

# Sistemas para la preparación y toma de decisiones en la Ingeniería

**J. Arzola Ruiz , R. Simeón Monet \*, A. Fiol Zulueta.\*\***

UDM, Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría” (ISPJAE), C. Habana

e-mail: [udm@aacero.colombus.cu](mailto:udm@aacero.colombus.cu)

\* CE CAD/CAM, Universidad de Holguín

e-mail: [rsimeon@uho.hlg.edu.cu](mailto:rsimeon@uho.hlg.edu.cu)

\*\* Dpto de Matemática, Facultad Mecánica, ISPJAE

e-mail: [mecanica@ispjae.edu.cu](mailto:mecanica@ispjae.edu.cu)

(Recibido el 2 de febrero, aceptado el 2 de marzo)

## Resumen:

En el artículo se expone una metodología de Análisis y Síntesis de Sistemas destinados a la preparación y toma de decisiones bajo criterios múltiples y su aplicación a tareas de ingeniería.

Esta metodología presupone la realización de las siguientes etapas consecutivas de trabajos:

Descomposición de la tarea de mayor envergadura a la que pertenece la tarea estudiada

Análisis externo e interno.

Elaboración del procedimiento general de preparación y toma de decisiones

Se exponen ejemplos de aplicación de esta metodología a la solución de tareas de ingeniería de gran complejidad.

**Palabras claves:** Optimización discreta, Análisis de Sistemas, Ingeniería de Sistemas, Optimización Multiobjetivo, Descomposición de tareas complejas de optimización.

---

## 1. Introducción

La segunda mitad del presente siglo se ha caracterizado por un vertiginoso desarrollo de la teoría y la práctica del diseño de sistemas de dirección de complejos organizativos, tecnológicos y de operación de procesos. A los sistemas de los tipos señalados se les agrupa, en este trabajo, bajo el término de “*Sistemas de Ingeniería*”. A este grupo de sistemas pertenecen, en particular, los conocidos bajo los términos de CAD, CAM, CAE, CIP, CAS, etc.

En el diseño de sistemas de ingeniería se utilizan metodologías desarrolladas para cada uno de los tipos de sistemas señalados. Las especialidades técnicas que, básicamente, se ocupan del diseño de sistemas de cada

tipo son diferentes. En nuestro país, por ejemplo, del diseño de sistemas organizativos se ocupan los ingenieros informáticos, del diseño de sistemas tecnológicos se ocupan los especialistas de cada una de las tecnologías y del diseño de sistemas de operación de procesos se ocupan los ingenieros en Automática y Computación.

En el presente trabajo se dan, de forma muy resumida, las ideas fundamentales del enfoque integrador propuesto y se enumeran las aplicaciones fundamentales realizadas en los últimos años.

## 2. Principios de descomposición de la tarea de dirección de objetos complejos

Con el fin de definir el contenido de las tareas de dirección de complejos organizativos y tecnológicos y las

relaciones mutuas que tienen lugar entre estas tareas fueron enunciados estos principios, cuya aplicación práctica a los objetos de dirección reales, de carácter organizativo, conduce a estructuras de tareas semejantes (muy parecidas) a las que se han venido conformando en los sistemas organizativos como resultado de su evolución histórica. En correspondencia con estos principios (ver [1, 2]) la tarea de dirección se descompone, en primer lugar, espacialmente: el sistema de dirección de todo el objeto dirige los sistemas de dirección de cada uno de los elementos que lo conforman. A cada nivel de descomposición espacial tiene lugar una descomposición por funciones y, en cada nivel de descomposición funcional, tiene lugar una descomposición en el tiempo. Como resultado de tal descomposición se obtiene una jerarquía interrelacionada de tareas de dirección 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 dirección, consistente en lo siguiente:

La descomposición espacial de la tarea de dirección determina la existencia de un sistema de dirección de la empresa en su conjunto y, subordinado al mismo, un sistema de dirección local para cada uno de los talleres que participan en su producción material. La descomposición de la tarea de dirección del sistema empresarial por funciones permite distribuir, racionalmente, esta tarea por subsistemas, 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 dirección de toda empresa se descompone en los siguientes sistemas funcionales:

- Sistema de dirección de los recursos materiales;
- Sistema de dirección de los recursos técnicos;
- Sistema de dirección de los recursos humanos;
- Sistema de dirección de los recursos financieros;
- Sistema de dirección de la producción;
- Sistema de dirección 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 dirección adicional. Al sistema encargado de cumplir esta función se le puede denominar, por ejemplo, como sistema de dirección técnico económica de la empresa, sistema de coordinación, etc.

La descomposición en el tiempo de cada una de estas funciones conduce a la determinación de las tareas que han de ser solucionadas. En [1] se desarrolla, por el autor, la jerarquía de tareas de dirección de la producción de empresas industriales como resultado de la descomposición en el tiempo de la función de dirección de la producción. La descomposición asociada al diseño de la tecnología resulta generalmente mas sencilla que la asociada a la dirección 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. Por otra parte, el diseño de tecnologías se realiza para periodos indeterminados de tiempo, mientras permanezcan las condiciones para las que se realiza este diseño, por lo que la descomposición en el tiempo carece de sentido. Así, la descomposición de las tareas de diseño de tecnologías tiene lugar para los elementos componentes de talleres, agregados y equipos para los que se realiza el 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 componen. Así, por ejemplo, el diseño de un automóvil se descompone en tareas de diseño del motor, sistema de embriague, sistema de frenos, etc.

En todos los casos, independientemente de su naturaleza, el diseño 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 integralidad.

### **Ejemplo 1: descomposición de la tarea de diseño de tecnologías de laminación de perfiles**

Todo taller de laminación de perfiles incluye uno o mas hornos de calentamiento, un molino de laminación, área electro - energética, áreas de acabado y almacenamiento de productos terminados. De tal forma, la tarea de diseño de la tecnología de laminación de perfiles (ver [2]) se descompone en tareas de diseño de las tecnologías de:

- Deformación del metal en el molino de laminación
- Calentamiento del metal en los hornos del taller
- Aseguramiento energético al molino y a los hornos
- Acabado y almacenamiento de la producción terminada
- Laminación del perfil (conciliación de los sistemas anteriores)

### 3. Análisis del sistema de dirección por tareas

Las tareas de preparación de decisiones derivadas de la

sobre la base de los principios del Enfoque Cibernético de Norbert-Wiener (ver [3]).

