

ANÁLISIS Y SÍNTESIS DE SISTEMAS DE INGENIERÍA PARA LA PREPARACIÓN Y TOMA DE DECISIONES BAJO CRITERIOS MÚLTIPLES

JOSÉ ARZOLA RUIZ* ROLANDO SIMEÓN**

Recibido/Received: 31 Octubre/October 2000

Resumen

En este trabajo 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:

- Descomposición de la tarea de mayor envergadura a la que pertenece la tarea estudiada.
- Análisis externos e interno.
- Elaboración del procedimiento general de preparación y toma de decisiones.

Palabras clave: Toma de decisiones, optimización, cibernética, algoritmos genéticos.

Abstract

We present a methodology for the analysis and synthesis of systems dedicated to the preparation and decisions making under multiple objectives, as well as its application to engineering tasks. This methodology presupposes the realization of the following steps:

- decomposition of the task of more spans which belong the studied task,
- external and internal analysis, and
- elaboration of the general procedure of preparation and decisions making.

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

Keywords: Decision making, optimization, cybernetics, genetic algorithms.

Mathematics Subject Classification: 90B50, 90C27

*Unidad Docente Metalúrgica, Facultad de Ingeniería Mecánica Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”, La Habana, Cuba. E-Mail: udm@aacero.colombus.cu.

**CE CADICAM, Universidad de Holguín, Cuba. E-Mail: rsimeon@uho.hlg.edu.cu.

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 control 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 Cuba, 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 control 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 la tarea 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 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 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 termina-

da, 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 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 más 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 embrague, 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: Descomposición de la tarea de diseño de tecnologías de laminación de perfiles

Todo taller de laminación de perfiles incluye uno o más hornos de calentamiento, un molino de laminación, área electroenergética, 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, y
- laminación del perfil (conciliación de los sistemas. anteriores)

3. Análisis del sistema de dirección por tareas

La tareas de preparación de decisiones derivadas de la aplicación de los principios de descomposición enunciados anteriormente se someten a análisis externo e interno (ver figura 1). La necesidad en la realización de estas etapas de análisis se fundamenta, entre otros resultados, en el siguiente:

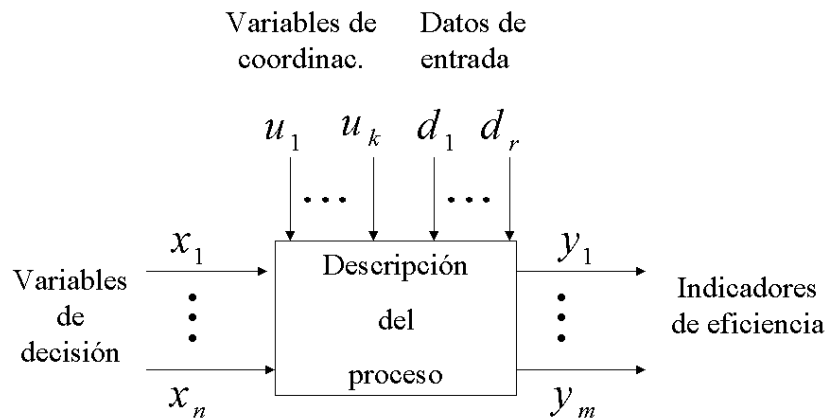


Figura 1: Clasificación de la información involucrada en el análisis externo de los procesos de preparación de decisiones.

El análisis externo (ver [2]) se inicia por la determinación de los indicadores de eficiencia que pueden resultar de interés al potencial usuario del sistema. Estos 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 sistemas.

En una segunda etapa, se determinan las variables de entrada del proceso. Éstas 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:

- variables de decisión,
- variables de coordinación, y
- datos de entrada.

Las variables de decisión son aquéllas 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 aquéllas 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 consideradas 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. 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 decisor a cada uno de estos indicadores:

$$Z = f(y_i, w_i) \quad (1)$$

donde w_i es un 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, indicadores de eficiencia y parámetros intermedios de cálculo.

