de temperatura de la capa  $i$  sin afectación de las propiedades físicas del material  $M_i$ .

Las restricciones (37) establecen que el espesor de las capas debe encontrarse entre los valores límites permitidos.

Las restricciones (38) establecen que el espesor de cada capa debe adoptar uno de los  $d_i$  posibles valores, de acuerdo con las variantes permitidas de disposición de los ladrillos.

La determinación de  $q$  y de  $T_i, i = 1, \dots, n+1$  para valores conocidos de  $x_i$ , se realiza con ayuda de un procedimiento de cálculo.

Los valores mínimos posibles del espesor de las capas y del costo de materiales de la pared son, evidentemente, iguales a cero lo que equivale a la inexistencia de pared refractaria, por lo que el decisor siempre puede (y debe) elegir valores mínimos deseables de estas magnitudes. De igual forma, los valores mínimos posibles de la densidad del flujo calórico a través de la pared y de la temperatura externa son también iguales a cero y se corresponden con la existencia de una pared infinitamente grande, de ahí que el decisor siempre puede (y debe) elegir valores mínimos deseables de estas magnitudes.

A partir de los valores deseables inicialmente seleccionados, el decisor inicia el muestreo de la región de soluciones eficientes, precisando en cada nueva iteración nuevos valores deseables para estas magnitudes. Una vez encontrada la mejor solución de compromiso entre los indicadores cuantificables, el decisor genera el espacio de soluciones próximas a ellas, con el fin de elegir la solución definitiva.

En [4] se expone, paso a paso, un algoritmo de solución a este problema, con otra función objetivo, en el que se combinan diferentes métodos estudiados en esa obra.

En resumen, la preparación de decisiones persigue el objetivo de generar un conjunto de opciones de solución próximas al mejor compromiso entre los diferentes criterios de eficiencia en los sistemas del nivel inferior de una estructura jerárquica. Este compromiso puede, en el caso general, ser expresado por una función del vector de criterios  $z = (z_1, z_2, \dots, z_n)$  y de un vector de coeficientes que reflejan la importancia concedida por el usuario (decisor) a cada criterio  $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ . Una función tal constituye una aproximación a la *función de utilidad*:

$$\beta = f(z, w) \quad (39)$$

En calidad de función (39) puede ser utilizada con éxito la distancia ponderada de Tchebycheff, desde la solución ideal hasta la región de existencia de solución o una aproximación a esta distancia.

En la función (39) aparecen solamente los criterios (indicadores de eficiencia) cuantificables, mientras que los indicadores de carácter subjetivo pueden ser tomados en consideración en el proceso de selección de la solución definitiva entre un conjunto de opciones solo mediante su evaluación individual. Esta evaluación se realiza con el auxilio de procedimientos de simulación mas detallados (y precisos) que el utilizado en el procedimiento de preparación de decisiones y por medio de la observación de imágenes gráficas de las soluciones individuales.

En la generación de opciones de solución se pueden en principio utilizar todos los métodos de la Programación Matemática, en especial, los métodos iterativos de la Programación No lineal y Discreta, así como las metaheurísticas modernas.

El análisis de las imágenes gráficas y la realización de procesos de simulación especiales deben permitir al usuario evaluar los indicadores no cuantificables. En esta etapa se hace un análisis subjetivo de la adecuación de las soluciones preparadas a las necesidades del usuario y se realizan, en caso de necesidad, las modificaciones

necesarias. Es posible que el usuario decida que la importancia relativa concedida a los indicadores de eficiencia cuantificables debe ser modificada repitiéndose, en este caso, todo el procedimiento.

#### **I.4.2 Toma de decisiones en los sistemas jerárquicos discretos**

Según se deduce del estudio realizado anteriormente, la toma de decisiones en los sistemas jerárquicos discretos consiste en la selección, por el nivel de toma de decisiones de todo el sistema, de aquella combinación de soluciones locales de los subsistemas del nivel inferior, dadas por los conjuntos  $X_s^\alpha$ ,  $\forall s \in S$ , de forma tal de dar solución a (24). En dependencia del carácter de los componentes de  $Z(u^*, x)$ , pueden presentarse dos casos diferentes:

1. Todos los objetivos del sistema pueden expresarse como la suma de sus componentes por subsistemas más una componente sistémica  $z_j(x) = z_j(u^*, x) = \sum_s z_j(x_s) + \varepsilon_j(x)$ ,  $\forall j \in J$ .
2. Al menos uno de los objetivos no puede ser expresado como una función separable por subsistemas más una componente sistémica.

En ambos casos la selección de las soluciones locales se puede realizar en correspondencia con el programa de Tchebycheff, con el programa lexicográfico de Tchebycheff o con el programa aumentado de Tchebycheff. Aquí se presenta el planteamiento de la selección por el programa de Tchebycheff. Su extensión a los otros dos planteamientos no presenta dificultades.

#### **Caso de objetivos separables**

Sea cada elemento del conjunto finito  $S = (1, 2, \dots, s, \dots, n)$  puesto en correspondencia con una serie ordenada, monótona creciente de números reales :

$$\beta_1^s < \beta_2^s < \dots < \beta_i^s < \dots; \quad \beta_i^s \in R \quad (40)$$

El elemento  $i$  de (40) se corresponde con el vector solución  $x_i^s = (x_{i1}^s, \dots, x_{im}^s)$  generado por el sistema asociado a la tarea  $s \in S$ . Cada solución es evaluada por el conjunto de funciones  $z_j, \forall j \in J = (1, \dots, r)$ , con la particularidad que:

$$\beta_i^s = \max_{j \in J} \left\{ w_j \left| z_j(x_i^s) - z_{s,j}^{id} \right| \right\}, w_j \in (0, 1), \sum_{j \in J} w_j = 1 \quad (41)$$

Donde:

$z_{s,j}^{id} = \min_i z_j(x_i^s)$ : Valor ideal del indicador  $j$  en el elemento  $s$  del sistema.

$z_j(x_i^s)$ : Valor alcanzado por el indicador  $j$  en la solución  $x_i^s$  del elemento  $s$  del sistema.

La serie (40) es caracterizada por el conjunto de los índices  $I_s = (1, 2, \dots, i, \dots)$  de sus elementos.

Las combinaciones posibles de índices se determinan por los elementos:

$$e^k = (k_1, k_2, \dots, k_s, \dots, k_n)$$

del producto de conjuntos :

$$E = I_1 \times I_2 \times \dots \times I_n \quad (42)$$

Se supone que para cada  $e^k \in E$ , se pueden obtener

$$\varepsilon_j(e^k) \geq 0 \quad (43)$$

Se requiere hallar el elemento  $e \in E$  que sea solución de

$$\text{Min} \{ \beta \} \quad (44)$$

Donde:

$$\begin{aligned} \beta &= \max_{j \in J} \left\{ w_j \left| \sum_{s \in S} [z_j(x_k^s)] + \varepsilon_j(e^k) - z_j^{id} \right| \right\} = \max_{j \in J} \left\{ w_j \left| \sum_{s \in S} [z_j(x_k^s) - z_{sj}^{id}] + \varepsilon_j(e^k) \right| \right\} = \\ &= \sum_{s \in S} \beta_k^s + \max_{j \in J} \left\{ w_j \left| \varepsilon_j(e^k) \right| \right\}; \quad z_j^{id} = \sum_{s \in S} z_{sj}^{id} \end{aligned} \quad (45)$$

De esta manera, la solución del programa de Tchebycheff durante la selección de la mejor combinación de opciones de los elementos del nivel inferior de un sistema complejo (o de las subtarefas derivadas de la descomposición de una tarea de optimización discreta compleja), se reduce a la búsqueda de una combinación tal de opciones por los diferentes subsistemas que minimice la función (44). El primer término de (44) está constituido por la suma de las distancias de Tchebycheff desde las soluciones ideales locales hasta las opciones de solución que forman parte de cada combinación  $e^k$  estudiada. Esas distancias tienen el sentido físico de *pérdidas locales* de los diferentes subsistemas. El segundo término, constituido por el valor

$$\Delta\beta = \max_{j \in J} \left\{ w_j \left| \varepsilon_j(e^k) \right| \right\}, \quad (46)$$

tiene el sentido físico de *pérdidas sistémicas*, es decir, aquellas pérdidas que resultan de la interacción de los diferentes elementos del sistema.

#### *Tarea de selección de propuestas*

Sea cada elemento del conjunto finito  $S = (1, 2, \dots, s, \dots, n)$  puesto en correspondencia con una serie ordenada, monótona creciente de números reales:

$$Z_1^s < Z_2^s < \dots < Z_i^s < \dots < Z_n^s \in \mathfrak{R}$$

Esta serie es caracterizada por el conjunto de los índices  $I_s = (1, 2, \dots, i, \dots)$  de sus elementos.

Las combinaciones posibles de índices se determinan por los elementos  $e^k = (k_1, k_2, \dots, k_s, \dots, k_n)$  del producto de conjuntos  $E = I_1 \times I_2 \times \dots \times I_n$

Se supone que para cada  $e^k \in E$  se puede obtener

$$\varepsilon(e^k) \geq 0$$

Se requiere hallar el elemento  $e \in E$  que minimice la función:

$$Z(e^k) = \sum_{s \in S} Z_k^s + \varepsilon(e^k) \quad ; \quad \forall e^k \in E$$

A partir de la formulación realizada fueron estudiadas las propiedades de esta tarea y elaborado el método exacto de solución, el que se expone en el libro [3]. Con posterioridad

fueron halladas funciones de aproximación para estimar la convergencia del método como función de los parámetros de la tarea a solucionar [11, 16]. En [3, 4, 11, 16], entre otros muchos trabajos, se desarrolla el tema de la composición de opciones de solución de tareas complejas con utilización del método y algoritmo asociado, lo que se puede apreciar en los siguientes ejemplos.

#### **Ejemplo 10: Diseño óptimo multiobjetivo de redes de conductos de climatización.**

##### **Sistema de mayor envergadura**

Un sistema CAD para el diseño de redes de conductos de climatización se subordina a un sistema mayor, destinado al diseño de edificaciones civiles con todos sus elementos componentes, al que deberán prestar servicio las redes de climatización diseñadas (Fig. 17). De tal forma, el CAD objeto de estudio recibe, en calidad de información directiva, los planos de la edificación, en los que se especifican todos los detalles constructivos de los locales que se pretenden climatizar [27, 28].



**Fig. 17. Sistema de toma de decisiones de mayor envergadura.**

##### **Descomposición de la tarea de diseño de redes de conductos en subtareas componentes**

De tal forma, la tarea de diseño de la red de conductos consiste en la construcción de la red de distribución de aire para todos y cada uno de los ramales que hacen llegar el fluido a los locales, con todos sus elementos constructivos, accesorios y salidas de aire, asegurando un criterio general de eficiencia. Surge una estructura jerárquica cuya tarea central consiste en el diseño de toda la red. Para cada ramal se requiere solucionar tareas de diseño hasta los locales asignados. En la figura 18 se ilustra la estructura del sistema de diseño de la red de conductos estudiada.

##### **Análisis externo del sistema**

Las *variables de coordinación* se derivan de la tarea impuesta por el sistema de mayor envergadura y están dadas por los planos de la edificación, las restricciones de convivencia con otras redes, los requisitos relacionados con la magnitud y velocidad del fluido en las entradas de suministro de aire a los diferentes locales de la edificación. Entre las variables más importantes se encuentran:

- Designación de cada local  $i$  del ramal  $j = \varphi_i$  de la red:  $Desig_{i,j}$ .
- Valores de caudal requeridos para cada uno de los locales, los que son calculados a partir de las características constructivas y funcionales del local, así como de su orientación:  $FluLocR_{i,j}$ .
- Valores de velocidad recomendados para los locales según su designación y por la función del conducto:  $VelcR(Desig_{i,j})$ .
- Altura máxima permisible en el tramo  $h$ , en el local  $i$  en el ramal  $j$  de la red determinada por la edificación:  $AltMaxTra_{h,i,j}$ .

A partir de entrevistas efectuadas a numerosos especialistas y empresarios vinculados a los proyectos de edificaciones civiles y a la proyección de redes de conductos de las edificaciones, predominaron en calidad de *critérios de eficiencia* para el diseño de las redes de conductos de climatización, los siguientes:

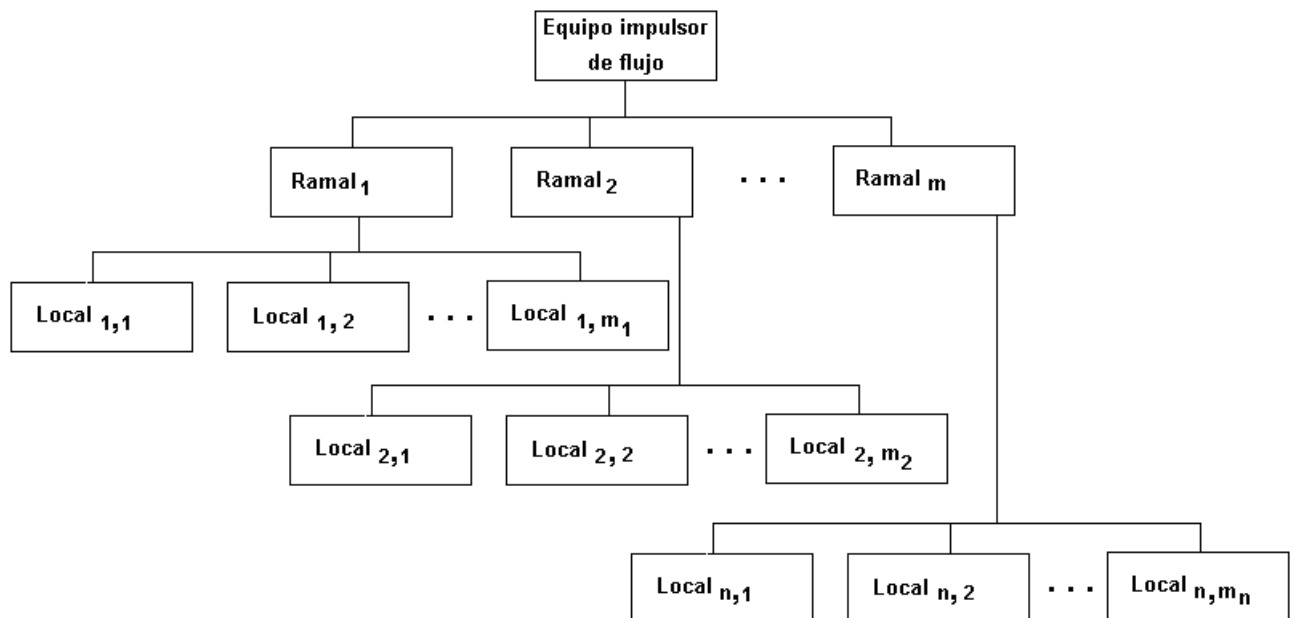
- Mínimo costo de la instalación considerando los materiales empleados y la mano de obra:  $C$ .
- Nivel adecuado de pérdidas de carga en el conducto al suministrar aire a los locales en condiciones de pleno consumo:  $P$ .
- Nivel adecuado de ruido producido por el sistema:  $R$ .
- Máxima satisfacción del inversionista por el diseño de la red en general y de las soluciones de cada uno de los locales, incluyendo la introducción de posibles opciones de solución que resulten de su interés.
- Satisfacción de las restricciones impuestas por las variables de coordinación.