El análisis externo (ver [2]) se inicia por la determinación de los indicadores de eficiencia que pueden resultar de

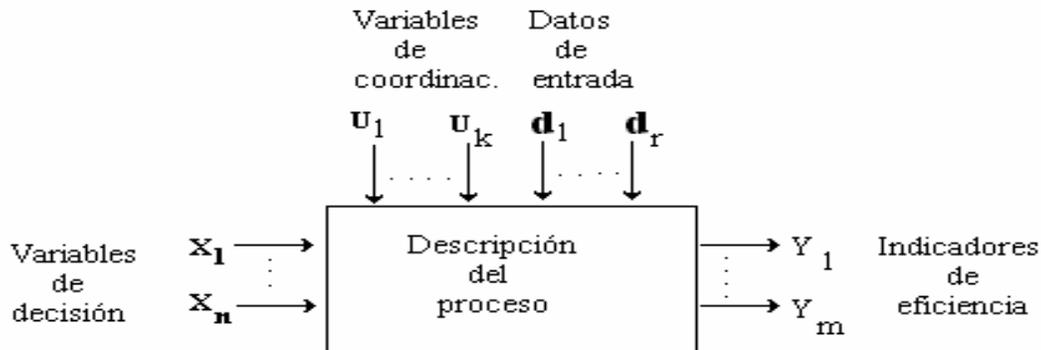


Fig.1. Clasificación de la información involucrada en el análisis externo de los procesos de preparación de decisiones

aplicación de los principios de descomposición enunciados anteriormente se someten a análisis externo e interno (ver fig. 1). La necesidad en la realización de estas etapas de análisis se fundamenta, entre otros resultados,

indicadores pueden tener carácter formalizable (ser calculables) o no formalizables (evaluados subjetivamente). Ejemplos de indicadores formalizables 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 formalizables son:

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

La evaluación de los indicadores de eficiencia no formalizables está relacionada, generalmente, con la observación de las imágenes gráficas asociadas a las diferentes alternativas de solución generadas por el sistema. En una segunda etapa, se determinan las variables de entrada del proceso. Estas están constituidas por la información de entrada necesaria para calcular los indicadores de eficiencia formalizables. Las variables de entrada se clasifican en los siguientes grupos :

interés al potencial usuario del sistema.

- Variables de decisión
- Variables de coordinación
- Datos de entrada

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.

Las variables de coordinación son aquellas cuyos valores se determinan durante la solución de otra tarea de dirección de mayor envergadura (en el espacio, la función y/o el tiempo) con respecto a la cual la tarea en análisis constituye una subtarea.

Los datos de entrada son parámetros propios del proceso que adoptan valores conocidos, con distribución de probabilidad conocida o que pueden ser, incluso, desconocidos.

Un requisito indispensable para todos los datos de entrada está constituido por su independencia mutua. En el proceso de análisis debe ser verificada la independencia de cada una de las variables considerada como entrada, con respecto a las restantes. El análisis externo incluye, necesariamente, el estudio de la tarea de mayor envergadura a la cual se encuentra subordinado el sistema objeto de análisis así como la descomposición de la tarea dada. Sólo de esta forma se puede asegurar que el sistema

objeto de análisis se inserta adecuadamente en el “medio ambiente” en el cual deberá funcionar. Concluido el análisis externo se pasa al análisis interno. Este último consiste en la determinación del algoritmo más racional para calcular los indicadores de eficiencia formalizables a partir de las variables de entrada (ver [2]), así como de los procedimientos de generación de las imágenes gráficas necesarias para evaluar con efectividad los indicadores de eficiencia no formalizables. Como resultado del análisis interno puede requerirse la realización de investigaciones encaminadas al completamiento de la descripción matemática del proceso.

#### 4. Síntesis del sistema de preparación y toma de decisiones

La preparación de decisiones persigue el objetivo de lograr una solución de compromiso entre los diferentes criterios de eficiencia. Este objetivo se puede expresar como la minimización de una función dependiente de todos y cada uno de los indicadores de eficiencia del proceso estudiado, así como de la importancia concedida por el decidor a cada uno de estos indicadores.

$$Z = f(y_i, w_i) \tag{1}$$

donde  $w_i$  coeficiente que refleja la importancia concedida por el usuario al indicador de eficiencia  $y_i$

Una parte de las variables de decisión es de naturaleza discreta, mientras otra parte lo es de naturaleza continua. Generalmente se exige el cumplimiento de una serie de restricciones a una parte de las variables de decisión,

cálculo. Una parte de los indicadores de eficiencia puede aparecer en la función multiobjetivo (1), otra parte puede reflejarse en restricciones planteadas en la tarea de optimización mientras que otra puede ser tomada en consideración en el proceso de selección de la solución definitiva entre un conjunto de opciones. En particular, los indicadores de carácter subjetivo pertenecen a este último grupo. El algoritmo de optimización discreta, adecuado al caso concreto, genera en cada iteración nuevos valores de las variables de decisión discretas  $x_1, \dots, x_{n1}$ . Para cada combinación de valores de las variables discretas se soluciona una tarea de optimización en variables continuas, generándose en cada iteración nuevos valores de las variables continuas  $x_{n1+1}, \dots, x_n$ . El algoritmo de optimización discreta debe generar, en el caso general, no solo la solución óptima, sino una serie ordenada de las mejores soluciones posibles.

A continuación se calculan los valores de los indicadores de eficiencia con ayuda de la descripción matemática del proceso y del criterio de optimalidad (1). Puede requerirse, además, el cálculo de una función de penalidad por el incumplimiento de restricciones. Mientras no se satisfaga el criterio de parada del algoritmo de optimización son generadas nuevas soluciones. El esquema algorítmico descrito puede ser utilizado tanto en la etapa de generación de las soluciones ideales, como en las ponderadas. En el caso más general se utilizan, en la elaboración del esquema algorítmico mostrado en la fig 2, los métodos numéricos de la programación discreta y de la programación no lineal aplicados directamente sobre los procedimientos de cálculo de ingeniería. No obstante, en ocasiones resulta posible y aconsejable la utilización de esquemas de optimización por aproximaciones sucesivas basados en métodos orientados a modelos con estructura

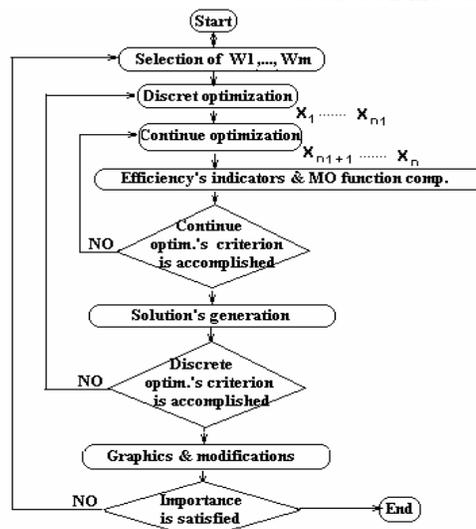


Fig. 2. Esquema algorítmico general del proceso de preparación de decisiones

indicadores de eficiencia y parámetros intermedios de

específica (programación lineal, programación geométrica, programación en enteros, etc.), métodos heurísticos, etc.

**EJEMPLO 2: DISEÑO DE TROQUELES DE CORTE Y PUNZONADO**

Los troqueles de corte y punzonado de chapas constituyen herramientas muy utilizadas en la industria mecánica para la producción de piezas planas de las mas disímiles configuraciones (ver [4]).