Una parte de los indicadores de eficiencia puede aparecer en la función multiobjetivos (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 figura 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 específica (programación lineal, programación geométrica, programación en enteros, etc.), métodos heurísticos, etc.

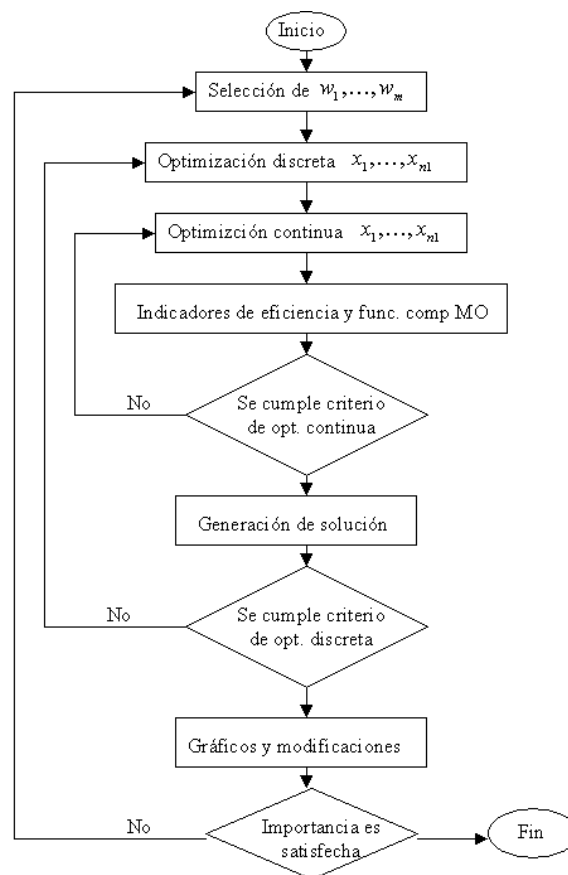


Figura 2: Esquema algorítmico general del proceso de preparación de decisiones.

Ejemplo: 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 más disímiles configuraciones (ver [19]).

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	Apro
2. Productividad de la prensa	Prod
3. Fuerza de corte	Fuer
4. Costo de fabricación	Cost
5. Durabilidad del troquel	Dura
6. Precisión	Itac

Variables de decisión

1. Tipo de troquel [simple/guía/armazón de columnas]	TTroq
2. Distribución de piezas en la chapa [1,2,3,4]	DpCh
3. Elementos reguladores del paso: recortadores laterales [Uso o no]	ReLat
4. Tipo de corte [de la pieza/del desecho]	TiCor
5. Número de pasadas	NuPas
6. Sistema de alimentación [Manual/Automático]	SiAli
7. Elementos centradores	ElCen
8. Tipo de matriz y filo	MaPar
9. Elementos de posicionamiento:	
regla guía	ReGui
presionador lateral	PreLa
10. Material de matriz	MatMa
11. Material del punzón	MatPu
12. Bases	
Tipo (fundida o laminada)	BasTip
Posición de las columnas	PoCol
Forma de la columna	TiCol

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 es un coeficiente que refleja la importancia concedida por el usuario la indicador de eficiencia y_i , y y_i^{id} es el valor ideal del 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 [19]). 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 para 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 2D y 3D) 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 le objetivo de constituir herramientas para preparar decisiones. La toma de decisiones la realiza en cada aplicación diferente del sistema, un decisor diferente.

Así, el sistema diseñado debe entregar la información necesaria para que el eventual decisor 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 decisor y cuál 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 α -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 decisor 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 toma ulterior de decisiones por el nivel superior (decisor)

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 decisor (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 (decisor).