Del estudio de la tarea de diseño de redes de climatización se definen, en calidad de *variables de decisión*, las siguientes:

- Cantidad de ramales en la red:  $jt$ .
- Cantidad de locales en el ramal  $j$ :  $lj$ .
- Número del ramal al que pertenece el local  $i$ :  $\varphi_i$ .
- Trayectoria que seguirá la red dentro del local  $i$  en el ramal  $j$ :  $Tray_{ij}(CantSal_{i,j})$ ;  $i \in I_j = \{i / j = \varphi_i\}$ ;  $j = 1, \dots, jt$ .
- Perfil en el tramo  $h$  del local  $i$  en el ramal  $j$  de la red:  $Perf_{h,i,j}; \forall h = 1, \dots, ht(Tray_{i,j})$ ;  $i \in I_j$ ;  $j = 1, \dots, jt$ .
- Material del conducto en el tramo  $h$  en el local  $i$  en el ramal  $j$  de la red:  $Mat_{h,i,j}; \forall h = 1, \dots, ht(Tray_{i,j})$ ;  $i \in I_j$ ;  $j = 1, \dots, jt$ .
- Tipo de dispositivos de salida de aire (difusores) para ser utilizados en el local  $i$  del ramal  $j$  de la red:  $SalLoc_{i,j}; \forall i \in I_j; j = 1, \dots, jt$ .
- Cambio ascendente de dirección de la trayectoria en el tramo  $h$  en el local  $i$  en el ramal  $j$  de la red:

$DesSup_{h,i,j}; \forall h = 1, \dots, ht(Tray_{i,j}); i \in I_j; j = 1, \dots, jt$  (variable booleana que adopta valor 0 en ausencia de cambio ascendente y 1 en presencia de este cambio).

- Cambio descendente de dirección de la trayectoria en el tramo  $h$  en el local  $i$  en el ramal  $j$  de la red:  $DesInf_{h,i,j}; \forall h = 1, \dots, ht(Tray_{i,j}); i \in I_j; j = 1, \dots, j$  (variable booleana que adopta valor 0 en ausencia de cambio ascendente y 1 en presencia de este cambio).
- Tipos de accesorios en el tramo  $h$  en el local  $i$  en el ramal  $j$  de la red:  $Acc_{m,h,i,j}; \forall m = 1, 2; h = 1, \dots, ht(Tray_{i,j}); i \in I_j; j = 1, \dots, jt$ .
- Derivaciones y transformaciones de la trayectoria en el tramo  $h$  en el local  $i$  en el ramal  $j$  de la red:  $DerTra_{h,i,j}; \forall h = 1, \dots, ht(Tray_{i,j}); i \in I_j; j = 1, \dots, jt$ .
- Tipo de codo para el codo  $k$  previsto en el tramo  $h$ , del local  $i$  en el ramal  $j$  de la red:  $TipoCodo_{k,h,i,j}; \forall k = 1, \dots, CantCod_h(Tray_{i,j}); h = 1, \dots, ht(Tray_{i,j}); i \in I_j; j = 1, \dots, jt$ .



**Fig. 18. Estructura general de la tarea de diseño de redes de conductos de climatización.**

Entre los *datos de entrada* más importantes se destacan:

- Disponibilidad de dispositivos de salida y entrada de aire y sus costos.
- Disponibilidad de accesorios y sus costos.
- Disponibilidad de derivaciones y transformaciones así como sus costos.
- Tipos de codos disponibles y sus costos.
- Materiales disponibles para los conductos y sus costos.
- Longitud del local medida en el eje X:  $DisXLoc_{i,j}$ .
- Longitud del local medida en el eje Y:  $DisYLoc_{i,j}$ .
- Longitud del local medida en el eje Z:  $DisZLoc_{i,j}$ .

- Magnitudes estandarizadas del caudal de cada tipo de difusor  $FluDif (SaWillLoc_{i,j})$ .
- Número de vías para la salida de aire del difusor:  $NumVias(SalLoc_{i,j})$ .
- Flujo máximo admisible por cada vía del difusor:  $FluMaxVia$ .
- Diferencia de temperatura admisible en °C para distintos valores de altura de techo del local:  $DifTemp_{ij}$ .
- Alcance mínimo del aire que sale por cada difusor:  $AlcDifMin (SalLoc_{i,j})$ .
- Alcance máximo del aire que sale por cada difusor:  $AlcDifMax (SalLoc_{i,j})$ .
- Largo del difusor prismático para la salida de aire:  $LarDif (SalLoc_{i,j})$ .
- Ancho del difusor prismático o diámetro del difusor circular:  $AncDif (SalLoc_{i,j})$ .
- Dimensiones estandarizadas de los posibles espesores del conducto  $EspS$ .
- Dimensiones estandarizadas de los diámetros para conductos circulares:  $DiaS$
- Costo unitario de suministro de los elementos componentes del conducto.
- Costos unitarios por mano de obra para el montaje.
- Niveles de ruido máximos normalizados para locales, por designación.
- Nivel del eje del conducto en cada tramo medido respecto al eje de la salida de aire en el equipo impulsor de flujo:  $Nivel_{h,i,j}(Tray_{i,j})$ .
- Rugosidad superficial propia de cada material según su estado:  $Rugo_{h,i,j}$ .
- Densidades de los diferentes materiales utilizados en la construcción de los conductos:  $Dens(Mat)$ .
- Valor de la presión estática en el equipo impulsor de flujo:  $Psmaq$ .

### **Análisis interno**

El análisis interno incluye una compleja metodología de cálculo de gran número de variables intermedias, las que tienen que ver con el comportamiento de los fluidos en los conductos, así como de los indicadores cuantificables de eficiencia. Con vistas a la evaluación de los indicadores no cuantificables de eficiencia se generan los planos de las soluciones intermedias y finales que son utilizadas en las diferentes etapas del proceso de preparación de decisiones.

### **Formulación matemática general de los procesos asociados**

La siguiente formalización matemática parte del supuesto de que el decisor determina, por sí mismo, la cantidad de ramales en la red ( $jt$ ), la cantidad de locales en cada ramal  $j (j_j)$ , el número del ramal al que pertenece cada local  $i (\varphi_i)$ , las trayectorias de los ramales hasta la entrada de cada local ( $Tray_{i,j}$  para  $i = 0$ ), los cambios ascendentes y descendentes de dirección de la trayectoria ( $DesSup_{h,i,j}$  y  $DesInf_{h,i,j}$ ), por lo que los valores de estas variables se consideran conocidos.

La preparación de decisiones requiere, ante todo, la definición del modelo matemático general de la

tarea de diseño de la red de conductos de climatización. A partir del análisis interno [26] se puede deducir, para el conjunto de ramales que forman parte de la red que se va a optimizar, la siguiente estructura de modelo matemático general en correspondencia con el programa de Tchebycheff:

$$\text{Minimizar} \quad \beta(x) = \max_r \left\{ w_r \left[ \sum_j z_{r,j}(x_j) + \varepsilon_{0,r}(x) \right] / x \in D \right\} \quad (47)$$

Donde:

$(z_1 = \frac{C(x)}{C^d}, z_2 = \frac{P(x)}{P^d}, z_3 = \frac{R(x)}{R^d}) \in \mathcal{R}^3$ : Vector de indicadores de eficiencia del diseño de la red. Los

valores  $z_r^d$  son todos constantes e iguales a 1, por lo que no aparecen en (47).

$C(x)$ ,  $P(x)$ ,  $R(x)$ : Costo, pérdidas de presión y magnitud de ruido de la red, determinados por los valores  $x$  de las variables de diseño de la red.

$C^d$ ,  $P^d$ ,  $R^d$ : Costo, pérdidas de presión y magnitud de ruido de la red a los que aspira el decisor

$(z_{1,j} = \frac{C_j(x_j)}{C_j^d}, z_{2,j} = \frac{P_j(x_j)}{P_j^d}, z_{3,j} = \frac{R_j(x_j)}{R_j^d}) \in \mathcal{R}^3$ : Vector de indicadores de eficiencia del diseño del

ramal  $j$  de la red.

$C_j(x_j)$ ,  $P_j(x_j)$ ,  $R_j(x_j)$ : Costo, pérdidas de presión y magnitud de ruido en el ramal  $j$  de la red, determinados por los valores  $x_j$  de las variables de diseño de la red.

$C^d$ ,  $P^d$ ,  $R^d$ : Costo, pérdidas de presión y magnitud de ruido en la red a los que aspira el decisor

$(\varepsilon_{0,1} = \frac{\Delta C(x)}{C^d}, \varepsilon_{0,2} = \frac{\Delta P(x)}{P^d}, \varepsilon_{0,3} = \frac{\Delta R(x)}{R^d}) \in \mathcal{R}^3$ : Vector del incremento de valores de los indicadores de

eficiencia de la red provocado por las intersecciones de entrada a los ramales, la necesidad de introducción de elementos amortiguadores de ruido, etc., requeridos para hacer compatibles entre sí los diferentes ramales de la red.

$x = (x_1, \dots, x_j, \dots, x_{it})$ : Vector de variables de decisión correspondiente al diseño de la red de conductos por los diferentes ramales.

$D_j = \{ x_j / g_k(x_j) \geq 0 ; x_j \in X_j \}$ : Conjunto de posibles soluciones de diseño del ramal  $j$ .

$X_j$ : Conjunto de valores admisibles para cada vector variable  $x_j = (x_{1,j}, \dots, x_{i,j}, \dots, x_{it,j})$ .

$g_k(x_j) \geq b_k$  simboliza las restricciones de diseño.

Para cada uno de los ramales  $j$  se requiere solucionar la tarea de diseño de la red de conductos de climatización de cada uno de los locales asociados al ramal. Para ello, se requiere solucionar el programa de Tchebycheff:

$$\text{Minimizar: } \beta_j(x) = \max_r \left\{ w_{r,j} \left[ \sum_i z_{r,j,i}(x_{j,i}) + \varepsilon_{r,j}(x_j) \right] / x_j \in D_j \right\} \quad (48)$$

Donde:

$$(z_{1,j,i} = \frac{C_{j,i}(x_{j,i})}{C_{j,i}^d}, z_{2,j,i} = \frac{P_{j,i}(x_{j,i})}{P_{j,i}^d}, z_{3,j,i} = \frac{R_{j,i}(x_{j,i})}{R_{j,i}^d}) \in \mathcal{R}^3: \text{ Vector de indicadores cuantificables de eficiencia}$$

del diseño del local  $i$  del ramal  $j$  de la red. Los valores  $z_{r,j}^d$  son todos constantes e iguales a 1, por lo que no aparecen en (48).

$$(\varepsilon_{1,j} = \frac{\Delta C_j(x_j)}{C_j^d}, \varepsilon_{2,j} = \frac{\Delta P_j(x_j)}{P_j^d}, \varepsilon_{3,j} = \frac{\Delta R_j(x_j)}{R_j^d}) \in \mathcal{R}^3: \text{ Vector del incremento de valores de los}$$

indicadores de eficiencia del ramal  $j$ , provocado por las intersecciones de entrada a los locales, la necesidad de introducción de elementos amortiguadores de ruido, etc., requeridos para hacer compatibles entre sí los diferentes locales del ramal.

$x_j = (x_{1,j}, \dots, x_{l,j}, \dots, x_{n,j})$ : Vector de variables de decisión correspondiente al diseño de la red de conductos asociado al ramal  $j$  de la red.

$D_{ij} = \{ x_{i,j} / g_k(x_{i,j}) \geq 0 ; x_{i,j} \in X_{i,j} \}$ : Conjunto de posibles soluciones de diseño.

$X_{i,j}$ : Conjunto de valores admisibles para cada variable  $x_{i,j}$ .

$g_k(x_{i,j}) \geq b_k$ : Simboliza las restricciones de diseño.

Las variables  $x_{i,j}$  se corresponden, respectivamente, con *Tray* <sub>$i,j$</sub> , *Perf* <sub>$h,i,j$</sub> , *Mat* <sub>$h,i,j$</sub> , *SalLoc* <sub>$h,i,j$</sub> , *Acc* <sub>$m,h,i,j$</sub> , *DerTra* <sub>$h,i,j$</sub> , *TipoCodo* <sub>$h,i,j$</sub>  (*Tray* <sub>$i,j$</sub> ) adopta valores enteros asociados a diferentes soluciones de trayectorias generadas mediante un algoritmo empírico, basado en normas de diseño y la experiencia). Para cada valor de *Tray* <sub>$i,j$</sub>  en dependencia de las dimensiones del local *DisXLoc* <sub>$i,j$</sub> , *DisYLoc* <sub>$i,j$</sub>  y *DisZLoc* <sub>$i,j$</sub> , se determinan, algorítmicamente, las cantidades de tramos  $h, \forall h = 1, \dots, ht(\text{Tray}_{i,j})$ , sus longitudes *LongTra* <sub>$h(\text{Tray}_{i,j})$</sub> , la cantidad de codos *CantCod* <sub>$h(\text{Tray}_{i,j})$</sub> , cantidad de salidas de aire en el tramo *CantSal* <sub>$h(\text{Tray}_{i,j})$</sub>  y la longitud de cada sección de tramo del conducto *Long* <sub>$k,h(\text{Tray}_{i,j})$</sub> .

En el análisis interno [26] se exponen los métodos de cálculo de  $C, P$ , y  $R$ . Por los procedimientos de cálculo de estos indicadores de eficiencia se puede afirmar que la función objetivo y las restricciones de la tarea formulada se determinan mediante procedimientos de cálculo de gran complejidad, por lo que tienen carácter no lineal. Del análisis externo se deduce que para un ramal que contenga 10 locales, incluido el

pasillo, un promedio de 10 tramos por local, se tiene un total de alrededor de 650 variables discretas. Para una red que tenga 10 ramales el número de variables alcanza unas 6500 variables. La solución directa de la tarea formulada resulta en extremo compleja, por lo que se requiere de su descomposición en una serie de subtareas.

La estructura de los modelos (48) y (49) se corresponde totalmente con la tarea de selección de propuestas bajo criterios múltiples expuesta en anteriormente, por lo que en su solución se puede aplicar el algoritmo clásico del método de Selección de Propuestas con las adecuaciones estudiadas. La estructura señalada permite la búsqueda de solución a cada una de estas tareas entre las soluciones  $\alpha$ -óptimas.

En calidad de subtareas de la tarea (48) se entienden las  $jt$  subtareas de optimización (49) correspondientes a cada ramal de la red. En calidad de subtareas de la tarea (49) se entienden las  $l|j$  tareas de optimización del diseño de cada una de las redes de los locales pertenecientes al correspondiente ramal, expresadas como la minimización de las distancias de Tchebycheff:

$$\beta_{i,j} = \max_r \{w_{r,i,j} z_{r,i,j}\} \quad (50)$$

La importancia concedida por el decisor a cada uno de los criterios de eficiencia en cada local de un ramal puede diferir a la concedida para todo el ramal. Por esta razón, los coeficientes  $w_{r,j}$  pueden ser diferentes a los correspondientes  $w_{r,i,j}$ . Para el diseño de cada ramal se requiere hallar los diseños  $\alpha$ -óptimos de cada uno de los locales del ramal, y para el diseño de la red se requiere hallar los diseños  $\alpha$ -óptimas de cada ramal de la red.

Por ello en la solución de la tarea de optimización (48) se requiere utilizar un procedimiento de doble descomposición: de la red en ramales y del ramal en locales.

### **Esquema de preparación de decisiones. Generación de las soluciones básicas por locales**

El proceso de formación de las soluciones que se presentarán como candidatas a formar parte del conjunto de soluciones  $\alpha$ -óptimas para cada local se efectúa por búsqueda exhaustiva y se realiza de la siguiente forma:

- Codificación de las variables de decisión:
  - $Perf_{h,i,j}$  adopta un valor específico para cada tipo de perfil.
  - $Mat_{h,i,j}$  adopta un código específico para cada material.