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:

**Indicadores de eficiencia**

1	Aprovechamiento de la chapa	<i>Apro</i>
2	Productividad de la prensa	<i>Prod</i>
3	Fuerza de corte	<i>Fuer</i>
4	Costo de fabricación	<i>Cost</i>
5	Durabilidad del troquel	<i>Dura</i>
6	Precisión	<i>Itac</i>

**Variables de decisión**

1	Tipo de troquel [Simple / PlacaGuía / Armazón de columnas]	<i>TTroq</i>
2	Distribución de piezas en la chapa [1,2,3,4]	<i>DpCh</i>
3	Elementos Reguladores del paso • Recortadores laterales [Uso o No]	<i>ReLat</i>
4	Tipo de Corte [De la pieza / del desecho]	<i>TiCor</i>
5	Número de pasadas	<i>NuPas</i>
6	Sistema de Alimentación [Manual / Automático].	<i>SiAli</i>
7	Elementos Centrades	<i>ElCen</i>
8	Tipo de matriz y filo.	<i>MaPar</i>
9	Elementos de Posicionamiento  • Regla guía • Presionador Lateral	<i>ReGui</i> <i>PreLa</i>
10	Material de la Matriz	<i>MatMa</i>
11	Material del punzón	<i>MatPu</i>
12	Bases  • Tipo (Fundida o	<i>BasTip</i>

- laminada) *PoCol*
- Posición de las *TiCol*  
columnas
- Forma de la  
columna

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

En calidad de **variables de coordinación** se tiene

- Configuración de la pieza terminada
- Especificaciones técnicas de la pieza
- Tamaño del lote a producir

El análisis interno incluye toda una metodología de cálculo y diseño gráfico de troqueles, la que por su complejidad y especificidad no se expone en este artículo.

En calidad de **función objetivo** se adopta la expresión;

$$Z = \sum_{i=1}^m w_i \frac{|y_i - y_i^{id}|}{|y_i^{id}|} \quad (2)$$

donde  $w_i$  coeficiente que refleja la importanciaconcedida por el usuario al indicador de eficiencia  $y_i$   
 $y_i^{id}$ - valor ideal de criterio de eficiencia  $y_i$ , el cual se obtiene como resultado de optimizar individualmente este criterio, desconociendo los restantes.

En calidad de algoritmo de solución se emplea un algoritmo genético (ver [4]). La utilización de los algoritmos genéticos para la minimización de funciones del tipo (2) con la generación simultánea de series de solución próximas al óptimo global resulta muy cómoda, ya que los valores ideales pueden, a partir de una estimación previa, ser rectificadas por los mejores valores que se van obteniendo en el proceso de evolución de la población. Al cumplirse el criterio de parada el sistema CAD diseñado muestra una a una (en 2 y 3 D) las imágenes gráficas del troquel diseñado. El diseñador selecciona y/o modifica la solución que resulta de su agrado (que satisface su conjunto personal de indicadores de eficiencia). La modificación de cualquier indicador viene acompañada por la muestra de los valores reales de los indicadores formalizables derivados de la modificación realizada.

**5. Preparación de Decisiones vs Toma de Decisiones**

Los sistemas de ingeniería se diseñan con el objetivo de constituir herramientas para preparar decisiones. La toma

de decisiones la realiza en cada aplicación diferente del sistema, un decidor diferente.

Así, el sistema diseñado debe entregar la información necesaria para que el eventual decidor pueda elegir, entre un conjunto de opciones, aquella decisión que mejor satisface su sistema completo de preferencias. Para la solución de este problema se requiere dar respuesta a dos cuestiones básicas: quién es el decidor y cual es su sistema de preferencias.

Si se supone un sistema con alto grado de automatización, las respuestas a estas interrogantes se deben buscar a partir del estudio de los fundamentos de la Teoría de Sistemas.

En los sistemas con estructura jerárquica el nivel superior entrega una decisión  $u$  en variables agregadas (un encargo) a cada elemento del nivel inferior y recibe de cada uno de ellos un conjunto  $V$  de opciones  $a$  - óptimas de realización de la decisión  $u$ . Entre estas opciones el sistema del nivel superior selecciona, por cada elemento del nivel inferior, aquella opción que mejor satisface los intereses de todo el sistema (ver [1]). En este caso, el papel de decidor lo realiza el sistema del nivel superior, mientras los sistemas del nivel inferior se especializan en preparar decisiones. A medida que se reduce el grado de automatización se reduce también el grado de formalización matemática de la tarea de toma de decisiones, introduciéndose elementos de subjetivismo en este proceso. Independientemente del grado de automatización, el sistema de preparación de decisiones (nivel inferior) debe generar un conjunto ordenado (por indicadores locales de eficiencia) de opciones de solución en la forma más adecuada posible para la toma ulterior de decisiones por el nivel superior (decidor).

Los sistemas con estructura centralizada están concebidos para la ejecución inmediata de la acción  $u$  emitida por el nivel superior, dado el déficit del tiempo requerido para el proceso de preparación y toma de decisiones, por lo que los sistemas del nivel inferior no preparan decisiones para su procesamiento posterior por un decidor (ver [1]). Los sistemas del nivel inferior que forman parte de esta estructura determinan ellos solos la acción directiva  $v$  más adecuada a la acción  $u$  recibida del centro (decidor).

La estructura disperso - conciliada puede ser considerada como una forma de organización de los sistemas que permite generar opciones a un nivel superior al conjunto de sistemas que participan en la conciliación de decisiones (ver [1]). Es decir, el conjunto de sistemas organizados en esta estructura juegan el papel de un solo sistema encargado de generar opciones al nivel superior al conjunto.

De tal forma, de la exposición realizada en el acápite 4 del presente trabajo, se deduce que la preparación de decisiones se corresponde con la generación de opciones

en los sistemas del nivel inferior, organizado en estructuras jerárquicas, para su posterior conciliación por el nivel superior de la estructura y que la toma de decisiones se corresponde con la selección de opciones realizada por el nivel superior. En la medida de la reducción del grado de automatización del sistema completo se incrementa el subjetivismo en el proceso de selección de opciones (toma de decisiones). Como los sistemas de ingeniería se diseñan con el fin de satisfacer las necesidades no de un decidor específico, sino de toda una clase de ellos, que hacen uso de una misma tecnología, el análisis y la síntesis de estos sistemas debe realizarse para las condiciones más generales posibles.

Así, la preparación de decisiones en un sistema de ingeniería consiste en la generación de opciones  $\alpha$  - óptimas de decisión mientras que la toma de decisiones consiste en la selección de aquella opción que satisface las necesidades del sistema de mayor envergadura.

Queda pendiente esclarecer debidamente el concepto de soluciones  $a$  - óptimas en presencia de múltiples objetivos, lo que será realizado en lo adelante.

## 6. Espacios de existencia de las decisiones y de los criterios

Mientras la optimización convencional (con un simple objetivo) se estudia en el espacio de las decisiones, la optimización multiobjetivo se estudia principalmente en el espacio de los criterios (ver [5]). Para ilustrar la diferencia entre la representación de una tarea de optimización multiobjetivo en el espacio de las decisiones y su representación en el espacio de los criterios se examina la siguiente tarea:

$$\begin{aligned} \min \{z_1 = 4 + x_1 - 0.5x_2\} \\ \min \{z_2 = x_2\} \\ \text{asegurando: } x \in D \end{aligned}$$

donde el espacio  $D$  de existencia de las decisiones se muestra en la Fig. 3 y el espacio  $Z$  de existencia de los criterios se muestra en la fig.4. Así,  $z^4 = (7,4)$  es el vector de criterios de  $x^4 = (5,4)$ . En la Fig. 4 el conjunto  $N$  de alternativas eficientes (no dominadas) está dado por los puntos de la frontera de  $Z$  desde  $z^3$  hasta  $z^5$  y desde  $z^5$  hasta  $z^6$

**Definición:** Un vector de soluciones eficientes  $z \in Z$  se denomina no sustentado si y solo si no existe un

$w \in R^m$  tal que  $z$  es solución de la tarea

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^m w_i z_i \mid x \in D \right\}$$

El conjunto de soluciones eficientes no sustentadas de la Fig. 4 está dado por el conjunto de vectores desde  $z^3$  a través de  $z^4$  hasta  $z^5$ , excluyendo  $z^3$  y  $z^5$ . El conjunto sustentado de soluciones eficientes está dado por el punto  $z^3$  más los vectores que conforman el segmento desde  $z^5$  hasta  $z^6$  inclusive. Los vectores de las soluciones eficientes no sustentadas pueden aparecer cuando  $Z$  no es convexa. Así, se puede afirmar que ellas son frecuentes en las tareas no lineales y discretas propias de la ingeniería.