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 juega 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 decisor 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 α -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 α -óptimas en presencia de múltiples objetivos, lo que será realizado más 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 [20]). 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:

$$\begin{aligned} & \text{mín}\{z_1 = 4 + x_1 - 0,5x_2\} \\ & \text{mín}\{z_2 = x_2\} \\ & \text{asegurando: } x \in D \end{aligned}$$

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

Definición 1 *Un vector de soluciones eficientes $z \in Z$ se denomina no sustentado si y*

solo si no existe un $w \in \mathbb{R}^m$ tal que z es solución de la tarea

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

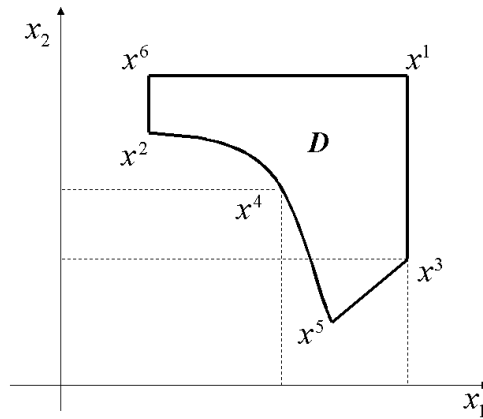


Figura 3: Representación del espacio de las decisiones.

El conjunto de soluciones eficientes no sustentadas de la figura 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, [11, 13, 15, 16, 20]), permiten explorar todo el espacio N de alternativas eficientes con ayuda del Programa Lexicográfico o Aumentado de Chebychef.

6.1. Programa lexicográfico y aumentado de Chebychef

Para muestrear el conjunto no dominado de soluciones se resuelve, 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,

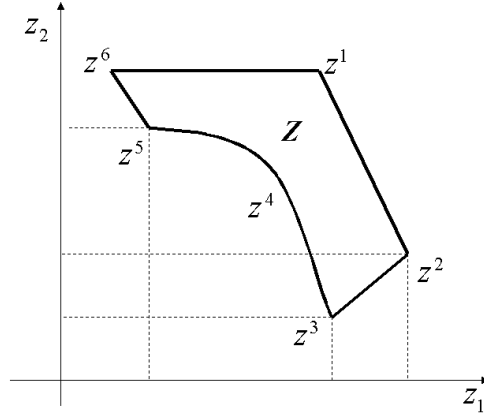


Figura 4: Representación del espacio de los criterios.

denominado programa lexicográfico de Chebychef:

$$\text{lex mín} \left\{ \beta, \sum_{i=1}^m z_i \right\} \quad (3)$$

$$\beta \geq w_i(z_i - z_i^*); \quad i = 1, \dots, m \quad (4)$$

$$g_i(x) \geq b_i; \quad i = 1, \dots, r \quad (5)$$

$$0 \leq \beta \in \mathbb{R} \quad (6)$$

para diferentes $w \in W$, $W = \{w \in \mathbb{R}^m / w_i \in (0, 1), \sum_{i=1}^m w_i = 1\}$ donde: lex mín es el operador que designa la minimización en una primera etapa de β y, en el caso de no obtenerse una solución única, la minimización de $\sum_{i=1}^m z_i$ en el conjunto de puntos que satisfacen el valor de $\beta = \beta^{\text{mín}}$.

La solución al modelo (3)-(6), para diferentes vectores $w \in W$ 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 $\text{mín}\{\beta\}$. 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 Chebychef. Sin embargo, cuando la frontera de la región de existencia Z contiene puntos con iguales valores $\beta^{\text{mín}}$ el operador lex mín excluye los puntos no eficientes del conjunto dado. Esta situación se ilustra en la figura 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 β devuelve, además, los puntos desde z^5 hasta z^4 los que son excluidos

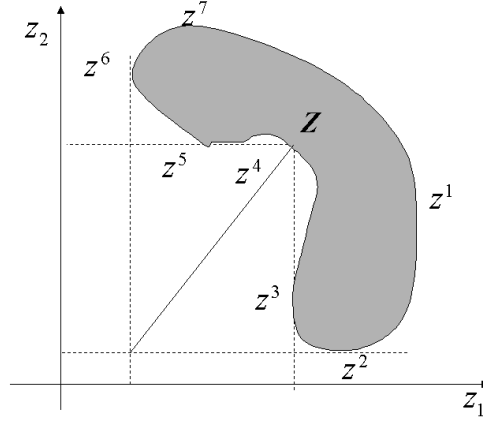


Figura 5: Acción del operador lex mín.

en la etapa de minimización de $\sum_{i=1}^m Z_i$, con la excepción de z^5 . Como la realización algorítmica del operador lex mín resulta compleja, en lugar de (3) se utiliza la operación equivalente, por su efecto:

$$\text{mín} \left\{ \beta + \rho \sum_{i=1}^m Z_i \right\} \quad (7)$$

donde ρ es un escalar pequeño y positivo.