De forma análoga se codifican los posibles valores de las restantes variables de decisión,  $SalLoc_{h,i,j}$ ,  $Acc_{m,h,i,j}$ ,  $DerTra_{h,i,j}$ ,  $TipoCodo_{h,i,j}$ . Así, se crea el código general para las soluciones de diseño, con una extensión de 34 bits, el que contiene la información sobre el valor concreto que adopta cada variable de decisión en la solución en estudio. Como se observa en el ejemplo mostrado más abajo, en un mismo

tramo de conducto pueden coexistir hasta tres tipos de salidas de aire (SalLoc1, SalLoc2, SalLoc3) y hasta dos accesorios (Acc1, Acc2).

[Perfil ][ Material] [SalLoc1] [SalLoc2] [SalLoc3] [Acc1] [Acc2] [DerTra] [Codos]

[ 1 ][ 3 ][ 5 ][ 5 ][ 5 ][ 4 ][ 4 ][ 4 ][ 3 ] = 34

Por ejemplo:

1 010 00010 10010 XXXXX 0100 1100 00100 000

*Perfil (Perf)*: Prismático.

*Material (Mat)*: Zn galvanizado.

*Salidas y entradas de aire (SalLoc)*: Difusor prismático (DFP).

Salida prismática hacia arriba.

No tiene tercera salida.

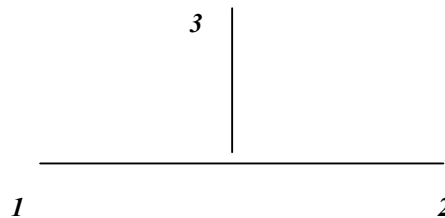
*Accesorios (Acc)*: Corta fuego.

Silenciador.

*Derivaciones y tTransformaciones del perfil (DerTra)*: Transformación centrada.

*Codos (TipoCodo)*: Sin especificación.

- *Construcción del conjunto general de soluciones.*

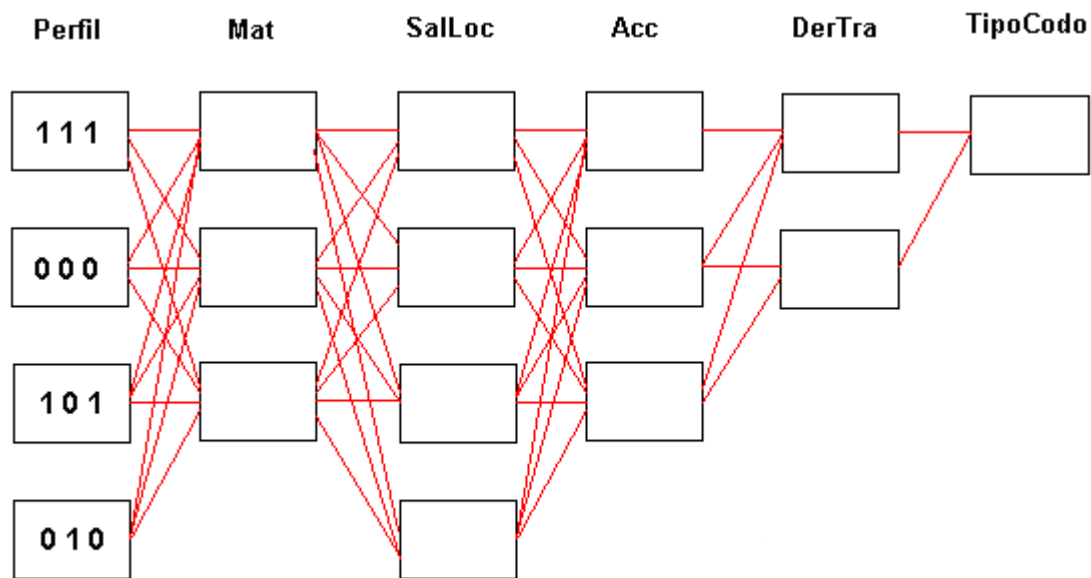


**Fig. 19. Esquema de la construcción de una derivación a 90° en un conducto.**

Para cada intersección de tramos del conducto se crea un conjunto general de soluciones candidatas a  $\alpha$ -óptimas. Por ejemplo, en el esquema de la derivación que se muestra en la figura 19, donde concurren los tramos: 1 (tramo que llega a la intersección), 2 (tramo que sale de la intersección dispuesto colinealmente al primero), 3 (tramo que sale de la intersección dispuesto perpendicularmente al primero), se forma inicialmente un conjunto con las cuatro combinaciones posibles de los perfiles de los tramos 1, 2 y 3  $\{(1\ 1\ 1), (0\ 0\ 0), (1\ 0\ 1), (0\ 1\ 0)\}$  (Fig. 20), cada combinación de perfiles se vincula con los diferentes valores de materiales para dar lugar a un nuevo conjunto de combinaciones, y así sucesivamente se van vinculando, por su orden, todos los valores posibles de las restantes variables de decisión hasta completar el formato del código de cada solución.

## Metodología para el diseño óptimo multiobjetivo

En correspondencia con el algoritmo del método de Selección de Propuestas, adecuado a las particularidades de la tarea estudiada, y definido el valor  $Tray_j$  para el conjunto  $j$  ramales hasta la entrada a los locales  $i$  pertenecientes al ramal  $j = \varphi_i$ , el esquema de preparación de decisiones adoptado se cumple en los pasos siguientes:



**Fig. 20. Esquema de formación del conjunto de soluciones  $\alpha$  óptimas por búsqueda exhaustiva.**

**Paso 1.** Se generan, para cada uno de los locales que pertenecen al ramal en estudio, todas las combinaciones posibles de valores de las variables  $Tray_{i,j}$ ,  $Perf_{h,i,j}$ ,  $Mat_{h,i,j}$ ,  $SalLoc_{h,i,j}$ ,  $Acc_{m,h,i,j}$ ,  $DerTra_{h,i,j}$ ,  $TipoCodo_{h,i,j} \forall m = 1, 2, h = 1, \dots, ht(Tray_{i,j})$  halladas por búsqueda exhaustiva. Se calculan los indicadores de eficiencia y la función de valor multiobjetivo  $\beta_{i,j}$  para cada combinación de valores y se seleccionan las soluciones  $\alpha$ -óptimas del local.

**Paso 2.** El decisor discrimina, entre las soluciones  $\alpha$ -óptimas generadas, aquellas que no satisfacen su sistema de preferencias, atendiendo a criterios de carácter subjetivo, en correspondencia con la metodología de preparación de decisiones descrita anteriormente.

**Paso 3.** Para el local pasillo, y la trayectoria  $Tray_{i,j}$  construida previamente con el uso de las herramientas de edición gráfica del sistema [26, 27], se determinan todas las combinaciones posibles de valores de las variables  $Perf_{h,i,j}$ ,  $Mat_{h,i,j}$ ,  $SalLoc_{h,i,j}$ ,  $Acc_{m,h,i,j}$ ,  $DerTra_{h,i,j}$ ,  $TipoCodo_{h,i,j}, \forall m = 1, 2, h = 1, \dots, ht(Tray_{i,j})$  halladas por búsqueda exhaustiva. Se calculan los indicadores de eficiencia y la función de valor multiobjetivo  $\beta_j$  para cada combinación de valores y se seleccionan las soluciones  $\alpha$ -óptimas del local pasillo. Con la particularidad de que el recorrido por la trayectoria  $Tray_{0,j}$  durante la

búsqueda exhaustiva se efectúa en sentido contrario al flujo de aire, a diferencia de como transcurre en el paso 1 de esta metodología.

**Paso 4.** El decisor discrimina, entre las soluciones  $\alpha$ -óptimas generadas, aquellas que no satisfacen su sistema de preferencia, atendiendo a criterios de carácter subjetivo, y queda así definido el conjunto ordenado de soluciones para el local pasillo.

**Paso 5.** Para las mejores soluciones escogidas por el usuario en cada local incluyendo el pasillo, se efectúa el cálculo de la función de valor multiobjetivo (49) para evaluar las diferentes combinaciones de uniones entre el local pasillo y el resto de los locales y se obtienen, aplicando el método de selección de propuestas, las soluciones  $\alpha$ -óptimas para el ramal, en correspondencia con la metodología de preparación de decisiones descrita anteriormente.

**Paso 6.** El decisor discrimina, entre las soluciones  $\alpha$ -óptimas generadas, aquellas que no satisfacen su sistema de preferencia, atendiendo a criterios de carácter subjetivo. Quedando definido el conjunto ordenado de soluciones para el ramal en estudio.

**Paso 7.** Se repite el procedimiento descrito en los pasos 1 al 6 para cada uno de los ramales que pertenecen a la red en estudio.

**Paso 8.** Una vez seleccionadas las soluciones  $\alpha$ -óptimas por cada ramal perteneciente a la red, se efectúa el cálculo de los indicadores de eficiencia según la función (48) para evaluar las diferentes combinaciones de uniones entre los ramales y se obtienen, aplicando el método de Selección de Propuestas, las soluciones  $\alpha$ -óptimas de la red en correspondencia con la metodología de toma de decisiones descrita anteriormente.

**Paso 9.** Se repite el procedimiento descrito en los pasos del 1 al 8 en cada una de las redes que pertenecen al sistema de climatización en estudio.

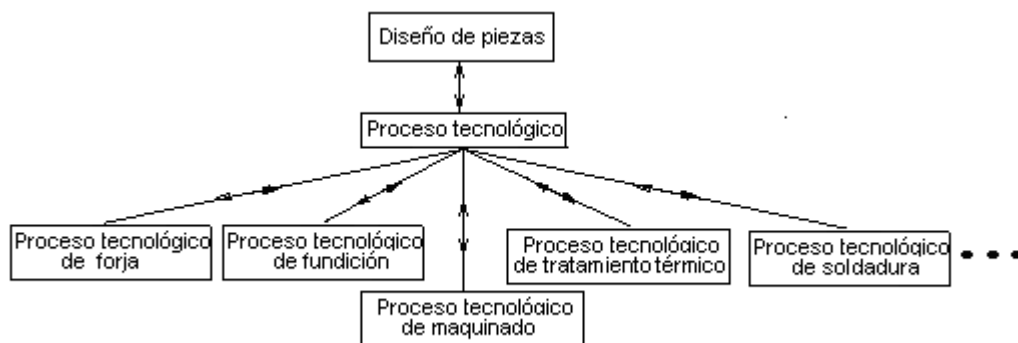
### **Ejemplo 11: Generación de tecnologías óptimas bajo criterios múltiples de maquinado en tornos con control numérico computarizado (CNC)**

#### **Sistema de mayor envergadura**

La generación de tecnologías concretas de fabricación de piezas, en particular la de maquinado en tornos, se subordina a la tarea general de fabricación de piezas, la que incluye la determinación de las secuencias óptimas de fabricación, la asignación, en una primera etapa, de tareas concretas de generación de tecnologías a sistemas particulares concebidos con este objetivo (de maquinado, fundición, estampado en

frío y en caliente, laminación, extrusión, etc.). En el proceso de generación de tecnologías concretas los sistemas del nivel inferior entregan, en una segunda etapa, opciones de tecnologías, las que incluyen propuestas de piezas intermedias para la continuación de su fabricación por otras tecnologías. En una tercera etapa el nivel superior (el de fabricación) selecciona aquella combinación de opciones de fabricación que mejor satisfacen los requisitos generales de fabricación de la pieza terminada (Fig. 21).

Como resultado, las tareas de generación de tecnologías concretas reciben del nivel superior los planos de la pieza terminada y del semiproducto inicial, así como las especificaciones técnicas de ambos, por lo que las variables de coordinación de las tareas de generación de tecnologías están constituidas por esta información [4, 18, 39, 53, 71].



**Fig. 21. Jerarquía de los procesos tecnológicos.**

#### **Descomposición de la tarea de maquinado en tornos por elementos componentes**

El maquinado de una pieza se ejecuta en diferentes fases denominadas *operaciones de maquinado*. El maquinado en tornos se realiza en diferentes *colocaciones*. En cada una se manufactura totalmente un conjunto de elementos de forma, pudiendo quedar, para la próxima colocación del conjunto ordenado de colocaciones necesarias para manufacturar la pieza, la terminación de un elemento de forma dado. En cada *elemento de forma de manufactura* se realiza un *paso tecnológico* concreto, al que se corresponde determinado *volumen a remover*.

En la práctica, el maquinado se realiza durante cada colocación para un semiproducto resultante de la colocación anterior. A partir de los elementos de forma geométricos se deben elaborar los elementos de forma de manufactura, los que han de tomar en cuenta las etapas requeridas de manufactura de la pieza. En una colocación dada se realiza por completo el maquinado de un cierto número de elementos de forma de manufactura. Lo anterior determina que en cada colocación se concluya el maquinado de los elementos de forma involucrados en esa colocación. Para un conjunto ordenado de colocaciones dado, se hace necesario buscar aquella *tecnología de maquinado* de los elementos de forma que definen la pieza, teniendo en cuenta que dicha tecnología aporte un compromiso razonable entre los diferentes indicadores de eficiencia que resultan de interés al especialista. Es decir, se requiere determinar el *conjunto de*

*pasadas* y el *régimen de maquinado* más adecuados para cada pasada, considerando un criterio de eficiencia para la fabricación de toda la pieza.

### **Análisis externo de la tarea de maquinado de piezas**

El análisis externo de la tarea de maquinado se hace con el fin de generar tecnologías para un torno en particular y un conjunto ordenado de colocaciones definido por el usuario. Este conjunto determina los diferentes volúmenes a remover del semiproducto. Se trata, precisamente, de definir la vía más racional de efectuar esta remoción.

Las variables de coordinación están dadas por el diseño de los elementos de forma de la pieza a fabricar en cada colocación, del semiproducto a utilizar en su fabricación y las especificidades técnicas de ambos:

- Geometría, material, dimensiones, acabado superficial, ajustes, tolerancias de forma y posición. Toda esta información está contenida en los elementos de forma de la pieza y del semiproducto.

A partir de encuestas realizadas a especialistas y empresarios dedicados a la fabricación de piezas fueron definidos los siguientes indicadores de eficiencia del maquinado de piezas:

- Tiempo de maquinado (o productividad).
- Energía total consumida en maquinar una pieza.
- Costo de producción.
- Aseguramiento de todos y cada uno de los valores establecidos para las variables de coordinación y de las restricciones de la máquina y herramientas seleccionadas.

Las variables de decisión de la tarea se determinan a partir de la descomposición realizada de la tarea de maquinado en elementos componentes:

- Máquina herramienta a utilizar  $\gamma$ .
- Colocación de la pieza  $\nu$ .
- Tipo de plaquita a utilizar, entre las disponibles, en cada elemento de forma  $e$ :  $\pi^e$ . Cada tipo de plaquita se caracteriza por los parámetros siguientes:

Material  $\lambda$ , geometría  $\chi$ , forma  $\eta$ , sujeción  $\zeta$ , dimensión  $\delta$ , espesor  $\varepsilon$ , anchura del chaflán  $\alpha$ , ángulo del chaflán  $\beta$ .

Cada material  $\lambda$  se caracteriza, a su vez, por un conjunto de parámetros que definen sus propiedades: dureza, límite de fluencia, composición química, y otros.

- Tipo de mango a utilizar, entre los disponibles en cada elemento de forma  $e$ :  $m^e$ . Cada tipo de mango se caracteriza por el parámetro  $\varphi$  que determina el ángulo de posición de la herramienta de corte.

- Cantidad de pasadas  $lf_e$  del elemento de forma  $e$ ;  $\forall e = 1, \dots, ef$ .
- Régimen de corte por cada pasada  $l$  del elemento de forma  $e$ :
  - Velocidad de corte  $V_c^{e,l}$  por cada pasada  $l$  del elemento de forma  $e$ .
  - Avance  $S^{e,l}$  por cada pasada  $l$  del elemento de forma  $e$ .
  - Profundidad de corte  $t^{e,l}$  por cada pasada  $l$  del elemento de forma  $e$ .