Por la razón anterior, la utilización convencional de aproximaciones a la función de valor multiobjetivo del tipo (1) puede conducir a la pérdida de conjuntos completos de soluciones eficientes.

Al mismo tiempo, procedimientos de mayor aceptación en la actualidad en el campo del Análisis Multicriterial (ver, por ejemplo, [5, 6, 7, 8, 9]), permiten explorar todo el espacio  $N$  de alternativas eficientes con ayuda del Programa Lexicográfico o Aumentado de Tchebycheff.

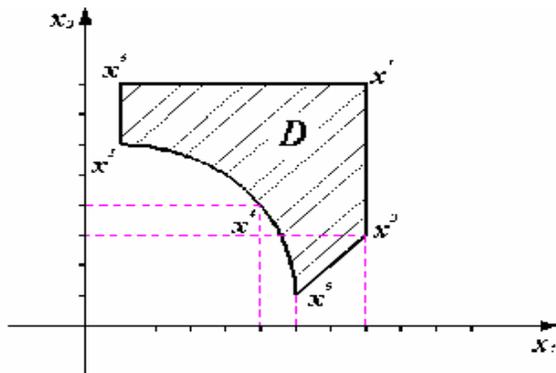


Fig. 3 Representación del espacio de las decisiones

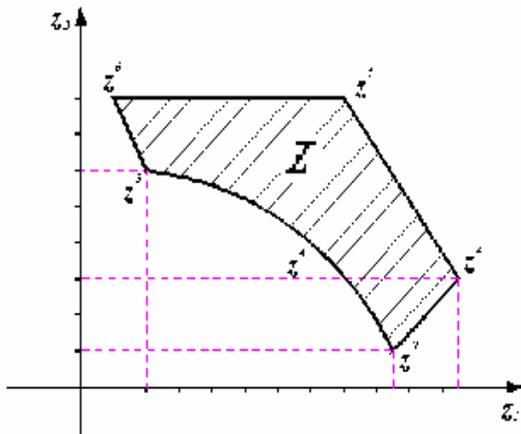


Fig. 4 Representación del espacio de los criterios

### 7.-Programas lexicográfico y aumentado de Tchebycheff

Para realizar un muestreo del conjunto no dominado de soluciones se soluciona, como parte de los procedimientos iterativos de optimización multiobjetivo TCH (Steuer, 1986), WIERZ (Wierzbicki, 1986), BULG (Karainova et al, 1993) y otros, el modelo matemático siguiente, denominado programa lexicográfico de Tchebycheff.

$$\text{lex min } \hat{1} b, \hat{a} z_i \hat{y} \hat{p} \tag{3}$$

$$b \ni w_i (z_i - z_i^*); i = 1, \dots, m \tag{4}$$

$$g_i(x) \ni b_i; i = 1, \dots, r \tag{5}$$

$$0 \leq b \leq \hat{1} R \tag{6}$$

para diferentes  $w \hat{1} W$ ,

$$W = \hat{1} w \hat{1} R^m / w_i \hat{1} (0,1), \hat{a} w_i = \hat{1} \hat{y} \tag{7}$$

donde:

**lex min**: operador que designa la minimización en una primera etapa de  $b$  y, en el caso de no obtenerse una solución única, la minimización de  $\hat{a} z_i$  en el conjunto de puntos que satisfacen el valor de  $b = b^{min}$ .

$$z_i^* = z_i^{id} - e_i$$

$z_i^{id}$  valor ideal del criterio  $z_i$  es decir, valor que adopta  $z_i$  al minimizar únicamente este criterio.

$e_i$  cualquier número real positivo, generalmente muy pequeño

La solución al modelo (3)-(6), para diferentes vectores  $w \hat{1} W$  en el caso del ejemplo mostrado en la Figura 4 permite, evidentemente, explorar toda la región de puntos eficientes, para lo que resulta suficiente el operador **min{b}**. Este operador devuelve la distancia entre el punto  $Z^*$  y el punto correspondiente al vector  $w$  sobre el conjunto  $N$  de soluciones eficientes, de acuerdo a la métrica de Tchebycheff. Sin embargo, cuando la frontera de la región de existencia  $Z$  contiene puntos con iguales valores  $b^{min}$  el operador **lex min** excluye los puntos no eficientes del conjunto dado. Esta situación se ilustra en la Fig. 5. Los puntos eficientes de la tarea de optimización multiobjetivo representada en el espacio  $Z$  de posibles valores de los criterios  $Z_1$  y  $Z_2$  son  $z^6$  hasta  $z^5$ ,  $z^3$ ,  $z^3$  hasta  $z^2$ ,  $z^2$ . La minimización de  $b$  devuelve, además, los puntos desde  $z^5$  hasta  $z^4$  los que son excluidos en la etapa de minimización de  $\hat{a} z_i$ , con la excepción de  $z^5$ .

Como la realización algorítmica del operador *lex min* resulta compleja, en lugar de (3) se utiliza la operación equivalente, por su efecto:

$$\min_{\hat{I}} \hat{I} b + r \hat{A} \sum_{i=1}^m Z_i \hat{Y} \hat{P} \quad (7)$$

donde:

*r*: escalar pequeño y positivo

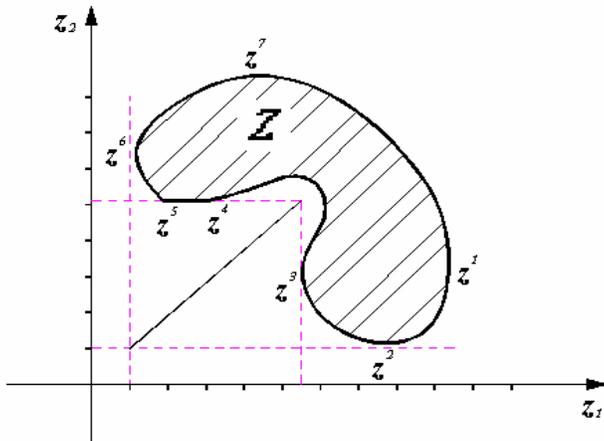


Fig. 5. Acción del operador *lex min*

**Preparación de decisiones**

Con anterioridad se esclareció, como contenido de la función de preparación de decisiones en los sistemas de ingeniería, la generación de opciones *a* - óptimas de decisión, quedando sin esclarecer debidamente este concepto para las condiciones de presencia de múltiples objetivos.