6.2. Preparación de soluciones

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

Definición 2 Sea la tarea de minimización simultánea de m criterios formalizables Z_1, \dots, Z_m definidos en un espacio D . El espacio de soluciones $D^{\alpha_j} \subset D, j \in (1, m)$ se denomina espacio de soluciones α_j -óptimas y la solución $x_i \in D$ solución $\alpha - j$ -óptima si

$$x_i \in D^{\alpha} \iff Z_j(x_i) - Z_j^{id}(x_i) \leq \alpha_j$$

donde $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_m)$ y $D = \{x \in X / g_k(x) \geq b_k, \forall k \in (1, \dots, r)\}$.

Los valores α_j designan las soluciones α_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 formalizable (subjetivos).

Los valores α_j deben ser seleccionados lo suficientemente grandes como para obtener un conjunto de soluciones D^α entre las que el decisor 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 decisor 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 Chebychef que aparecen en la bibliografía (ver, por ejemplo, [13, 15]).

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 figura 6.

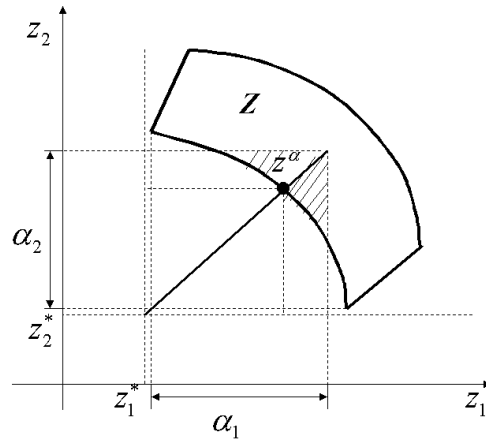


Figura 6: Ilustración del espacio Z^α de búsqueda de la mejor solución de compromiso.

El espacio de criterios Z^α se determina mediante la generación de soluciones γ -óptimas del programa lexicográfico o aumentado de Chebychef, para valores de γ dados por

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

donde $\alpha_j^s = \alpha_j - \bar{Z}_j$ y \bar{Z}_j es el 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 β tales que:

$$\beta^{\min} \leq \beta \leq \beta^{\min} + \gamma$$

donde β^{\min} es el valor de β en la solución óptima al programa lexicográfico o aumentado de Chebychef.

Por otra parte el espacio de soluciones asociado a Z^α es el espacio $D^\alpha = \bigcap_{i=1}^m D^{\alpha_i}$ 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 α_j -óptimas por todos y cada uno de los criterios de optimalidad (ver figura 6). Esta afirmación se ilustra convenientemente en la figura 6 y fué demostrada con todo rigor por V.R. Jachaturov (ver [12]). Los valores de α_j pueden ser estimados inicialmente iguales a los rangos R_i , estimados a su vez a partir de la tabla de resultados.

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 Chebychef (el autor de este trabajo recomienda el procedimiento WIERZ).
2. Generación de soluciones γ -óptima del programa lexicográfico o aumentado de Chebychef, para valores de w_j iguales a los obtenidos en la última solución encontrada del programa lexicográfico o aumentado de Chebychef.
3. Selección entre las soluciones encontradas de aquella que satisface plenamente el sistema de preferencias del decisor.

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 decisor de soluciones que, aunque próximas por los valores de los formalizables, sean lo mas diferentes posibles posibles entre sí. Por esta razón, resulta con frecuencia más sencillo y efectivo la generación de soluciones α -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 a la tarea de optimización multiobjetivo, de acuerdo a este último enfoque, se expone con suficiente claridad en el acápite 1 del presente trabajo.