Los datos de entrada están constituidos por:

- Rangos recomendados para regímenes de corte, costos unitarios de materiales, plaquitas, máquinas, energía, fuerza de trabajo, Disponibilidad de recursos: materiales, máquinas, elementos de sujeción, plaquitas, vástagos, portaherramientas. Datos de las máquinas: potencia máxima, dimensiones del área de trabajo, revoluciones del husillo, Radio de la punta  $\rho^\pi$  de cada plaquita  $\pi$  del conjunto de plaquitas disponibles  $II$ , Longitud de la plaquita  $L^\pi$  de cada plaquita  $\pi$  del conjunto de plaquitas disponibles  $II$ . Todo lo anterior es información contenida en la base de datos del sistema CAPP.

En calidad de variables intermedias de interés se destacan:

- Los volúmenes a remover  $Q_0^e$  están asociados a cada *elemento de forma de manufactura* y determinan los correspondientes pasos tecnológicos  $\psi^e$  necesarios para fabricar todos y cada uno de los *elementos de forma geométricos*. Los conceptos *elemento de forma de manufactura* y *elemento de forma geométrico* constituyen, en este trabajo, abstracciones derivadas del concepto *elemento de forma*, los que se utilizan para significar la información de manufactura o geométrica derivadas de forma inmediata de los objetos *elementos de forma*.
- Las variables  $\psi^e$  pueden adoptar los siguientes valores: *Desbaste pesado*, *desbaste medio*, *desbaste*, *acabado*, y *extra acabado*. Las operaciones a realizar durante el maquinado de un elemento de forma se determinan durante la creación del modelo único de la pieza.

### Elementos del análisis interno de la tarea de maquinado de las piezas

A partir de metodologías de cálculo existente en la bibliografía especializada [4, 18, 39] se calcula:

Tiempo de maquinado de una pieza:  $T_u = T_m + T_p + T_a + T_n$

Donde:

$T_m$ : Tiempo de manipulación de material.

$T_n$ : Tiempo perdido por cambio de herramienta, requerido por tecnología, al pasar de la pasada anterior a la presente.

$T_a$ : Tiempo utilizado en cambios de herramientas, determinados por el desgaste durante el corte

$T_p$ : Tiempo principal de corte de la pieza.

El tiempo de manipulación del material  $T_m$  tiene que ver con la máquina herramienta  $\gamma$  y el esquema de montaje  $\nu$  seleccionados para maquinar toda la pieza. El tiempo principal se determina por los volúmenes a remover en cada pasada  $l$ . El tiempo perdido por cambios de herramientas, consecuencia del desgaste durante el maquinado  $T_a$ , es función del tiempo principal utilizado  $T_p$  y por la vida útil de la herramienta (plaquita). El tiempo de cambio de herramienta, determinado por tecnología:  $T_n$ , está asociado al tipo de plaquita seleccionado  $\pi^{e,l}$  para cada pasada de cada elemento de forma.

Por ello, el tiempo de maquinado de la pasada  $l$  de un elemento de forma  $e$  de una pieza se plantea como sigue:

$$T_u^{e,l} = T_p^{e,l} + T_a^{e,l} N + T_n^{e,l}, \quad \forall e = 1, \dots, ef; l=1, \dots, lf_e$$

Donde:

$T_u^{e,l}$ : Tiempo necesario para maquinar el elemento de forma  $e$ .

$T_p^{e,l}$ : Tiempo principal de corte del elemento de forma  $e$ , en la pasada  $l$ .

$N = T_p^{e,l} / T$ : representa el número de herramientas afiladas o plaquitas gastadas para dar una pasada  $l$ .

$T_a^{e,l}$ : Tiempo utilizado en cambio de herramienta, determinado por herramientas afiladas o plaquitas gastadas.

$T_n^{e,l}$ : Tiempo perdido por cambio de herramienta, requerido por tecnología, al pasar de la pasada anterior a la presente, el que depende de las plaquitas seleccionadas en las pasadas anterior y presente.

$T$ : Tiempo de vida útil de la plaquita.

La expresión anterior es equivalente a:

$$T_u^{e,l} = T_p^{e,l} (1 + T_a^{e,l} / T) + T_n^{e,l}, \quad \forall e = 1, \dots, ef; l=1, \dots, lf_e$$

En el caso general se necesitan varias pasadas para producir la forma deseada. Como la  $l$ -ésima pasada del elemento de forma  $e$  se hará con el régimen de corte  $t^{e,l}$ ,  $V_c^{e,l}$ ,  $S^{e,l}$  se tiene:

$$T_p^{e,l} = Q_0^{e,l} / t^{e,l} V_c^{e,l} S^{e,l}, \quad \forall e = 1, \dots, ef; l=1, \dots, lf_e$$

Donde:

$Q_0^{e,l}$ : Volumen de material a remover en la pasada  $l$  del elemento de forma  $e$  [mm<sup>3</sup>].

$t^{e,l}$ : Profundidad de corte [mm].

$V_c^{e,l}$ : Velocidad de corte [mm/min].

$S^{e,l}$ : Avance [mm/rev].

Para maquinar un elemento de forma se requiere del tiempo:

$$T_u^e = \sum_{l=1}^{lf_e} (Q_0^{e,l} / t^{e,l} V_c^{e,l} S^{e,l}) (1 + T_a / h (V_c^{e,l} / V_{15})) + T_n^{e,l}.$$

El tiempo total de maquinado de la pieza en el torno se calcula como:

$$T_u = T_m + \sum_{e=1}^{ef} T_u^e$$

### Energía necesaria para maquinar una pieza

Se calcula a partir de la potencia consumida en cada pasada de cada elemento de forma

$$Pot^{e,l} = (t^{e,l} V_c^{e,l} S^{e,l} K_{C0,04}^{e,l} / 60 \cdot 10^3) (0.4 / S^{e,l} \text{sen } \varphi^{e,l})^{0.29}$$

Donde:

$Pot^{e,l}$  : Potencia requerida por la operación [kW].

$K_{C0,4}^{e,l}$  : Fuerza específica para un espesor de viruta 0.4 mm [N].

La energía total en maquinar una pieza es:

$$E = \sum_{e=1}^{ef} \sum_{l=1}^M E^{e,l}$$

Donde:

$E^{e,l} = Pot T_p^{e,l}$  : Potencia consumida en la pasada  $l$  del elemento de forma  $e$ .

### Costo para maquinar una pieza

El costo de una pieza se expresa de acuerdo con la siguiente expresión:

$$C_{pieza} = C_{Mat} + C_{Salario} + C_{Energia} + C_{Amortz}$$

Donde:

$C_{pieza}$ ,  $C_{Mat}$ ,  $C_{Energia}$  : Costos de la pieza, del material utilizado y de la energía consumida en maquinar la pieza, respectivamente.

$C_{Salario}$ : Gastos en salario requeridos para maquinar la pieza.

$C_{Amortz}$  : Gastos en amortización del equipamiento, atribuibles a la pieza.

La preparación de decisiones requiere ante todo la definición del modelo matemático general de la tarea de generación de tecnología de maquinado de los elementos de forma de una pieza, y que forman parte de un montaje dado. A partir del análisis interno expuesto anteriormente se puede deducir, para una máquina herramienta  $\gamma$  y un esquema de montaje  $\nu$  dados, la siguiente estructura de modelo matemático general, correspondiente al programa de Tchebycheff:

$$\text{Minimizar: } \beta = \max_r \left\{ w_r \left[ \sum_{e=1}^{ef} z_{e,r}(x_e) + \varepsilon_r(x) / x \in D \right] \right\} \quad (51)$$

Donde:

$$(Z_1(x) = \frac{C(x)}{C^d}, Z_2(x) = \frac{E(x)}{E^d}, Z_3(x_e) = \frac{T(x)}{T^d}) \in \mathcal{R}^3: \text{ Vector de indicadores de eficiencia}$$

del régimen de maquinado.

$w_r$ : Coeficiente que refleja la importancia concedida por el decisor al indicador de eficiencia  $r$  durante el maquinado de la pieza.

$$(Z_{e,1}(x_e) = \frac{C_e(x_e)}{C_e^d}, Z_{e,2}(x_e) = \frac{E_e(x_e)}{E_e^d}, Z_{e,3}(x_e) = \frac{T_e(x_e)}{T_e^d}) \in \mathcal{R}^3: \text{ Vector de indicadores de eficiencia de}$$

maquinado del elemento de forma  $e$  de la pieza.

$$z_{e,r}(x_e) = \sum_{l=1}^{me} z_{e,l}(x_{e,l}) + \varepsilon_e(x_e): \text{ Valor del indicador } r \text{ alcanzado en el elemento de forma } e.$$

$$Z_{e,i,1}(x_{e,i}) = \frac{C_{e,i}(x_{e,i})}{C_{e,i}^d}, Z_{e,i,2}(x_{e,i}) = \frac{E_{e,i}(x_{e,i})}{E_{e,i}^d}, Z_{e,i,3}(x_{e,i}) = \frac{T_{e,i}(x_{e,i})}{T_{e,i}^d} \in \mathcal{R}^3: \text{ Vector de indicadores de}$$

eficiencia del régimen de maquinado en la pasada  $l$  del elemento de forma  $e$ .

$\varepsilon_e(x_{e,i}) = (\Delta C_e, \Delta E_e, \Delta T_e) \in \mathcal{R}^3$ : Vector del incremento de valores de los indicadores de eficiencia provocado por los cambios de plaquitas, determinados tecnológicamente, durante el maquinado del elemento de forma  $e$  de la pieza.

$x = (\gamma, \nu, x_1, \dots, x_e, \dots, x_e)$ : Vector de variables de decisión correspondiente a la tecnología de maquinado de la pieza.

$x_e = (\pi^e, m^e, l_f, x_{e1}, x_{e2}, \dots, x_{el}, \dots, x_{elf})$ : Vector de variables de decisión correspondiente al elemento de forma  $e$ .

$x_{e,l} = (V_c^{e,l}, S^{e,l}, t^{e,l})$ : Vector de variables de decisión correspondiente a la pasada  $l$  del elemento de forma  $e$ .

$\varepsilon(x) = (\Delta C, \Delta E, \Delta T) \in \mathcal{R}^3$ : Componente del valor de la función objetivo correspondiente a los cambios de plaquita, determinados tecnológicamente, entre elementos de forma requeridos para maquinar la pieza.

$D_e = \cup D_{e,l}$ : Espacio de posibles valores de las variables de decisión para un elemento de forma  $e$ .

$D_{e,l} = \{x_{e,l} / g_e(x_{e,l}) \geq 0 ; x_{e,l} \in X_{e,l}\}$ : Conjunto de posibles soluciones que satisfacen las restricciones planteadas en el análisis interno y que, además, satisfacen los intervalos de definición de las variables de decisión.

Además, debe de cumplirse que:  $l_f \geq l_f^{\min}$ .

El esquema de solución desarrollado se expone a continuación:

**Paso 1.** Se discriminan del conjunto de plaquitas disponibles, aquellas que no pueden ser utilizadas, por sus propiedades mecánicas (parámetro  $\lambda$ ) o por su forma (parámetro  $\eta$ ) para maquinarse el elemento de forma  $e$ ,  $\forall e = 1, \dots, ef$ .

**Paso 2.** Luego de obtener las formas de plaquitas se discriminan de la selección de los mangos disponibles, los que no pueden ser utilizados por sus propiedades mecánicas (parámetro  $\lambda$ ), restricción de accesibilidad, sentido del corte que pueda realizar para maquinarse el elemento de forma  $e$ ,  $\forall e = 1, \dots, ef$ .

**Paso 3.** Para cada una de las opciones de herramientas del elemento de forma que está siendo procesado se ejecutan los pasos del 4 al 8.

**Paso 4.** Se calcula la cantidad de pasadas  $lf_e$  para cada opción  $Prp$  de herramientas obtenidas en los pasos 1 y 2, por cada elemento de forma  $e$ .

**Paso 5.** Se selecciona un régimen inicial de maquinado (valores recomendados de  $S$ ,  $t$ ,  $V_c$ ) a partir de las tablas correspondientes de la base de datos. Este procedimiento se efectúa para cada opción  $Prp$  de herramientas, por cada elemento de forma  $e = 1, \dots, ef$ , en cada pasada  $l$ .

**Paso 6.** Se calcula la potencia de cada pasada, para un régimen de maquinado (valores recomendados de  $S$ ,  $t$ ,  $V_c$ ). Este procedimiento se efectúa para cada opción  $Prp$  de herramientas, de cada elemento de forma  $e$ ,  $\forall e = 1, \dots, ef$ , en cada pasada  $l$ .

**Paso 7.** Se evalúan los límites inferiores y superiores de las restricciones del modelo. Este procedimiento se efectúa para cada opción  $Prp$ , de cada elemento de forma  $e$ ,  $\forall e = 1, \dots, ef$ , en cada pasada  $l$ .

Los pasos 6 y 7 se ejecutan hasta que las restricciones se cumplan. Si la restricción de la potencia no se cumple, entonces se modifica el valor de la profundidad de corte, de manera tal que este disminuya y la potencia calculada (para la pasada) con los valores recomendados sea menor que la de la máquina.

**Paso 8.** Para cada opción analizada de herramientas  $Prp$  a ser utilizadas en la fabricación de un elemento de forma  $e$  se selecciona un régimen factible de maquinado (valores iniciales de  $S$ ,  $t$ ,  $V_c$ ), el que con posterioridad se somete a un proceso de optimización por el método *Complex* de Programación no Lineal. La optimización del régimen de corte para el maquinado de todas las pasadas  $l$  del elemento de forma  $e$  se realiza por el modelo siguiente.

Minimizar:

$$\beta^e = \max_r \left\{ w_r \left[ \sum_{l=1}^{lf_e} z_{e,l,r}(x_{e,l}) + \varepsilon_r(x_e) \right] \right\} \quad (52)$$

Asegurando el cumplimiento de las restricciones:

$$t_{min}^{e,l} \leq t^{e,l} \leq t_{max}^{e,l} ; \quad \forall l \in (1, lf_e) \quad (53)$$

$$s^{e,l}_{min} \leq s^{e,l} \leq s^{e,l}_{max} ; \quad \forall l \in (1, lf_e-1) \quad (54)$$

$$v^{e,l}_{min} \leq v^{e,l} \leq v^{e,l}_{max} ; \quad \forall l \in (1, lf_e) \quad (55)$$

$$n^{e,l}_{min} \leq n^{e,l} \leq n^{e,l}_{max} ; \quad \forall l \in (1, lf_e) \quad (56)$$

$$0 \leq Pot^{e,l} \leq Pot^{e,l}_{max} ; \quad \forall l \in (1, lf_e) \quad (57)$$

$$0 \leq s^{e,lf_e} \leq \sqrt{8\rho Ra 10^{-3}} \quad (58)$$

$$(D_1 - D_2) / 2 = \sum_{e=1}^{lf_e} t^e \quad (59)$$

La restricción anterior (59) asegura la dimensión del elemento de forma de diseño procesado, teniendo en cuenta la sobre medida especificada.

Para  $lf_e = 1$  el modelo (52)–(59), describe el caso del *modelo de una sola pasada*. Se puede apreciar que el *modelo de múltiples pasadas* se construye con las mismas expresiones funcionales que el de una sola pasada, solo que con mayor número de variables.

Las particularidades de la tarea estudiada hacen posible la determinación de un *régimen de corte factible inicial*, el que se expresa:

$$v^{e,l}_c = v_{c0}$$

$$t^{e,l}_c = t_0$$

$$s^{e,l}_c = s_0$$

Por cada pasada  $l$ , en cada elemento de forma  $e$ ,  $v^{e,l}_c$ ,  $t^{e,l}_c$ ,  $s^{e,l}_c$  son los valores inicialmente recomendados.