*Definición:* Sea la tarea de minimización simultánea de *m* criterios formalizables  $Z_1, \dots, Z_m$  definidos en un espacio *D*. El espacio de soluciones  $D^a \hat{I} D, j \hat{I} (1, m)$  se denomina *espacio de soluciones a<sub>j</sub> - óptimas* y la solución  $x_i \hat{I} D$  *solución a<sub>j</sub> - óptima* si

$$x \in D^a \Leftrightarrow Z_j(x) - Z_j^{id}(x) \leq a_j$$

donde:

$$a = (a_1, \dots, a_m)$$

$$D = \{ x \hat{I} X / g_k(x) \leq b_k; \quad k \hat{I} (1, \dots, r) \}$$

Los valores *a<sub>j</sub>* designan las soluciones *a<sub>j</sub>*- óptimas de la tarea mencionada minimizando tan solo el criterio *Z<sub>j</sub>* o, en otras palabras, el sacrificio que el decidor está dispuesto a asumir por el criterio *Z<sub>j</sub>(x)* en aras de encontrar el mejor compromiso posible entre todos los indicadores de eficiencia, incluidos los de carácter no formalizable (subjetivos). Los valores *a<sub>j</sub>* deben ser seleccionados lo suficientemente grandes como para obtener un conjunto de soluciones *D<sup>a</sup>* entre las que el decidor pueda elegir

aquella decisión que satisface plenamente su sistema completo de preferencias. En ausencia de indicadores no formalizables de eficiencia (o, lo que resulta equivalente en la práctica, 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 decidor se satisface, evidentemente, por alguna solución del conjunto *N* mediante alguno de los procedimientos iterativos de optimización multiobjetivo que utilizan el programa lexicográfico o aumentado de Tchebycheff que aparecen en la bibliografía (ver, por ejemplo, [5, 6, 7, 8, 9]).

En presencia de indicadores no formalizables, el problema consiste en generar soluciones en un entorno al mejor compromiso entre los indicadores formalizables, tal y como se ilustra en la Fig. 6.

El espacio de criterios *Z<sup>a</sup>* se determina mediante la generación de soluciones *g* - óptimas del programa lexicográfico o aumentado de Tchebycheff, para valores de *g* dados por

$$g = \max \{ w_j a_j^s / j \hat{I} (1, \dots, m) \},$$

donde

$$a_j^s = a_j - \bar{Z}_j$$

$\bar{Z}_j$  valor del criterio *j* en la solución eficiente

seleccionada por el decidor

es decir, mediante la generación de los valores de *x* asociados a todos los valores de *b* tales que:

$$b^{min} \leq b \leq b^{min} + g$$

donde:

*b<sup>min</sup>*: valor de *b* en la solución óptima al programa lexicográfico o aumentado de Tchebycheff

Por otra parte el espacio de soluciones asociado a *Z<sup>a</sup>* es el

espacio  $D^a = \bigcap_{i=1}^m D^{a_i}$  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 *a<sub>j</sub>*- óptimas por todos y cada uno de los criterios de optimalidad (ver Fig. 6). Esta afirmación se ilustra convenientemente en la Fig. 6 y fué demostrada con todo rigor por V. R. Jachaturov (ver [12]). De tal forma, la búsqueda de la mejor solución de compromiso entre los diferentes indicadores de eficiencia puede ser realizada por el siguiente esquema:

1. Búsqueda del mejor compromiso entre los indicadores formalizables de eficiencia con ayuda de alguno de los métodos iterativos que utilizan el programa lexicográfico o aumentado de Tchebycheff.

2. Generación de soluciones  $g$  - óptimas del programa lexicográfico o aumentado de Tchebycheff, para valores de  $w_j$  iguales a los obtenidos en la última solución encontrada del programa lexicográfico o aumentado de Tchebycheff.
3. Selección entre las soluciones encontradas de aquella que satisface plenamente el sistema de preferencias del decidor.

Sin ignorar las complejidades asociadas a la realización algorítmica del esquema propuesto, se debe no obstante notar que, para el caso específico de las tareas de carácter discreto, la aplicación de los resultados desarrollados por el autor en [1, 2] permiten enfrentar con éxito las complejidades mencionadas.

Por otra parte, la selección de soluciones que satisfacen el mejor compromiso entre indicadores formalizables y no formalizables requiere de la presentación al decidor de soluciones que, aunque próximas por los valores de los indicadores formalizables, sean lo mas diferentes posibles entre sí. Por esta razón, resulta con frecuencia más sencillo y efectivo la generación de soluciones  $a$  - óptimas a modelos con aproximaciones lineales de la función de valor multiobjetivo del tipo (2) con el sistema de restricciones dado por el espacio  $D$ . En estas condiciones, el espacio de búsqueda de la mejor solución de compromiso suele resultar mas “diverso”. En la fig. 7 se ilustra este espacio. El esquema de solución a la tarea de optimización multiobjetivo, de acuerdo a este último enfoque, se expone con suficiente claridad en el trabajo [2].

En cualquier caso, la búsqueda del mejor compromiso en el espacio  $D^3$  con ayuda de un sistema de ingeniería, a partir de la evaluación de indicadores no formalizables de eficiencia requiere de la presentación al decidor de las representaciones gráficas del objeto material asociado a cada una de las soluciones analizadas. Aquí se requiere de la utilización de métodos modernos de visualización de las soluciones.

**Ejemplo 3: Diseño óptimo multiobjetivo de troqueles de corte y punzonado simples y progresivos**

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 piezas pueden ser fabricadas por una secuencia dada de tecnologías o bien por una tecnología específica (ver [4]). 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,

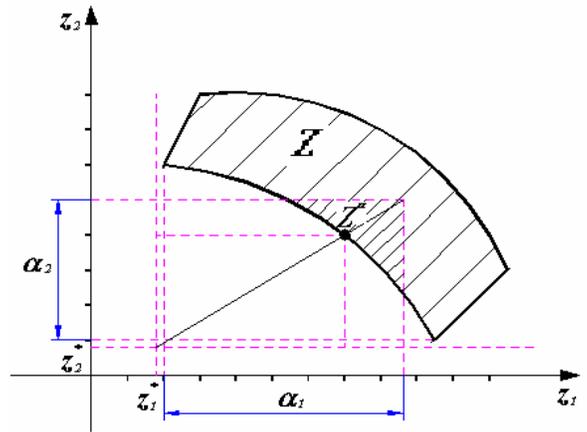


Fig. 6 Ilustración del espacio  $Z^a$  de búsqueda de la mejor solución de compromiso

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,

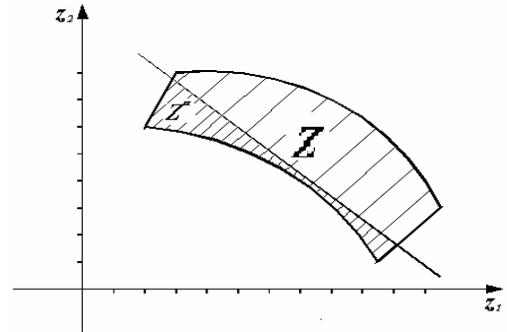


Fig. 7 Espacio de búsqueda de la mejor solución de compromiso con utilización de modelos con aproximaciones lineales a la función de valor multiobjetivo.

necesariamente, la distribución de las piezas en el semiproducto y el diseño del troquel mas adecuados 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, etc.