En cualquier caso, la búsqueda del mejor compromiso en el espacio D^α con ayuda de un sistema de ingeniería, a partir de la evaluación de indicadores no formalizables de eficiencia requiere de la presentación al decisor 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.

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

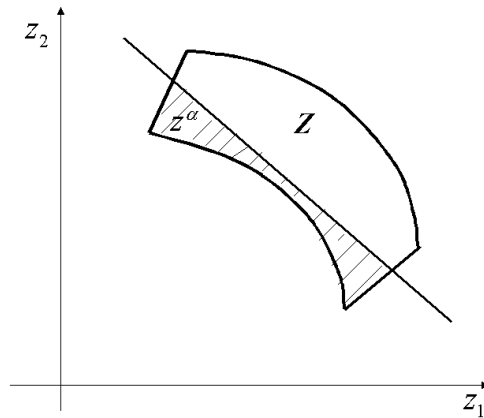


Figura 7: Espacio de búsqueda de la mejor solución de compromiso con utilización de modelos con aproximaciones lineales a la función de valor multiobjetivo.

de fabricación de piezas. Las piezas pueden ser fabricadas por una secuencia dada de tecnologías o bien por una tecnología específica (ver [19])

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 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.) 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 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**.

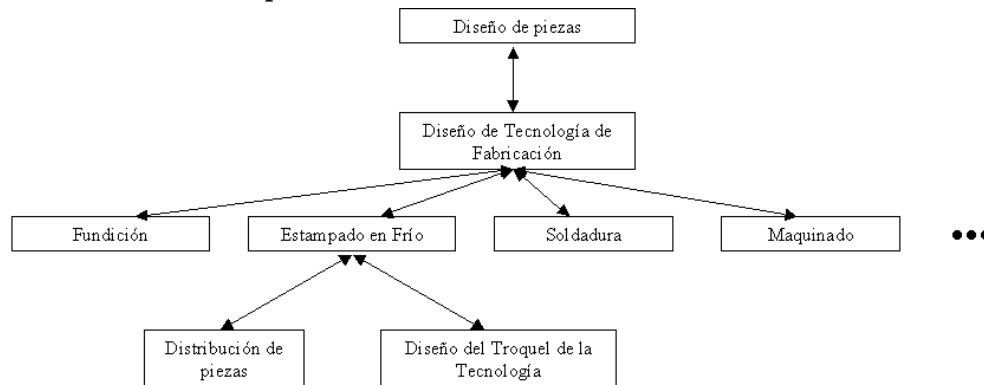


Figura 8: Jerarquía de los procesos tecnológicos.

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.

6.3. 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

- | | |
|--------------------------------|------|
| 1. Aprovechamiento de la chapa | Apch |
|--------------------------------|------|

Variables de decisión

- | | |
|--|-------|
| 1. Desplazamiento entre piezas en el eje X | DespX |
| 2. Desplazamiento entre piezas en el eje Y | DespY |
| 3. Variante de posicionamiento de las piezas | VarN |

6.4. 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.

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

El procedimiento de cálculo de los indicadores de eficiencia a partir de las variables de decisión es muy complejo, por lo que no será tratado en este trabajo.

Concluido el **Análisis del Sistema** se requiere elaborar el procedimiento de preparación de decisiones, 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**. 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 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.

6.5. 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*, *BasTip* por las siguientes razones:

- *MatMa*, *MatPu*: La influencia de estas variables sobre los indicadores de eficiencia adoptados no queda esclarecida en las metodologías utilizadas en este trabajo, por lo que no se dispone de criterios cuantificables de preferencia de un material u otro. Por esta razón 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.

Posición	Variable	Significado
4 Primeros dígitos	Ttroq+DpCh 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	ReLat 1	Recortador Lateral Lleva
1 Dígito	TiCor	Tipo de Corte Recorte Desecho
1 Dígito	NuPas 0 1	Número de Pasadas Una pasada 2 pasadas
1 Dígito	SiAli 0 1	Sistema de Alimentación Manual Alimentación Automática
2 Dígitos	ElCen 00 10 01	Elemento Centrador Sin elemento centrador Centrado directo Centrado indirecto
2 Dígitos	MaPar 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	ReGui 1 0	Regla Guía Con Regla Guía Sin Regla Guía
1 Dígito	PreLa 1 0	Presionador Lateral Con Presionador Lateral Sin Presionador Lateral
2 Dígitos	PoCol 00 01 10 11	Posición de las columnas Sin Columnas, o con Columnas Centrales Columnas en diagonal Columnas traseras Columnas Múltiples
1 Dígito	TiCol	Tipo de Columna Columna Recta Columna Escalonada

Cuadro 1: Codificación para el sistema TROQUEL, significado de las variantes posibles.