**Paso 9.** Generación de opciones de plaquitas y de regímenes de maquinado, ordenados por el valor de  $\beta^e(x_e)$ , a ser utilizadas en todas y cada una de las pasadas del elemento de forma  $e$ ,  $\forall e = 1, \dots, ef$ . Las opciones de plaquitas generadas se corresponden con un valor determinado de  $lf_e$ .

**Paso 10.** Se soluciona el programa de Tchebycheff (51) mediante el algoritmo de Selección de Propuestas. En cualquier caso se presupone la optimización de los regímenes de corte para todos y cada uno de los elementos de forma de maquinado para cada código de herramienta con su ángulo determinado por el algoritmo mencionado.

## Caso de objetivos no separables

Este es el caso en que al menos uno de los objetivos no puede ser expresado como una función separable por subsistemas más una componente sistémica, o bien cuando por

razones de convergencia (comparativamente altos valores de  $\varepsilon(x)$ ) no resulta conveniente tal expresión. En este caso la formulación del problema de toma de decisiones se reduce a la siguiente.

Sea cada elemento del conjunto finito  $S = (1, 2, \dots, s, \dots, n)$  puesto en correspondencia con una serie ordenada, monótona creciente de números enteros:

$$I_s = (1, 2, \dots, i, \dots), \quad \forall s \in S \quad (60)$$

La serie (60) representa diferentes opciones de solución a cada una de las subtareas  $s \in S$ .

Las combinaciones posibles de elementos de los conjuntos (60) se determinan por los elementos  $e^k = (k_1, k_2, \dots, k_s, \dots, k_n)$  del producto de conjuntos  $E = I_1 \times I_2 \times \dots \times I_n$

Para cada  $e^k \in E$ , se requiere minimizar

$$\text{Min} \{ \beta \} \quad (61)$$

Donde:

$$\beta = \max_{j \in J} \left\{ w_j \left| z_j(e^k) - z_j^{id} \right| \right\} \quad (62)$$

Asegurando el cumplimiento de un conjunto de restricciones:

$$g_j(e^k) \geq b_j; \quad \forall j = 1, \dots, m \quad (63)$$

Esta tarea recibe el nombre de *Tarea Generalizada de Selección de Propuestas* y para su solución fue desarrollado por el autor de este trabajo el método de *Integración de Variables*, el que presupone la evolución de poblaciones de códigos de solución mediante diferentes operadores.

## 1.5 Método de Integración de Variables

El concepto del método de Integración de Variables se vincula a la evolución de la cantidad requerida de códigos con ayuda de cualquier conjunto de operadores para actualizar los

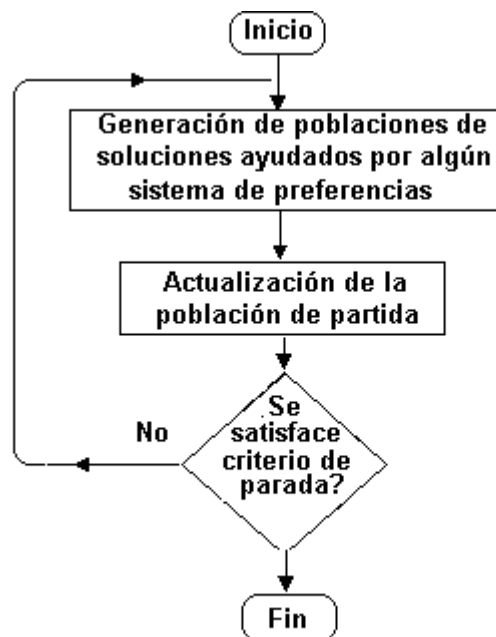
miembros de una población [12]. Los rasgos generales de este método son los siguientes (Fig. 22).

- Las posibles variantes de solución son codificadas en uno o más códigos variables.
- Se genera, según un procedimiento característico para cada realización particular del método, un juego de  $n$  soluciones próximas al óptimo. En particular, en calidad de procedimientos pueden usarse diferentes métodos iterativos de la Programación No lineal y Discreta aplicados a los códigos de solución, con entornos de búsqueda seleccionados al azar, determinísticamente o de forma combinada. Cada procedimiento particular de generación de poblaciones se corresponde con una variante concreta de aplicación del método. Un caso particular de procedimiento está constituido por una sucesión dada de operadores genéticos aplicada a una población inicial, lo que lleva a los Algoritmos Genéticos.
- Aunque la selección del criterio de parada obedece, en el caso general, a las particularidades de cada aplicación concreta, en la mayoría de los casos debe ser eficaz la condición de lograr una cantidad dada de iteraciones sin modificaciones de la población (o lo que es equivalente, sin variar el valor de la función de calidad del peor elemento de la población).

De tal forma, la aplicación de cualquier heurística derivada del método de Integración de Variables requiere de la definición de los siguientes problemas:

- Un sistema de codificación para la representación de las posibles soluciones del problema estudiado.
- Un método para la creación de la población inicial.
- Una función de calidad (*fitness*) que permita ordenar los códigos de acuerdo con los valores de la función objetivo.
- Operadores que permiten alterar la composición de los códigos de las soluciones en las poblaciones sucesivas.

- Valores de los parámetros requeridos por el algoritmo utilizado (tamaño de la población, probabilidades asociadas con la aplicación de ciertos operadores, etc.).



**Fig. 22. Esquema general del método de Integración de Variables.**

Es necesario aclarar que aunque el autor propuso por primera vez explícitamente el concepto del método de Integración de Variables y sus particularidades distintivas, este concepto ha sido aplicado de hecho en numerosos trabajos aparecidos en años recientes en la literatura especializada. Así, en el artículo de Michalewicz [51] se explican algunos algoritmos evolutivos aplicados a los problemas de optimización no lineales con restricciones, los que aportan nuevos operadores al método de Integración de Variables. Particularmente, en este grupo pueden ser incluidos los métodos aparecidos en la Sección 3.1 de ese artículo. Por otro lado, los Algoritmos Genéticos (AG) estructurados y otros AG complejos constituyen casos particulares del uso de conjuntos de códigos para describir opciones de la solución [31]. El método de Selección de Propuestas [3, 11] constituye otro ejemplo del uso de códigos variables múltiples para describir las soluciones.

A pesar de la general aceptación recibida en los últimos años por los Algoritmos Genéticos en muchos casos han aparecido dificultades en su aplicación a los problemas de optimización debido a las siguientes causas:

- Dependiendo de la naturaleza de las funciones objetivos pueden ser generados cromosomas muy malos combinando bloques de códigos buenos, lo que hace fracasar la hipótesis de los *building block* [31].
- No hay garantía de obtener la solución óptima global usando AG, aunque ellos tienen la tendencia a hacerlo. Esta tendencia se reduce cuando hay una pérdida de diversidad genética de la población, lo que puede conducir a poblaciones de baja calidad [10, 51, 66].
- Los Algoritmos Genéticos encuentran dificultades en la búsqueda de solución a problemas de la Programación No Lineal con restricciones [51].
- Una restricción importante para usar los AG consiste en la lentitud del proceso de búsqueda de este método comparado con otros [31].

Estas dificultades pueden propiciar la sustitución de los AG en muchas de sus actuales aplicaciones por otros algoritmos propios del método de Integración de Variables.

### **I.5.1 Búsqueda por Localización Aleatoria del Extremo de una Función de un Código Variable**

En la figura 23 se ilustra la aplicación práctica del método de Integración de Variables al caso concreto, cuando los procedimientos de búsqueda de mínimos locales de una función de un código variable de posibles soluciones a la tarea dada de optimización discreta con variación aleatoria de los intervalos de la búsqueda, para la actualización de las sucesivas poblaciones de soluciones [12, 14].

Como se puede observar en la figura 23, en cada iteración se realiza la búsqueda del mínimo de una función de códigos variables (los que constituyen los valores, en el sistema decimal de numeración, de la variable-código de la solución buscada). Los valores iniciales del código variable se generan aleatoriamente dentro del intervalo de posibles valores del código variable de solución. La búsqueda de soluciones se realiza

por el método de Localización de la Programación No lineal. La función de calidad  $Z$  puede interpretarse de la misma forma que en los Algoritmos Genéticos, como *fitness*, y podría incluir el resultado del cálculo de una función de penalidad por el incumplimiento de las restricciones. Como un caso particular de funciones de penalidad puede utilizarse el rechazo de soluciones no factibles. En cada paso de localización se incluye en la población la mejor solución encontrada, mientras el tamaño de la población sea menor que el establecido (CSol) o se actualiza la población en caso de que ésta halla alcanzado ya el tamaño establecido. Como actualización se entiende la comparación del valor de la función objetivo de la mejor entre las dos soluciones generadas en el paso dado ( $x^{min}$ ), con el de la peor solución de la población, y si este valor es inferior al de la peor solución de la población, entonces se sustituye esta última solución por  $x^{min}$ . Una vez que es alcanzada la precisión  $\delta$  prevista se reinicia el proceso de generación de valores aleatorios de  $x$ .

En la figura 24 se ilustra la ejecución de un paso de localización por el algoritmo propuesto. En cada iteración se generan dos códigos variables en el intervalo  $x^{inf}-x^{sup}$ . De los tres subintervalos obtenidos se elimina aquel que contiene el mayor valor de  $Z$  y se vuelven a generar otros dos valores dentro del subintervalo obtenido. El proceso se repite mientras la longitud del intervalo  $x^{inf}-x^{sup}$  sea superior a una precisión dada. Mientras el tamaño de la población sea inferior a lo establecido, se añade a la población, en cada paso, aquella solución con el menor valor de  $Z$  entre los dos códigos generados. Una vez alcanzado el tamaño requerido de la población se compara el menor valor de  $Z$  entre los dos códigos generados con la peor solución, y en caso de tener menor valor de  $Z$ , la solución correspondiente sustituye a la peor de la población.

El máximo valor requerido para el código variable se puede calcular, para un total de  $m$  variables del problema de optimización estudiado, como:

$$Inter_0 = \prod_{i=1}^m MaxCod(i)$$

Donde:

$Inter_0 = x^{sup}$ : Longitud inicial del intervalo de búsqueda.

$MaxCod(i)$ : Número máximo de opciones de solución previstas de la variable  $i$ .

Para calcular el valor de  $Z$  para cada valor  $x$  generado se requiere convertir ese valor de código en opciones de solución de cada una de las  $m$  variables de la tarea en cuestión. Un posible algoritmo para la decodificación de los valores generados del código variable  $x$  es el siguiente:

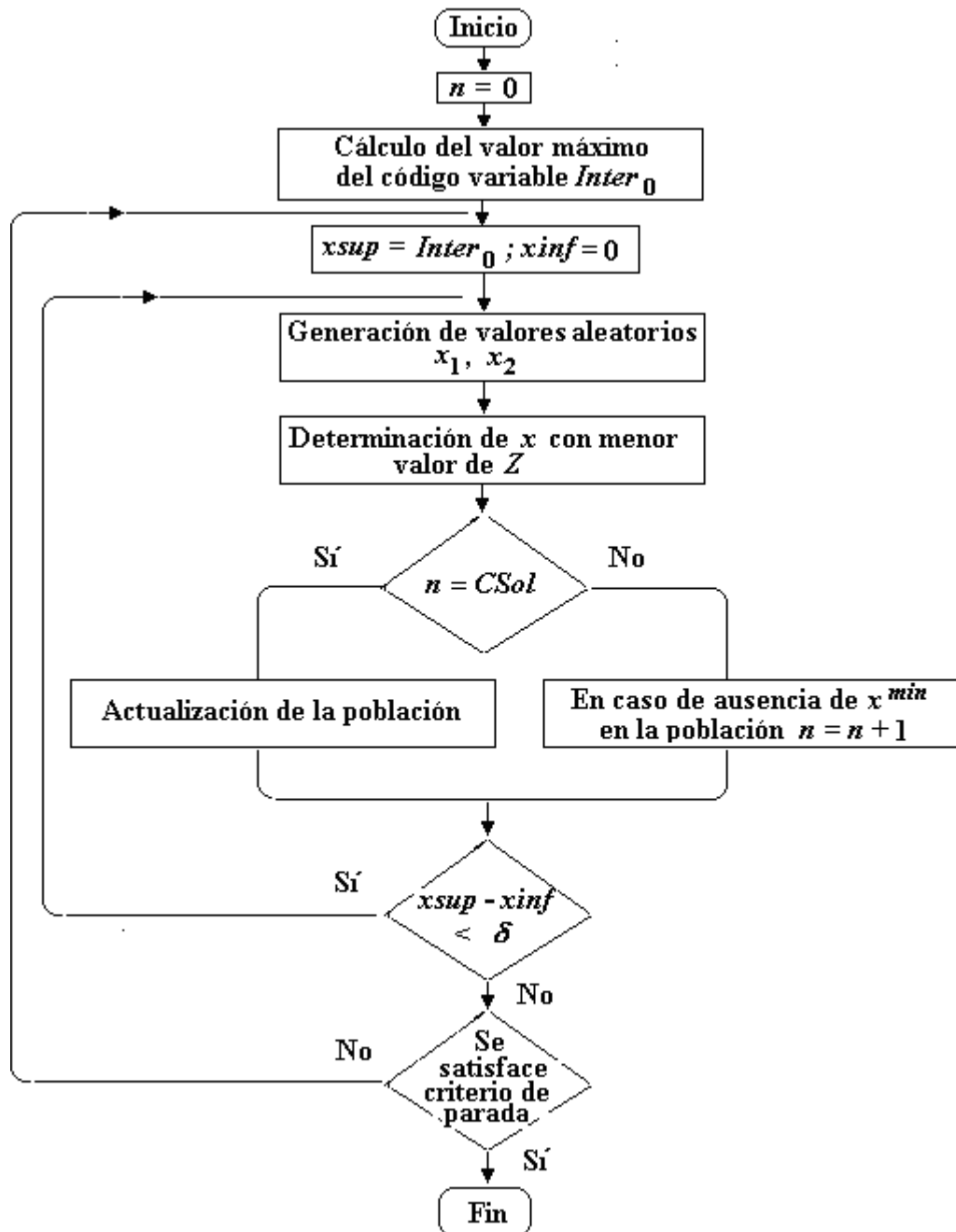


Fig. 23. Esquema del Algoritmo de Localización Aleatoria.

For  $i = 1$  to  $m$

$$Cod(i) = x \bmod MaxCod(i) + 1$$

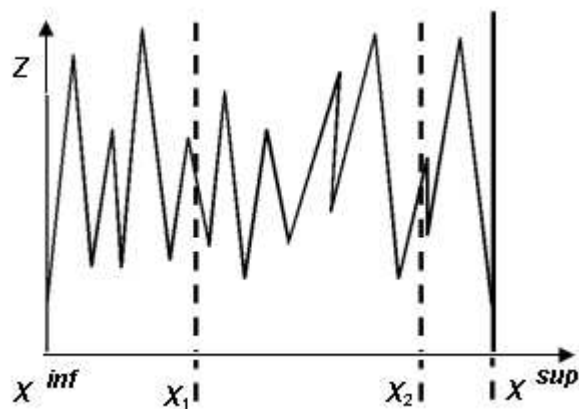
$$x = [x / MaxCod(i)]$$

Next  $i$

Donde:

$Cod(i)$  : Consecutivo de solución de la variable  $i$ .

$[a]$  : Parte entera de  $a$ .



**Fig. 24. Ilustración de la ejecución de un paso de localización.**

### **Ejemplo 12: Diseño óptimo bajo criterios múltiples de redes hidráulicas cerradas**

Las redes hidráulicas se encuentran muy difundidas en las ingenierías. Sus soluciones de diseño requieren ser realizadas sobre la base de la elevada integración de la información durante el proceso de análisis y estudio de la tarea, de la aplicación de los métodos modernos de preparación y toma de decisiones, así como de la organización racional de los procedimientos de cálculo [35].