Así, 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.). satisfacen los requisitos generales de fabricación de la pieza terminada.

En la fig. 8 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 para fabricar la pieza en cuestión. Los sistemas encargados de la generación de las diferentes tecnologías particulares y del diseño del herramental asociado, dan respuestas a las correspondientes fases de fabricación. En el caso del conformado en frío por corte y punzonado se destacan como tareas claves, indisolublemente vinculadas, las tareas de distribución de la pieza en el semiproducto y el diseño del troquel.

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 de decisiones 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. Este enfoque se corresponde por completo con el esquema de la tarea de Selección de Propuestas (ver [11]). Así, en una primera etapa, se genera una serie ordenada de opciones que satisfacen un criterio local de eficiencia y, en una segunda etapa, 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, etc.

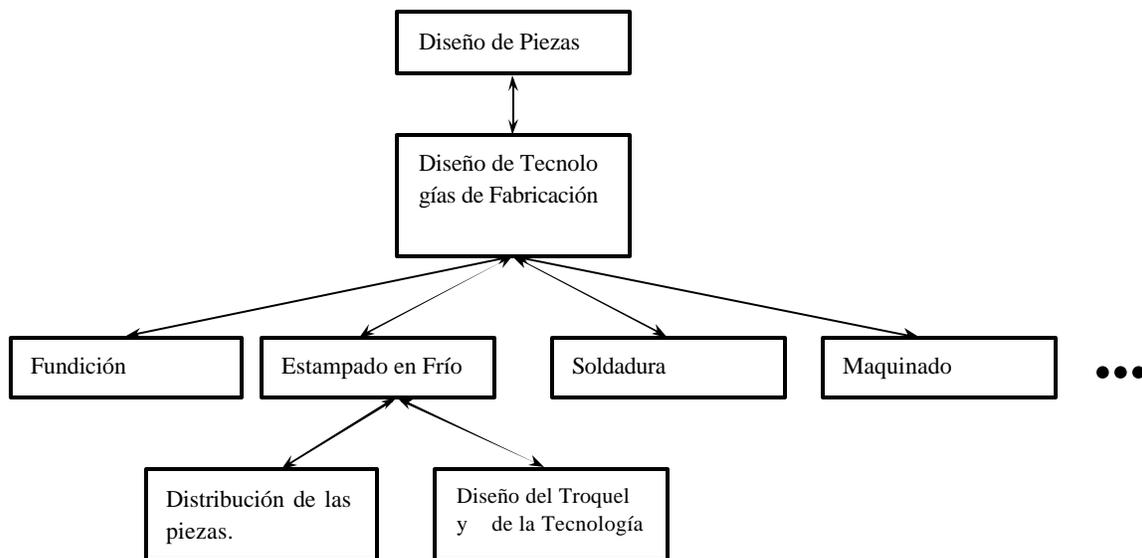


Fig. 8 Jerarquía de los procesos tecnológicos

**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	<i>Apch</i>
<b>Variables de decisión</b>		
1	Desplazamiento entre piezas en el eje X	<i>DespX</i>
2	Desplazamiento entre piezas en el eje Y	<i>DespY</i>
3	Variante de posicionamiento de las piezas	<i>VarN</i>

### 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 de decisiones 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.

Así, en una primera etapa se genera una serie ordenada de opciones que satisfacen un criterio local de eficiencia y, en una segunda etapa, 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, etc. En el ejemplo 2 del presente artículo se realiza el Análisis Externo de la tarea de diseño de troqueles del tipo estudiado, considerando la disponibilidad de opciones racionales de distribución de las piezas en la chapa. Es decir, todas las variables son de naturaleza discreta y constituyen decisiones generales que determinan la configuración del diseño.

El procedimiento de verificación de restricciones y de cálculo de los indicadores de eficiencia a partir de las variables de decisión es muy extenso, por lo que no será tratado en este artículo. Concluido el *Análisis del Sistema* se requiere elaborar el procedimiento de preparación de decisiones de diseño, el que necesariamente debe

considerar la multiplicidad de objetivos, unos de carácter formalizable y otros de carácter no formalizable. En otras palabras, se requiere elaborar el procedimiento de optimización multiobjetivo.

Aplicando los resultados teóricos obtenidos la tarea de diseño óptimo multiobjetivo se enfrenta en correspondencia con el algoritmo de solución planteado para la *Tarea Generalizada de Selección de Propuestas* (ver [2, 11]). Para la solución de esta Tarea fue desarrollado con éxito por los autores un esquema basado en los *Algoritmos Genéticos* (ver [12]). Las posibles soluciones concretas se codifican en forma de cadenas de caracteres binarios. Los valores codificados de las diferentes variables (genes) se agrupan a continuación a lo largo del cromosoma. La creación de una población inicial de cromosomas (soluciones) se realiza de forma aleatoria. Cada solución es evaluada de acuerdo a una función de adaptación (*fitness*), la que se asocia generalmente a la función objetivo a optimizar.

La selección de parejas de *padres* para su reproducción se realiza de acuerdo al principio de asociación de la probabilidad de selección proporcionalmente al valor del *fitness* de los cromosomas. Los cromosomas que permanecen en cada nueva población son los de mejor valor de *fitness* entre los miembros de la población de la generación anterior y sus hijos. Se generan poblaciones hasta que se cumple un criterio de parada. Entre otros criterios de parada se utilizan: generación de un número predeterminado de poblaciones y diferencia inferior a la permisible entre los valores de *fitness* de la mejor y la peor soluciones.

Así, para el diseño óptimo multiobjetivo de troqueles de corte y punzonado simples y progresivos con ayuda de los algoritmos genéticos, se requiere determinar:

- 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

#### Codificación de valores de las variables de decisión

En correspondencia con el esquema clásico de los algoritmos genéticos, se adopta la codificación en código binario de los diferentes valores posibles de las variables de decisión (ver Tabla 1). No se codifican los valores de las variables *MatMa*, *MatPu* y *BasTip* por las siguientes razones:

**MatMa, MatPu** – La influencia de estas variables sobre los indicadores de eficiencia no queda esclarecida en las metodologías empleadas, por lo que no se dispone de criterios cuantificables de preferencia de un material u otro. La selección de estos materiales la realiza el diseñador.

**BasTip** – Los posibles valores de esta variable son: bases fundidas o bases laminadas. La utilización de uno u otro tipo de base depende de las condiciones tecnológicas del taller donde se ha de fabricar el troquel, por lo que la selección de los valores de esta variable la realiza el diseñador.