#### **Análisis externo de la tarea de diseño de redes hidráulicas**

Las variables de decisión del sistema de mayor envergadura, asociadas al sistema dado, constituyen las variables de coordinación del sistema de diseño estudiado:

- Ubicación espacial de los nodos de la red.
- Tipo de nodo (suministro, consumo, mixto).
- Destino de servicio de la red (tipo de fluido: aceite, agua, petróleo, etc.).
- Tipo de red (industrial, urbana, etc.).
- Presión mínima adecuada en cada nodo.

- Demanda necesaria en cada nodo.
- Menor y mayor perímetro permisible en los circuitos de la red cerrada.
- Obtención uniforme de los circuitos de la red cerrada según perímetros.

Se establecen como indicadores de eficiencia:

- Valor mínimo de pérdida de energía.
- Costo total mínimo de la red hidráulica.

Son variables de decisión del sistema las siguientes:

- Existencia de tramos entre nodos.
- Diámetro de la tubería en cada tramo.
- Altura de presión de cada nodo de suministro (uno o el otro).

Resultan de interés para el decisor las variables intermedias siguientes:

- Velocidad del líquido en cada tramo.
- Altura de presión en los nodos.

Entre los datos de entrada se encuentran los siguientes:

- Temperatura del líquido.
- Viscosidad cinemática (según tipo de líquido y temperatura).
- Material de la tubería.
- Rugosidad equivalente (según tipo de material de la tubería).
- Coeficiente de resistencia local (según tipo de accesorio).
- Costo de todos los elementos que intervienen en el cálculo económico (materiales, operaciones, etcétera).
- Valores mínimo y máximos de velocidad y presión (según destino de servicio de la red).

### **Análisis interno de la tarea de diseño de redes hidráulicas**

#### *Cálculo de la función de calidad del sistema*

Se establece como aproximación de la función de utilidad multiobjetivo la minimización de la distancia de Tchebycheff desde una solución deseada hasta la región de existencia de solución. Esto permite muestrear, mediante la modificación de los pesos correspondientes, el conjunto de soluciones eficientes de que se trate.

Teniendo en cuenta los indicadores de eficiencia, pérdida de energía y costo total en la red, se minimiza la distancia ponderada de Tchebycheff afectando cada parámetro por un peso establecido por el decisor.

$$Z = \max \left\{ w \frac{E - E^{id}}{E^{id}}, (1 - w) \frac{C - C^{id}}{C^{id}} \right\} \quad (64)$$

Donde:

$E, E^{id}$ : Pérdida total calculada e ideal de energía en la red, respectivamente.

$C, C^{id}$ : Costo total calculado e ideal de construcción de la red, respectivamente.

Toda red hidráulica presenta determinadas restricciones en relación a los valores de altura de presión en los nodos y velocidad del caudal en los tramos.

$$P_i^{inf} \leq P_i \leq P_i^{sup}, \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (65)$$

$$Vel_j^{inf} \leq Vel_j \leq Vel_j^{sup}, \quad \forall j = 1, \dots, n \quad (66)$$

Donde:

$P_i, P_i^{inf}, P_i^{sup}$ : Presión calculada y límites inferior y superior a la presión establecidos para el nodo  $i$  de la red, respectivamente.

$Vel_j, Vel_j^{inf}, Vel_j^{sup}$ : Velocidad calculada y límites inferior y superior a la velocidad establecidos para el tramo  $j$  de la red, respectivamente.

Las restricciones anteriores se toman en consideración mediante el cálculo del valor de una función de penalización  $Pen$  según el método de J. N. Kelley [ 29].

Teniendo en cuenta lo anterior se establecen penalizaciones por el incumplimiento de las restricciones a los parámetros de la red.

$$Pen = \sum_{i=1}^m 10^{25} \theta_i (P_i^{inf} - P_i) + \sum_{i=1}^m 10^{25} \mu_i (P_i - P_i^{sup}) + \sum_{j=1}^n 10^{25} \delta_j (Vel_j^{inf} - Vel_j) + \sum_{j=1}^n 10^{25} \varphi_j (Vel_j - Vel_j^{sup}) \quad (67)$$

Donde:

$$\theta_i = \begin{cases} 1 - Si & P_i < P_i^{inf} \\ 0 - en & otro caso \end{cases}; \quad \mu_i = \begin{cases} 1 - Si & P_i > P_i^{sup} \\ 0 - en & otro caso \end{cases};$$

$$\delta_j = \begin{cases} 1 - Si & Vel_j < Vel_j^{inf} \\ 0 - en & otro caso \end{cases}; \quad \varphi_j = \begin{cases} 1 - Si & Vel_j > Vel_j^{sup} \\ 0 - en & otro caso \end{cases};$$

El indicador de eficiencia generalizado para cada variante de red se calcula a partir de la función calidad más las penalizaciones por concepto de velocidades y presiones no permisibles.

### **Indicador de eficiencia generalizado**

El indicador de eficiencia generalizado para cada variante de red se calcula a partir de la función calidad más las penalizaciones por concepto de velocidades y presiones no permisibles.

$$Z' = Z + Pen \quad (68)$$

Donde:

$Z'$  : Indicador de eficiencia generalizado para cada variante de red.

### **Metodología para satisfacer el sistema de preferencias de un potencial decisor**

1. Determinación del trazado de la red de mayor cantidad de circuitos.
2. Determinación de la red mínima priorizada.
3. Generación de opciones de trayectoria de redes cerradas al modificar la obtenida en el paso 1 y que contienen la obtenida en el paso 2.
4. Generación de soluciones de diseño hidráulico que resultan próximas al criterio de eficiencia del decisor.
5. Selección de aquella solución que satisface de la mejor manera el criterio completo de preferencias del decisor.
6. Elaboración de toda la información técnica requerida: planos, informes y tablas de datos técnicos.

El coeficiente  $10^{25}$  en la expresión (67) se establece con el objetivo de obligar al cumplimiento estricto de las restricciones. Este valor puede, para restricciones seleccionadas, ser reducido a valores muy inferiores (1000 – 10000) en el caso que se pueda admitir ligeros incumplimientos de ellas. En la práctica este “suavizamiento” de restricciones equivale a tomar en consideración su carácter difuso. La selección de una u otra entre las opciones generadas se realiza, en estas condiciones, a partir de la conveniencia o no de aceptar ciertos “incumplimientos”, en adición a los restantes factores subjetivos a tomar en consideración.

### **Generación de variantes de trayectorias de redes**

Durante el proceso de digitalización y confección del plano base se debe asegurar la correcta organización de la información que pueda ser de utilidad durante el proceso de diseño, la cual será ubicada en sus respectivas capas de manera que se logre su debida clasificación para su uso posterior [5, 30, 32, 48].

Teniendo en cuenta la información contenida en el dibujo se puede realizar el análisis de posibles variantes de trayectorias de la red hidráulica a partir de la definición de los elementos que formarán parte de la red.

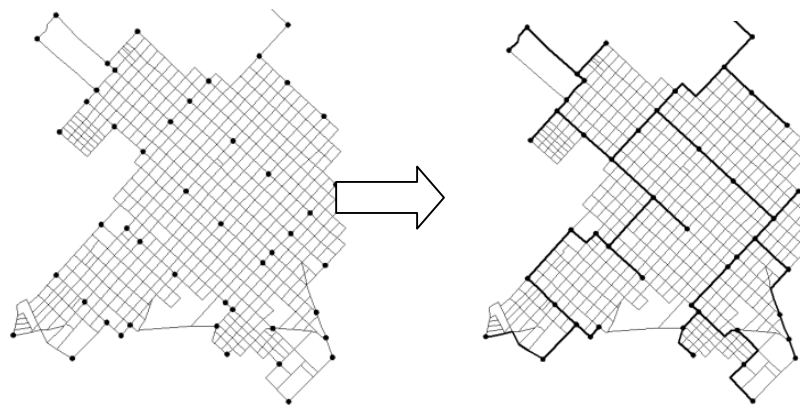
La creación de la red hidráulica se realiza a partir de la incorporación sobre el plano digitalizado de los objetos que intervienen en el proceso de diseño. Estos elementos son entidades de dibujo creadas mediante

opciones del sistema CAD que se relacionan entre sí a partir de un diagrama entidad relación, el cual garantiza el intercambio y búsqueda de información durante la automatización de los procedimientos y métodos de cálculo en las etapas del proyecto.

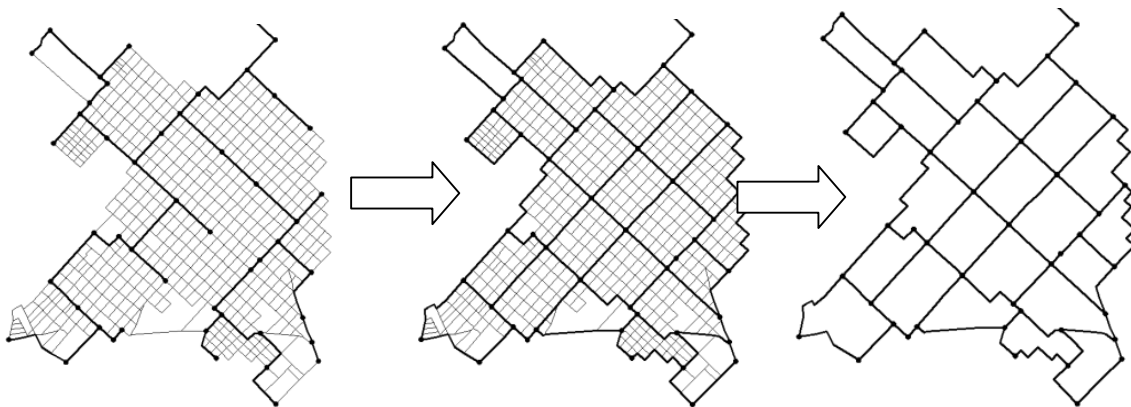
La confección de la trayectoria de la red de mayor cantidad de aristas debe ser definida por el proyectista, teniendo en cuenta los factores subjetivos que permitan integrar la tarea de diseño al sistema de mayor envergadura. La definición de la red priorizada debe tener en cuenta la conexión de todos los nodos de demanda y suministro, así como la conveniencia a los requerimientos del sistema de mayor envergadura. En la figura 25 se muestra la red priorizada propuesta por el sistema, la que puede ser modificada por el proyectista de acuerdo con criterios y análisis de carácter subjetivo [4, 34].

Se pueden tener consideraciones de prioridad en función de trayectorias cercanas a zonas industriales o turísticas, así como a centros comerciales, escuelas y hospitales. En el caso de redes industriales la definición de los tramos de tuberías de mayor prioridad está en función del tipo de fluido, posibilidad de accidentes químicos, entre otros.

A partir de la red de mayor cantidad de aristas se analiza la posibilidad de eliminar aquellos tramos que no pertenezcan a la red priorizada, manteniendo la condición de red mallada, es decir, que la red resultante deberá continuar siendo cerrada [34] (Fig.26).



**Fig. 25. Ejemplo de solución del árbol de extensión mínima.**



**Fig. 26. Ejemplo de variante de trayectoria mallada.**

La sectorización se establece para fragmentar la red en sectores de menor tamaño, con el objetivo de garantizar una adecuada operatividad del sistema con vista a reparaciones, racionalización del suministro o para la organización racional del sistema. Para ello se puede contar con el listado de materiales por sectores. Esta operación se realiza creando nuevas capas en AutoCAD y moviendo hacia estas capas los tramos de tuberías que se deseen a criterio del especialista.

### **Generación de población de soluciones de diseño hidráulico**

Los diámetros solo toman valores discretos dados por las normas vigentes y el inventario disponible. A partir de diálogos de actualización se definen las posibles combinaciones de diámetros para cada uno de los tramos que pertenecen a la variante de trayectoria que se desea calcular. Solo son mostrados aquellos tramos que no son existentes. En este proceso es posible eximir del análisis de variantes aquellos tramos a proyectar que, a criterio del especialista, se conoce el valor recomendado para su diámetro por pertenecer a un ramal o por ser la salida de la fuente de suministro.

Escogida la trayectoria a partir de múltiples criterios y definida la combinación de diámetros para cada uno de los tramos de la red se aplica el método de Integración de Variables con el algoritmo de búsqueda por Localización Aleatoria del Extremo de una Función de Código Variable. Se genera como resultado una población de soluciones de diseño hidráulico a partir de criterios técnicos al minimizar las pérdidas energéticas obtenidas como resultado de solucionar el sistema de ecuaciones que establecen el equilibrio hidráulico de la red y criterios económicos al minimizar los costos asociados a materiales, operaciones, etc. La prioridad de los indicadores de eficiencia, pérdidas de energía y costo es definida por el proyectista.

La representación de los resultados del cálculo hidráulico se realiza a partir de una escala de colores teniendo en cuenta los valores mínimos, intermedios y máximos de velocidad y presión requeridos. De esta manera el diseñador podrá examinar cada una de las soluciones de la población y evaluar múltiples criterios considerando además los valores de pérdidas energéticas y costo de cada variante seleccionada.

Además de mostrar la simulación hidráulica, se confeccionan ficheros de salida que podrán ser cargados en otros sistemas computacionales mostrando gráficamente todo lo concebido en AutoCAD, incluyendo los parámetros técnicos de cada objeto [48]. De esta forma se valida el cálculo hidráulico realizado en el sistema.

### **Ejemplo 13: Comparación AG–búsqueda por Localización Aleatoria del Extremo de una Función de un Código Variable en el ejemplo del diseño óptimo multiobjetivo de troqueles de corte y punzonado simples y progresivos**

Del análisis presentado el ejemplo 8 del epígrafe I.3 quedó esclarecida la composición de variables que intervienen en el diseño óptimo de troqueles de corte y punzonado simples y progresivos. En lo adelante se

exponen elementos del trabajo realizado de síntesis del sistema utilizando AG y Búsqueda por Localización Aleatoria del Extremo de una Función de un Código Variable, así como la comparación de ambos algoritmos.

En calidad de función-objetivo se adopta la distancia aumentada de Tchebycheff desde la solución ideal hasta el espacio de los criterios:

$$Z = \max_i \left\{ w_i \left| \frac{y_i - y_i^{id}}{y_i^{id}} \right| \right\} + \rho \sum_i \left| \frac{y_i - y_i^{id}}{y_i^{id}} \right|$$

Donde:

$y_i, y_i^{id}, w_i$ : Valores calculado e ideal del indicador de eficiencia  $i$  y de la importancia concedida por el usuario a cada indicador, respectivamente.

$\rho$ : Escalar pequeño.

### **Diseño óptimo multiobjetivo utilizando AG**

En calidad de algoritmo de solución se emplea un algoritmo genético [10, 12, 46].

Para solucionar esta tarea se determinó:

- Sistema de codificación de todas y cada una de las variables de decisión en cadenas de caracteres binarios. La cadena resultado de la unión a continuación de las cadenas de genes (variables) determina el código de los cromosomas (soluciones).
- El procedimiento de generación de una población inicial y su tamaño.
- Método de evaluación del *fitness*.
- Procedimiento de cruzamiento y mutación de las poblaciones.
- Criterio (s) de parada.

### **Diseño óptimo multiobjetivo utilizando el Algoritmo de Búsqueda por Localización Aleatoria del Extremo de una Función de un Código Variable**

En la solución de la tarea de Diseño Óptimo Multiobjetivo de Troqueles de Corte y Punzonado Simples y Progresivos se utilizó el Algoritmo de Búsqueda por Localización Aleatoria del Extremo de una Función de un Código Variable (BLAF).

Según la tarea formulada, para la producción de una pieza dada existe un total de 131 072 posibles diseños de troqueles, los que corresponden a los diferentes códigos de solución descritos en [46]. Por esta razón, se utiliza un código variable con valor máximo igual a 131 072.

Con el propósito de mantener similares condiciones que en el caso del uso de los AG la función de penalización consiste, también en este caso, en el rechazo de las soluciones no factibles.

### **Criterio de parada**

El procedimiento de búsqueda se repite hasta alcanzar alguno de los siguientes criterios:

- La diferencia de los valores de *fitness* entre la primera y la última solución supera 0.15.
- Se realizan 225 iteraciones sin cambiar el valor de *fitness* del último elemento de la población.

Con el fin de establecer similares condiciones durante la prueba por ambos algoritmos, el tamaño de la población se selecciona igual a 30.

Cada valor de  $x$  generado por el algoritmo de BLAF se convierte al código binario, y para este código se calculan todos los indicadores  $y_i$ , el valor de la función de utilidad multiobjetivo  $Z$  y el valor de *fitness*  $1/Z$  y, si se requiere, se generan imágenes gráficas en 3 D y 2 D.

### **Experimentos numéricos**

Con el fin de realizar los experimentos necesarios que permitieron comparar ambos métodos se desarrolló el sistema TROQUEL 2003, en el que se aplican los resultados expuestos los AG y el algoritmo expuesto en este epígrafe. En la figura 27 se muestra el esquema funcional obtenido como resultado de la síntesis del sistema, el que genera opciones de diseño de troqueles próximos al óptimo global de la función de la utilidad multiobjetivo por ambos métodos.

Fueron generados diseños de troqueles miembros de las poblaciones en 100 ejecuciones diferentes de los algoritmos AG y de BLAF descritas para una pieza concreta. Se seleccionaron los siguientes indicadores de eficiencia de la operación de ambos algoritmos:

- Cantidad total de cálculos de la función de objetivo realizados antes de alcanzar la población final (CR).
- Valor mínimo promedio alcanzado por la distancia aumentada de Tchebycheff por la solución óptima para los diferentes diseños (DATP).
- Valor medio promedio alcanzado por la distancia aumentada de Tchebycheff por la última población (VMUP).
- Diversidad genética de la población estimada como la suma de las desviaciones absolutas normalizadas entre los códigos de solución generados con respecto a su valor medio, según la expresión:

$$DG = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - \bar{x}}{\bar{x}} \right|$$

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Indicadores	<i>CR</i>	<i>DATP</i>	<i>VMUP</i>	<i>DG</i>
Métodos				
<b>AG</b>	4560	0.32	0.43	0.1
<b>BLAF</b>	4443	0.31	0.41	0.3

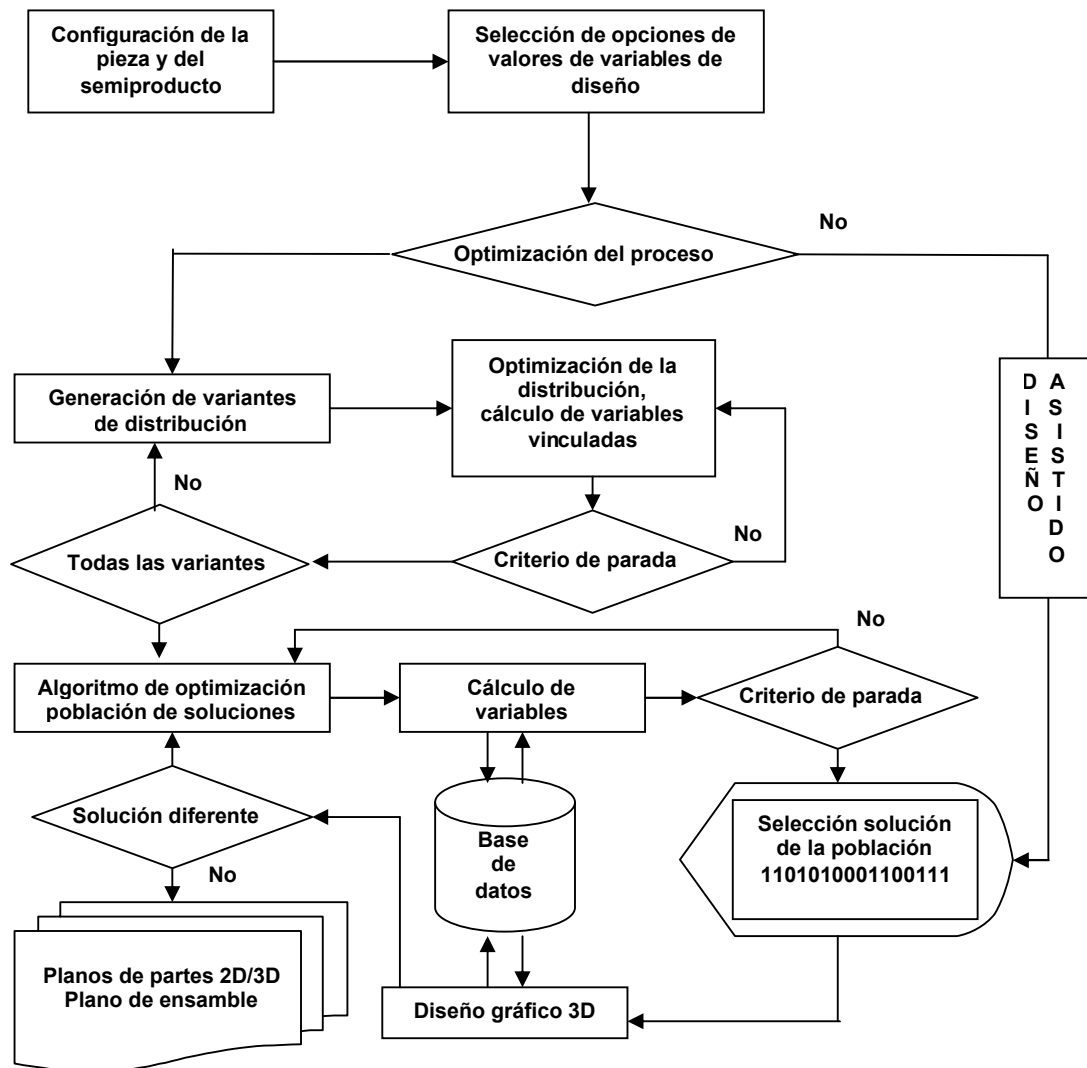


Fig. 27. Estructura funcional del sistema CAD de diseño de troqueles.

Como se puede observar, el número cálculos de la función objetivo resultó ser del mismo orden que los AG, alcanzando similares valores promedio de la función objetivo, tanto para la mejor solución de las

poblaciones como para sus valores medios, aunque la diversidad genética resultó ser mucho mejor (el triple) para el caso del BLAF, lo que en la práctica significa que el decisor puede elegir entre soluciones mas diferentes con similar nivel de eficiencia. Para un mismo número de cálculos de la función objetivo, la velocidad de convergencia por el método BLAF es realmente superior, pues la cantidad y complejidad de las operaciones realizadas por cada cálculo de función objetivo por este método son inferiores a los de los AG.

## **I.5.2 Búsqueda por Exploración Aleatoria del Extremo de una Función de Códigos Variables**

En este caso, en lugar de hacer evolucionar un código variable se hacen evolucionar varios códigos simultáneamente. Se hacen particiones aleatorias, al igual que en el algoritmo anterior, pero por cada combinación de los puntos internos de las particiones se decodifica la solución correspondiente y se selecciona la componente por cada código variable que se corresponde con la combinación de ellos que aportan el mejor valor de la función objetivo, se elimina el subintervalo de cada código variable que no contiene la componente por ese código de la mejor solución entre las  $2^n$  soluciones evaluadas. En cada paso se abre totalmente el intervalo de variación del código que tenga un valor del intervalo de búsqueda menor o igual a 2.

Al igual que para el algoritmo anterior, se acumula una población de soluciones, compuesta en este caso por valores concretos de  $n$  códigos y se compara el valor de la función objetivo de la peor solución de esa población con el de la función objetivo de cada solución generada en el proceso de búsqueda y se sustituye la peor en caso que la recién generada la mejore.

En la figura 28 se ilustra el procedimiento de generación de combinaciones de códigos para el caso particular de dos códigos variables. Para cada combinación generada y decodificada de soluciones se calcula la función objetivo, se determina la combinación de códigos generados al que se asocia el menor valor de esta función y se elimina el subintervalo de búsqueda de cada código variable que no contiene la componente de la

solución con este menor valor. Al igual que para el algoritmo anterior, el proceso se detiene transcurrido un número de iteraciones sucesivas sin que mejore la calidad de la solución.

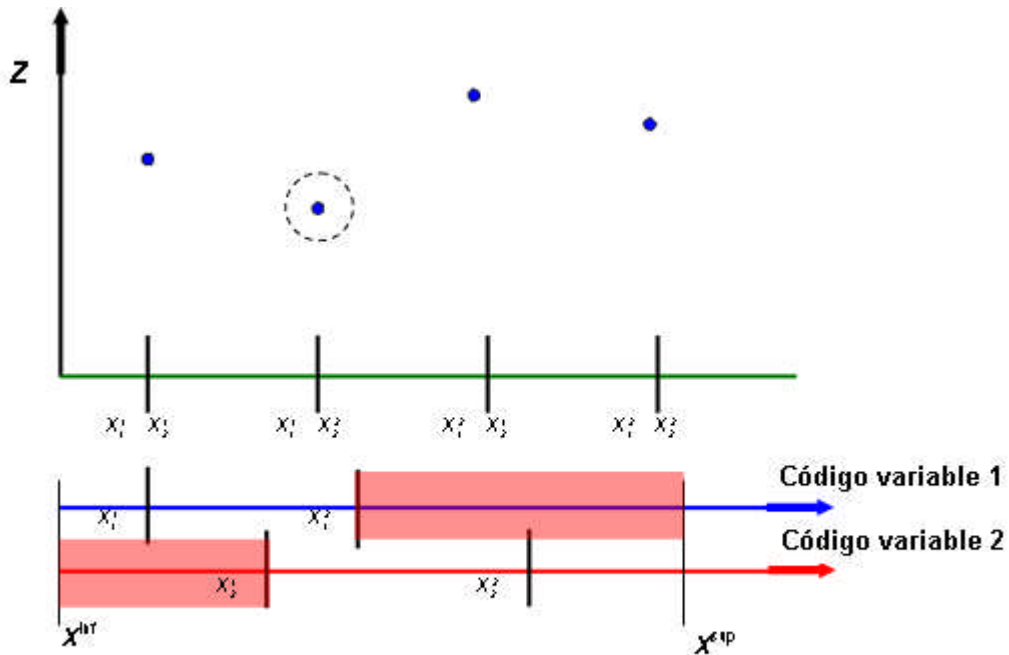


Fig. 28. Ilustración del proceso de búsqueda por el algoritmo de exploración.

**Ejemplo 14: Distribución de piezas de configuración irregular en chapas**

Esta tarea forma parte de la tarea general de fabricación de piezas irregulares planas, presentada en el ejemplo 7 de este trabajo en su integración al diseño, la generación de tecnologías y la planeación de la producción de piezas.

Se crean y evalúan conglomerados de piezas restringidos por los límites de la propia chapa o por la no existencia de nuevas piezas por ubicar. Al acoplarse dos piezas se establece un conglomerado, el cual es considerado como una nueva pieza para su posterior acople con otra, de las candidatas a conformar su vecindad. En la figura 29 se ilustra el proceso de creación de un conglomerado de tres piezas.

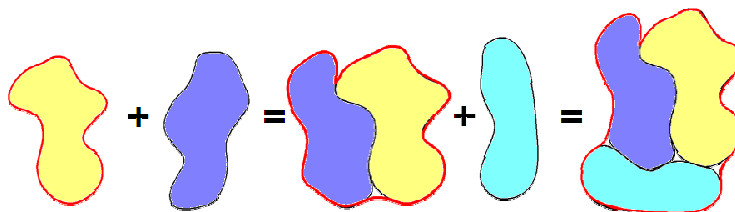


Fig. 29. Formación de conglomerados de piezas.

La función objetivo es bicriterial y representa un compromiso entre la calidad del acople entre las piezas y la calidad de su inserción en la plancha, con la particularidad de que con el incremento de las dimensiones del conglomerado se incrementa el peso del segundo indicador.

### **Posicionamiento de las piezas en la chapa**

Para todo el intervalo de variación del código de solución (números consecutivos de las piezas) por el algoritmo BEAF se genera una población de pares de piezas acopladas en conglomerados, ordenados de acuerdo con la función objetivo. Posteriormente, se crean poblaciones sucesivas de conglomerados con la adición de una nueva pieza utilizando el algoritmo BLAF hasta que se cumpla un criterio de parada. Para cada distribución generada se soluciona la tarea de generación de la secuencia óptima de corte de la(s) chapa(s). El decisor selecciona aquella solución que mejor satisface su criterio completo de preferencias.

La solución detallada a esta tarea y su fundamentación teórica aparecerán publicadas en detalle, próximamente, en la literatura especializada.

## **I.6 Algunas otras investigaciones vinculadas al trabajo presentado**

Se hace posible la enumeración de las siguientes, entre otras, investigaciones de aplicación del autor y sus colaboradores, vinculadas a los resultados expuestos.

Básicas:

- Desarrollo de procedimientos y software correspondiente para la identificación de funciones de aproximación de procesos de los tipos acumulativo, logarítmico posinomiales y logarítmico signomiales.
- Procedimiento heurístico de búsqueda en el entorno para tareas discretas de gran dimensión, en particular para la solución de tareas de *clustering*.

De aplicación:

- Compensación de potencia reactiva en redes de suministro eléctrico industriales.
- Secuenciación de cambios de juegos de cilindros en trenes de laminación de perfiles.
- Elaboración de regímenes de operación de procesos de lixiviación de minerales.
- Elaboración de gráficos de mantenimiento preventivo planificado.
- Optimización de dimensiones de tochos para la producción de bujes.

- Optimización del destino de productos en proceso, en la siderurgia.
- Sustitución de ferroaleaciones al manganeso (Mn) por mineral de Mn en la producción de aceros microaleados al manganeso (Mn) en hornos de fundición por arco eléctrico (HAE).

## **II Conclusiones**

Del trabajo realizado se pueden extraer, en opinión del autor, al menos las siguientes conclusiones:

- Los resultados obtenidos en el campo de la teoría de sistemas permiten enfocar adecuada y racionalmente los problemas de análisis y síntesis de sistemas, con la aplicación de procedimientos efectivos de descomposición de las tareas de toma de decisiones en subtareas vinculadas.
- La estructura más racional del sistema de toma de decisiones de un objeto complejo depende de la estructura del modelo matemático que lo describe.
- La validación realizada de la metodología de análisis y síntesis de sistemas de ingeniería para la preparación y toma de decisiones bajo criterios múltiples propuesta en un número importante de aplicaciones prácticas propias de varias ingenierías permiten esperar su aplicabilidad a un conjunto muy amplio de otras tareas de ingeniería.
- Los procesos de toma de decisiones en sistemas de gran complejidad pueden, al menos en un número importante de casos, ser separados en procesos de generación de opciones de las subtareas componentes y de selección de opciones entre las subtareas de la tarea original. En la solución de las tareas de selección de opciones pueden ser utilizados, en dependencia de las particularidades de cada caso concreto, alguno de los algoritmos estudiados del método de Integración de Variables u otro método entre los disponibles en la bibliografía.

- A partir del concepto del método de Integración de Variables se abre una vía para el desarrollo de una familia de nuevas heurísticas que puede permitir enfrentar un gran número de aplicaciones asociadas a tareas de optimización no lineales y discretas en la ciencia y las ingenierías.
- El método de Integración de Variables y, particularmente, los algoritmos de búsqueda por Localización Aleatoria del Extremo de una Función de un Código Variable (BLAF) y por Exploración Aleatoria del Extremo de una Función de un Código Variable (BEAF) pueden ser considerados como nuevas herramientas añadidas al arsenal de métodos de optimización disponibles. La simplicidad algorítmica y los resultados numéricos obtenidos muestran que los algoritmos desarrollados pueden competir con éxito con otras heurísticas, incluyendo los Algoritmos Genéticos.