**Tabla 1 Codificación para el sistema TROQUEL, significado de las variantes posibles.**

Posición de los dígitos	Variable	Significado
4 Primeros dígitos	<i>Ttroq + DpCh</i> 00+00 00+10 01+00 01+10 10+00 10+10 10+01 10+11 11+00 11+01 11+10 11+11	Tipo de TROQUEL + Distribución de las piezas en la Chapa Corte Simple, 1 TROQUEL Corte Simple, 2 TROQUEL Corte Libre, 1 Distribución Corte Libre, 2 Distribución Placa Guía, 1 Distribución Placa Guía, 2 Distribución Placa Guía, 3 Distribución Placa Guía, 4 Distribución Armazón de Columnas, 1 Distribución Armazón de Columnas, 2 Distribución Armazón de Columnas, 3 Distribución Armazón de Columnas, 4 Distribución
1 Dígito	<i>ReLat</i> 1	Recortador Lateral Lleva
1 Dígito	<i>TiCor</i> 0 1	Tipo de Corte Recorte Desecho
1 Dígito	<i>NuPas</i> 0 1	Número de Pasadas Una pasada 2 Pasadas
1 Dígito	<i>SiAli</i> 0 1	Sistema de Alimentación Manual Alimentación Automática
2 Dígitos	<i>ElCen</i> 00 10 01	Elemento Centrador Sin elemento centrador Centrado directo Centrado indirecto
2 Dígitos	<i>MaPar</i> 00 01 10 11	Matriz Partida Sin matriz universal, Filo Inclinado Sin matriz universal, Filo Recto Con matrices universales, Filo Recto. Con mat. univ. y Mat. Partida, Filo Recto.
1 Dígito	<i>ReGui</i> 1 0	Regla Guía Con Regla Guía Sin Regla Guía
1 Dígito	<i>PreLa</i> 1 0	Presionador Lateral Con Presionador Lateral Sin Presionador Lateral.

2 Dígitos	<i>PoCol</i> 00 01 10 11	Posición de las columnas Sin Columnas, o con Columnas Centrales Columnas en diagonal Columnas traseras Columnas Múltiples
1 Dígito	<i>TiCol</i> 0 1	Tipo de Columna Columna Recta Columna Escalonada

Por ejemplo, “1111000000010101” representa a un troquel del tipo:

“1111” - Armazón de Columnas, 4 Distribución,

“0” - Sin Recortador Lateral,

“0” - Recorte,

“0” - 1 pasada,

“0” - Con Alimentación Manual,

“00” - Sin Elemento Centrador,

“00” - Sin Matriz Universal, Con Filo Inclinado

“1” - con Regla Guía,

“0” – Sin Presionador Lateral

“10” – Columnas traseras

“1” – Columna escalonada

Al evaluar el grado de fitness se obtienen los siguientes resultados:

	<i>Apro</i>	<i>Prod</i>	<i>Fuer</i>	<i>Cost</i>	<i>Dura</i>	<i>Itac</i>
1110000000010101	76	50	6.47419	1484.81	120000	6.02438

**Generación de la población inicial.**

La generación de la población inicial de un algoritmo genético puede ser realizada de forma determinística o aleatoria. En este caso, se utiliza la generación aleatoria. Cada cromosoma de la población inicial se genera a partir de un número entre cero y uno, uniformemente distribuido, afectado por el número equivalente a  $2^7$  (131072) y su conversión en un código binario de 17 dígitos.

En la tabla 2 se da una población inicial posible. La necesidad de crear un generador de números aleatorios uniformemente distribuidos se fundamenta por el hecho que los generadores propios de los sistemas de

programación disponibles, devuelven siempre una misma secuencia de números, para una cantidad dada de

generaciones, lo que determina la misma población inicial en dos corridas diferentes lo que no satisface la condición de aleatoriedad requerida.

Ante cada generación de un “cromosoma” se evalúa la validez del mismo, así como, su existencia o no entre las soluciones obtenidas anteriormente. De esta forma se garantiza una “población inicial” de 30 componentes, diferentes y válidos, cada uno representa un diseño con características diferentes.

**Tabla 2 Padres Potenciales (30) que forman la base de la población inicial.**

“10001001000011011”	“10000000110010011”	“11010101000111010”
“11111011001010010”	“11101000100111010”	“11110010001111011”
“01000100111111011”	“10010011001011011”	“11110100011011010”
“11100100110010010”	“10111110100010010”	“11011000011010111”
“1011111100111010”	“11011010001110010”	“10010011010111111”

“100001010110011”	“10011000111110011”	“11011101000111011”
“11111000011110010”	“01100000111010011”	“11101101111111010”
“10111010001111010”	“10111001100110010”	“11011101101111010”
“1111000000010010”	“10010001010111011”	“01100100111010011”
“11100101100011011”	“11101000111110111”	“00000000000000000”

### Evaluación del fitness

Esta se realiza totalmente a partir de la evaluación de la función objetivo siguiente.

$$Z = \sum_{i=1}^m W_i \frac{|Y_i - Y_i^{id}|}{|Y_i^{id}|}$$

donde  $w_i$  - coeficiente que refleja la importancia concedida por el usuario al indicador de eficiencia  $y_i$

$y_i^{id}$  - valor ideal de criterio de eficiencia  $y_i$ , el cual se obtiene como resultado de optimizar individualmente este criterio, desconociendo los restantes.

Se adopta como *fitness* el valor  $1/Z$ .

### Procedimiento de cruzamiento y mutación de las poblaciones.

Para la generación de nuevas poblaciones en los algoritmos genéticos son utilizados dos procedimientos fundamentales: el cruzamiento y la mutación. El procedimiento de cruzamiento consiste en la generación de nuevos cromosomas a partir de dos iniciales (*padres*). Generalmente, a partir de dos *padres* se generan dos cromosomas *hijos*. El procedimiento de mutación consiste en la modificación aleatoria de uno de los bits de la cadena del cromosoma. La ocurrencia de una mutación es aleatoria y el carácter binario que se modifica en la cadena es también aleatorio.

La aplicación experimental de los algoritmos genéticos al diseño de troqueles mostró una influencia prácticamente despreciable del procedimiento de mutación sobre la calidad y velocidad del proceso de optimización.

En la literatura se proponen una gran variedad de variantes de aplicación de la operación de cruzamiento. Se experimentaron casi todas las variantes, resultando la más efectiva la variante de cruzamiento con ayuda de máscaras.

La variante de cruzamiento por máscara, sigue el siguiente procedimiento:

1. Selección de dos cromosomas para realizar la función de padres.

El propósito de la selección de padres es incrementar la probabilidad de reproducir miembros de la población que tengan buenos valores de la función objetivo. La selección de los padres puede variar, por ejemplo, en los algoritmos originales de Holland [12], uno de ellos era elegido de acuerdo a su valor de *fitness*, mientras que el otro padre era elegido aleatoriamente.

En este caso ambos padres se eligen aleatoriamente, por el método de la Ruleta, con vista a aumentar las probabilidades de barrer el mayor espectro de soluciones posibles. El método de la ruleta parte de la idea de una rueda giratoria en la que a cada individuo corresponde una sección circular directamente proporcional a su *fitness*. Un paso de selección entonces, sería análogo a un giro de la ruleta la que, al detenerse, selecciona un individuo con una probabilidad proporcional al arco que se le asocia.

2. Creación de un cromosoma máscara.

El cromosoma máscara, tiene exactamente la misma estructura que los cromosomas de las posibles soluciones y se crea por el mismo mecanismo por el que se generan los cromosomas miembros de la población inicial. Como este cromosoma no tiene asociada solución alguna no se requiere evaluar su factibilidad, ni su *fitness*.

3. Generación de dos nuevos hijos.

Para generar los hijos se sigue el procedimiento:

- **Primer hijo:** A cada posición de los bits “1” de la máscara se le hace corresponder el carácter correspondiente del *padre 1*, al resto de los caracteres se les asigna los valores correspondientes del *padre 2*.

- **Segundo hijo:** A cada posición de los bits “1” de la máscara se le hace corresponder el carácter correspondiente del *padre 2*, al resto de los caracteres se les asigna los valores correspondientes del *padre 1*.

En el proceso de reproducción se hace cumplir la premisa: “De cada pareja de padres se obtienen, al menos, dos hijos válidos”. Un *hijo* puede ser rechazado a partir de los siguientes criterios:

- Si forma o ha formado parte de la población.
  - Si no posee una buena configuración genética.
4. Se repite 2 y 3 hasta que el número de hijos obtenidos sean 2 ó 3.
  5. Sustitución de la población por los hijos.

Si alguno de los hijos tiene mayor valor de *fitness* que alguno de los padres de la población de partida, estas soluciones reemplazarán a las peores soluciones de la población.

#### Criterio (s) de parada

El procedimiento de cruzamiento y mutación de las poblaciones, se repite hasta alcanzar alguno de los criterios de parada siguiente:

- ♦ La diferencia entre los valores del *fitness* del primer y el último miembro de la población no difiere más de 0.025. Una diferencia menor entre estos dos valores hace el proceso de computo impracticable por el gasto en tiempo. Una diferencia mayor provoca la pérdida no deseada de diversidad genética (diversidad de tipos de troqueles) en las poblaciones.
- ♦ Cuando se obtienen 225 soluciones no factibles seguidas, lo cual se corresponde con el análisis de 15 parejas de padres, con 15 máscaras por cada pareja.

Según puede observarse, se ha elaborado un modelo muy simple de evolución que trata de incorporar los conceptos de supervivencia y selección del más apto. Así, se hace evolucionar una población que ha sido generada aleatoriamente hasta llegar a tener una bien adaptada (es decir, con configuraciones satisfactorias que sean soluciones aproximadas del problema de optimización multiobjetivo planteado).

## 8. Resultados obtenidos

Se elaboró una metodología para el Análisis y la Síntesis de Sistemas Automatizados para la Preparación y Toma de

Decisiones bajo Criterios Múltiples y se aplicó, entre otras, a las siguientes tareas prácticas;

Sistema CAD para el diseño óptimo multiobjetivo de herramientas de forja en estampas (en cooperación con el Dr. Raúl Santana Milián de la Universidad de Holguín [13])

Sistema CAPP para la generación de tecnologías de maquinado en tornos con CNC (en cooperación con el Dr. Ricardo Ávila Rondón, de la Un. de Holguín [14])

Sistema CAD para el diseño óptimo multiobjetivo de troqueles de corte y punzonado simples y progresivos (en cooperación con el Dr. Rolando Simeón Monet, de la Un. de Holguín [4]).

Sistema CAD/CAPP para el diseño óptimo multiobjetivo y la fabricación de redes de conductos de climatización (en cooperación con el Dr. Alexis Cordovés García, de la Un. de Holguín [15])

Todos los trabajos mencionados han sido introducidos en explotación en la industria.

En la actualidad el Enfoque expuesto se encuentra en proceso de aplicación en, al menos, otros 6 trabajos de importancia, se ha introducido en la docencia de pre y postgrado.

## 9. Bibliografía:

1. Arzola, J.: Selección de Propuestas, Ed. Científico Técnica, La Habana, 1989.
2. Sistemas de ingeniería, Ed. Félix Varela, La Habana, 2000
3. Wiener, N.: Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and Machine. Willey, N.Y., 1949.
4. Simeón R.: Diseño óptimo multiobjetivo de troqueles de corte y punzonado simples y progresivos . Tesis en opción al grado científico de Dr. en Ciencias Técnicas, Holguín, 1999.
5. Steuer, R. E.: Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation and Application, Willey, New York, 1986.
6. Gardiner, L. R. and R. E. Steuer: “Unified interactive multiple objective programming”. Eur. J. Opl. Research 74, 1994.
7. Karainova, J. N.; S. C. Narula and V. Vassilev: “An interactive procedure for multi-objective integer programming”. Eur. J. Opl. Research 68, 1993.
8. 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.
9. Lewandowski, A. And A. P. Wierzbicki: Aspiration Based decision Support Systems. Springer-Verlag, Berlin, 1989.

10. Arzola, J. y L. Suárez: "Reglas de Conducta en la proyección y conducción de procesos de calentamiento del acero", Rev. Argus, Saltillo (México), 1993.
11. Fiol A.: El método de Selección de Propuestas y su generalización. Tesis en opción al grado de Master en Optimización y Toma de Decisiones, ISPJAE, La Habana, 1999.
12. Diaz, A.y otros: Optimización heurística y redes neuronales. Ed. Paraninfo, Madrid, 1996.
13. Santana, R. y J. Arzola: "Optimización multiobjetivo de procesos de forja en estampas de piezas rotacionalmente simétricas". Proc. III Conferencia Internacional de Robótica y Fábrica del Futuro, Pereira (Colombia), 1997.
14. Avila, R.: Generación de Tecnología para Máquinas Herramienta con Control Numérico Computarizado. Tesis en opción al grado científico de Dr. en Ciencias Técnicas, Holguín, 1999.
15. Cordovés, A. Y J. Arzola: "Diseño óptimo multiobjetivo y preparación para la fabricación (CAD/CAPP) de redes de conductos de climatización", Rev. Ingeniería Mecánica, 2 (1), 1999.

## Systems for preparing and making decisions under multiple criterions

### Abstract:

In the paper a methodology for Analysis and Synthesis of Systems dedicated to the preparation and making of decisions under multiple objectives is exposed and its application to engineering tasks.

This methodology presupposes the realization of the following stages of works:

- Decomposition of the task of more spans which belongs to the studied task
- External and Internal Analysis.
- Elaboration of the general procedure of preparation and making of decisions

Examples of application of this methodology to the solution of great complexity engineering tasks are exposed.

**Key words:** discreet optimization, systems analysis, systems engineering, multiple objective optimization, decomposition, complex optimization tasks.

## IV Encuentro de Ingeniería de Materiales

Septiembre, 2002, La Habana, Cuba

### TEMAS PRINCIPALES



**Metalografía y Tratamiento Térmico, Tribología, Materiales Compuestos, Biomateriales, Materiales para la Electrónica, Cerámicas y Polímeros, Mecánica de la Fractura, Metalurgia, Maquinado, Metrología, Soldadura, Economía en la Fabricación, Conformación, Maquinas de Control Numérico**

---

**Para enviar resúmenes o solicitar información adicional**

---

Comité Organizador Materiales 2002  
Instituto Superior Politécnico *José Antonio Echeverría*  
Facultad de Ingeniería Mecánica  
Calle 127 s/n, CUJAE, Marianao 15, Ciudad de La Habana, Cuba  
Teléfono: (537) 260 2267 Fax: (537) 267 1208  
E-mail: [tcm@mecanica.ispjae.edu.cu](mailto:tcm@mecanica.ispjae.edu.cu)