### III Bibliografía

1. ABELN, O. y D. KRAUSE. "The References Models for CAD Systems—on the way to a new architecture". *Proceedings of ICED'95*. Edition Heurista. Zurich, Suiza, 1995.
2. AHMAD, NAFIS. "Current Trend In Computer Aided Process Planning". *Proceedings of the 7th Annual Paper Meet and 2nd Intern. Conf.* Bangladesh. Mech. Eng. Division 25-27, Paper No. 10, October, 2001. pp. 81-92.
3. ARZOLA J. *Selección de Propuestas*, Editorial Científico Técnica, La Habana, 1989
4. ARZOLA J. *Sistemas de Ingeniería*, Editorial Felix Varela, La Habana, 2000.
5. ARZOLA J. Y O. MARTÍNEZ. "Selección Óptima bajo Criterios Múltiples de Aislamientos Térmicos", *Proceeding del IV Seminario Euro Latinoamericano de Sistemas de Ingeniería IV SELASI*, La Habana, 2008
6. ARZOLA J. "Búsqueda Aleatoria del Extremo de una Función de un Código Variable", *Proceeding del Congreso Internacional de Matemática y Computación COMPUMAT 2007*, Holguín, 2007.
7. ARZOLA J. , FIOLE A. "Mathematical Formulation and system analysis of Engineering Decision Making Tasks based on Principles of Cybernetic Approach", *Proceeding del III Seminario Euro Latinoamericano de Sistemas de Ingeniería III SELASI*, Curicó, Chile, 2007.
8. ARZOLA J. , GONZÁLEZ I. Y OTROS. "Optimización de indicadores de calidad de la energía en redes de suministro eléctrico industriales", *Proceeding del Congreso Internacional de Energía Renovable CIER 2007*, La Habana, 2007.
9. ARZOLA R. J. Y MOREJÓN V. G. "Diseño óptimo multiobjetivo orientado a la ingeniería inversa en el ejemplo de los motores hidráulicos". *Proceeding de la XI Conferencia Latino - Ibero americana de Investigación Operativa*, Santiago de Chile, 2002.
10. ARZOLA R. J., SIMEÓN R.E. "Aplicación de los Algoritmos Genéticos al Diseño Óptimo Multiobjetivo de Troqueles de Corte y Punzonado Simples y Progresivos". *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, Vol 22, N2, Caracas, 2003.
11. ARZOLA R. J. "La tarea de Selección de Propuestas bajo Criterios Múltiples. Métodos de Solución", *Revista de Matemática*, Vol. XI, N1, San José de Costa Rica, 2003.
12. ARZOLA R. J., SIMEÓN R.E, MACEO A.: "El Método de Integración de Variables: una generalización de los Algoritmos Genéticos", *Proceeding del Intensive Workshop: Optimal Design of Materials and Structures*, París, Francia, 2003.
13. ARZOLA R. J.: "Búsqueda Aleatoria del Extremo de una Función de un Código Variable", *Proceeding de la XII Conferencia Latino Ibero Americana de Investigación de Operaciones*, La Habana, 2004.
14. ARZOLA J., R. SIMEÓN: "Random Exploration of the Extremes of a Function of a Variable Code: an application of the Integration of Variables Method", *Proceeding del I Seminario Euro Latinoamericano de Sistemas de Ingeniería I SELASI*, Trujillo, Perú, 2005.
15. ARZOLA J. "Análisis y Síntesis de Sistemas de Ingeniería para la preparación y toma de decisiones bajo criterios múltiples". *Revista de Matemática* (1), San José de Costa Rica, 2002.
16. Arzola J. "Aplicación del Método de Selección de Propuestas a la Descomposición de Tareas Complejas de Optimización Discreta". *Proceeding de la X Conferencia Ibero Latinoamericana de Investigación de Operaciones y Sistemas*. Mexico, Sept. 2000.
17. ARZOLA J. Y L. SUÁREZ. Reglas de Conducta en la proyección y conducción de procesos de calentamiento del acero. *Rev. Argos* (3), Saltillo, México, 1992.
18. AVILA R. *Planeación óptima Multiobjetivo del Maquinado en Tornos con CNC*. Tesis en opción al grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Holguín, 1999
19. ASHBY, W. R. *Introduction to Cybernetics*. Methuen, London, 1956.
20. BANA, C. A. E COSTA ED: *Readings in Multiple Criteria Decision Aid*. Springer Verlag, Berlin-Heidelberg, 1990.

21. BIN, WU. CAD "Interaction with CAPP". *Manufacturing Systems Design and Analysis*. Ed. Chapman & Hall. Brunel University, Uxbridge, UK, 1994.
22. BLANCHARD, B. S. *Ingeniería de sistemas*. Ed. Isdefe, Madrid, 1995.
23. CARBONELL T., J. ARZOLA Y O. MARTÍNEZ. Modelación de la operación de ruedas desecantes razón 3:1 con silica gel en climas tropicales. *Proceeding del IV Seminario Euro Latinoamericano de Sistemas de Ingeniería IV SELASI*, La Habana, 2008.
24. B. CASALS Y J. ARZOLA. "Use of the explosion in materials technology" *Proceeding of the II International Conference on Metallurgy and Materials Technology*, Sao Paulo, Brazil, 1997.
25. CASTILLO R. Y J. ARZOLA. "Modelación matemática de procesos de lixiviación de minerales piríticos". *Proceeding de la IX Conferencia Internacional de Ingeniería y Arquitectura*, La Habana, 1998.
26. CHAKRABARTY, S. Y COL. *A Structure-Oriented Approach to Assembly Sequence Planning*. Department of Computer Sciences, Texas A&M University, 1995.
27. CORDOVÉS A., ARZOLA J. "Diseño óptimo multiobjetivo de redes de conductos de climatización", *Proceeding de la Convención Internacional de la Industria Metal Mecánica Metánica 2007*, La Habana, 2007
28. CORDOVÉS A., A. LASTRES, J. ARZOLA: "Diseño Óptimo Multiobjetivo de Conductos de Climatización", *Proceeding del I Seminario Euro Latinoamericano de Sistemas de Ingeniería (I SELASI)*, Trujillo, Perú, 2005.
29. DAOU, K.; WANG R. Z, XIA Z. Z.: "Renewable desiccant cooling air conditioning": a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* XX, 1-23, 2004.
30. Dehumidification for all requirements. <http://www.muntersamerica.com>, 2002.
31. DÍAZ, A. Y OTROS: *Optimización heurística y redes neuronales*. Ed. Paraninfo, Madrid, 1996.
32. GARDINER, L. R. AND R. E. STEUER: "Unified interactive multiple objective programming". *Eur. J. Opl. Research* 74, 1994.
33. GE, T. S.; Y. LI, R. Z. WANG, Y. J. DAI. "A review of the mathematical models for predicting rotary desiccant wheels". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12 1485–1528, 2008.
34. GUAN, Q. Y COL. "A Concurrent Hierarchical Evolution Approach to Assembly Process Planning", *Int. J. Prod. Res.*, 2002. pp. 3357–3374.
35. HECHAVARRÍA J., J. ARZOLA Y A. CORDOVÉS. "Optimización bajo Criterios Múltiples del Trazado y de la Dimensión de los Conductos de Redes Hidráulicas Cerradas". *Proceeding del IV Seminario Euro Latinoamericano de Sistemas de Ingeniería (IV SELASI)*, La Habana, 2008.
36. HU, D. Y COL. "Mechanical Product Disassembly Sequence and Path Planning Based on Knowledge and Geometric Reasoning". *Intl. J. Adv. Manuf. Tech.* 19, 2002. pp. 688-696.
37. HUANG, K.; H. S. ISMAIL, K. B. HON. "Automated design of progressive dies". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Journal of Engineering Manufacture*, v 210 n B4, 1996.
38. JACHATUROV, V. *Métodos matemáticos de la programación regional* (en ruso). Ed. Naúka, Moscú, 1989.
39. JWATA, K. *Knowledge based computer aided process planning in intelligent manufacturing systems*. Ed. V. R. Milacic, Amsterdam, 1986.
40. KARAINOVA, J. N.: S. C. Narula and V. Vassilev. "An interactive procedure for multi-objective integer programming". *Eur. J. Opl. Research* 68, 1993.
41. KORHONEN, P. AND R. E. STEUER: *An Heuristic For Estimating Nadir Criterion Values in Multiple Objective Linear Programming*. Graduate Programs in Management Science. University of Georgia. Athens, Georgia, 1993.
42. LEE, D. H. Y COL. "Disassembly Sheduling for Products with Assembly Structure: Integer Programming Approach". SFIT, Suiza, 2001.

43. LEWANDOWSKI, A. AND A. P. WIERZBICKI: *Aspiration Based Decision Support Systems*. Springer-Verlag, Berlin, 1989.
44. LUHMANN, N. *Soziale Systeme. Grundriss einer allgemeinen Theorie*, Frankfurt, Suhrkamp, 1984.
45. MACKI, J. AND A. STRAUSS: *Introduction to Optimal Control Theory*. Springer, New York, 1982.
46. MAN, K. F.; K. S. TANG AND S. KWONG. "Genetic Algorithms: Concepts and Applications". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1996; 43 (5):519-533.
47. Martínez, J., J. Llamas, A. García, T. Ortiz. "Rational Design Automation by Dichromatic Graphs". *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers in Engineering Conference* (Paper DETC2001/DAC-21050), Pittsburgh, USA, 2001.
48. MERTINS, K. AND B. WIENEKE: "State of the art in flexible manufacturing systems design", *Production Planning and Control*, vol. 2, Berlin, Alemania, 1991.
49. MESAROVIC, M. D.; D. MACKO, Y. TAKAHARA. *Theory of hierarchical, multilevel systems*. Academic Press, New York-London, 1970.
50. MEYER, J., AND W. SCOTT. *Organizational Environments: Ritual and Rationality*. Beverly Hills, 1983
51. MICHALEWICZ, Z. AND M. SCHOENAUER. „Evolutionary Algorithms for Constrained Parameter Optimization Problems". *Evolutionary Computation* 1996, 4(1): 1-32.
52. MILNER, D. A. AND VASILIOU. "The integration of CAD and CAM". *Computer-Aided Engineering for Manufacture*. Ed. Kogan Page Ltd, London, UK, 1994.
53. MITCHELL F. H. CIM Systems. *An introduction to Computer Integrated Manufacturing*. Ed. Prentice Hall, New Jersey, 1991.
54. MOREJÓN G., J. ARZOLA: Desarrollo de productos orientados a una capacidad tecnológica disponible, en el ejemplo de Hidromotores de alto par, *Proceeding del I Seminario Euro Latinoamericano de Sistemas de Ingeniería (I SELASI)*, Trujillo, Perú, 2005.
55. NAVAS E. Y ARZOLA J. "System Análisis of the task of the use of Mn mineral as a substitute of ferroalloys in steel production in Electric Arc Furnaces", *Proceeding del III Seminario Euro Latinoamericano de Sistemas de Ingeniería (III SELASI)*, Curicó, Chile, 2007.
56. PERALTA J. ,HERNANDEZ A., ARZOLA J. Y MOREJÓN G. "Una aplicación de los Grafos Dicromáticos en el modelamiento matemático del drenaje de acuíferos subterráneos", *Proceeding del III Seminario Euro Latinoamericano de Sistemas de Ingeniería (III SELASI)*, Curicó, Chile, 2007.
57. ROLLER, D. AND P. BRUNET. *CAD Systems Development. Tools and Methods*. University of Stuttgart, Germany, 1997.
58. OGATA, K. *Ingeniería de control moderna*. Ed. Prentice Hall, México D.F., 1990.
59. ROY, B. *Méthodologie Multicritere a la Decision: Méthodes et. Cas*, Economica, Paris, 1993.
60. RUDD, D. F. AND CH. C. WATSON. *Strategy of Process Engineering*. John Willey, New York, 1968.
61. SAATY, T. L. "Exploring the interface between hierarchies, multiple objectives and fuzzy sets". *Fuzzy Sets and Systems*, 1(1978):57-68.
62. SANTANA R. Y J. ARZOLA. "Diseño de herramientas de forja bajo criterios múltiples". *Proceeding de la VI Conferencia Internacional de software de ingeniería*. Holguin, 1995.
63. STEUER, R. E. *Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation and Applications*. Willey, New York, 1986.
64. VON BERTALANFFY, L. *General System Theory: Foundations, Development, Applications*. New York, George Braziller, 1968.

65. WANG, F.; XIAO, X.; LI, J. "Development of intelligent CAD/CAM systems for progressive dies". *Proceeding of Int. Conference on Intelligent Manufacturing*. Wuhan, República Popular China, 1995.
66. WANG, P. AND D. P. KOWK. "Optimal design of pid process controllers based on genetic algorithms". *Contr. Eng. Practice* 1994, 2 (4):641-648.
67. WECK, M.; W. KONIG, J. LAUSCHER. "Assimilation of a common CAD/CAM system into dies and molds manufacturing". *American Society of Mechanical Engineers. Production Engineering Division V32* Pub by ASME. New York, 1992. pp. 119-133.
68. WEINBERG, G. M. *An Introduction to General Systems Thinking*. Dorset House Publishing, 2002.
69. WIENER, N. *Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and Machine*. Willey, N. Y., 1949.
70. WIERZBICKI, A. P. "The use of reference objectives in multiobjective optimization". En *Multiple Criteria Decision Making: Theory and Application* (G. Fandel y T. Gal) Springer-Verlag, Berlin, 1980. pp. 468-486.
71. WILLIAMS. D. J. *Manufacturing Systems. And introduction to the technologies*. Chapman-Hall. UK, 1994.
72. YIN, Z. P. Y COL. "A Connector-Based Hierarchical Approach to Sequence Planning for Mechanical Assemblies". *Computer Aided Design*, N3, 2003.
73. ZADEH, L. "Biological application of the theory of fuzzy sets and systems" *Proceedings of an International Symposium on Biocybernetics of the Central Nervous System*. Little Brown, Boston, 1969. pp. 199-206.
74. ZEID, I. *CAD/CAM Theory and Practice*. McGraw Hill. USA, 1991.
75. ZELENY, M. *Multiple Criteria decision-making*, McGraw-Hill, New York, 1982.
76. ZHANG, H. AND L. ALTIN. *Computerized Manufacturing Process Planning Systems*. Chapman & Hall. USA, 1994.

## Datos del autor



Address(es) Edif. 72, Apto. 23, Rpto. Alberro, Cotorro, C. Habana, Cuba.

Telephone(s) (+536) 266 3754, (+536) 881 44 01 Mobile:

Fax(es) 053-260 – 4618

E-mail jararzola@ceter.cujae.edu.cu

Nationality Cuban

Date of birth September, 16<sup>th</sup>, 1945

Gender Male

Research Professor

**Work experience** 37 years

Dates 1971 to 2008

Occupation or position held Professor and Researcher.

Main activities and responsibilities Research and PhD tutorship.

Name and address of employer Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”,

Graduated in Metallurgical Engineer in April 1971 in Polytechnic Institute of Leningrad, USSR he have occupied different occupations in Antillana de Acero Steel Plant, in Havana, Cuba, during 20 year, Professor and Researcher of Instituto Superior Politécnico of Havana, Cuba, where created the pregraduate and post graduate courses on Engineering Systems for Preparing and Making Decisions. He have imparted some other pregraduate and postgraduate courses in Cuba and in foreign countries Member of the National Commission of Scientific Degrees in Metallurgical Engineering (Ph. D.'s) of Cuba. Is consultant and asesor in several universities. Has obtained several national awards, Has been tutor of several thesis of M. Sc. and Ph. D. Have organized and executed several research national and international projects.