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:

	Apro	Prod	Fuer	Cost	Dura	Itac
1111000000010101	76	50	6.47419	1484.81	120000	6.02438

6.6. Gneración 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^{17} (131072) y su conversión en un código binario de 17 dígitos.

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.

6.7. 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 es un coeficiente que refleja la importancia concedida por el usuario al indicador de eficiencia y_i , y y_i^{id} es el valor ideal de criterio de eficiencia y_i , el cual se obtiene como resultado de optimizar individualmente este criterio, desconociendo los restantes.

10001001000011011	10000000110010011	11010101000111010
11111011001010010	11101000100111010	11110010001111011
01000100111111011	10010011001011011	11110100011011010
11100100110010010	10111110100010010	11011000011010111
10111111100111010	11011010001110010	10010011010111111
10000101010110011	10011000111110011	11011101000111011
11111000011110010	01100000111010011	11101101111111010
10111010001111010	10111001100110010	11011101101111010
11110000000010010	10010001010111011	01100100111010011
11100101100011011	11101000111110111	00000000000000000

Cuadro 2: Padres potenciales (30) que forman la base de la población inicial.

6.8. 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 nuevas 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 modifican 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 propone 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 [8], 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 general 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 asignó 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.

6.9. Criterios de parada

El procedimiento de cruzamiento y mutación de la 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 cómputo 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).

7. 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 a las siguientes tareas prácticas:

- Sistema CAD para el diseño óptimo multiobjetivo de herramientas de forja en estampas (en cooperación en el Dr. Raúl Santana Milián de la Universidad de Holguín).
- Sistema CAPP para la generación de tecnologías de maquinado en tornos con CNC (en cooperación con el Dr. Ricardo Ávila Rondón, de la Universidad de Holguín).
- Sistema CAD para el diseño óptimo multiobjetivos de troqueles de corte y punzonado simples y progresivos (en cooperación con el Dr. Rolando Simeón Monet, de la Universidad de Holguín).
- 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 Universidad de Holguín).

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, cada uno de los cuales constituye tema de doctorado,

Referencias

- [1] Arzola, J. (1989) *Selección de Propuestas*. Ed. Científico Técnica, La Habana.
- [2] Arzola, J. (2000) *Sistemas de Ingeniería*. Ed. Félix Varela, La Habana.
- [3] Arzola, J.; Suárez, L. (1993) “Reglas de conducta en la proyección y conducción de procesos de calentamiento del acero”, *Rev. Argus*, Saltillo (México).
- [4] Avila, R. (1999) *Generación de Tecnología para Máquinas Herramienta con Control Numérico Computarizado*. Tesis en opción al grado científico de Dr. en Ciencias Técnicas, Holguín.
- [5] Casals, B.; Arzola, J. (1997) “Uso de la explosión en la producción de materiales”, *Proc. de la II Conferencia Internacional de Metalurgia y Tecnología de Materiales*, Sao Paulo.
- [6] Castillo, R. (1998) *Tratamiento Hidrometalúrgico de las Menas Polimetálicas del Yacimiento Santa Lucía*. Tesis en opción al grado científico de Dr. en Ciencias Técnicas, La Habana.
- [7] Cordovés, A. (1999) *Diseño Óptimo Multiobjetivo y Preparación para la Fabricación (CAD/CAPP) de Redes de Conductos de Climatización*. Tesis en opción al grado científico de Dr. en Ciencias Técnicas, Holguín.

- [8] Cordovés, A.; Arzola, J. (1999) “Diseño óptimo multiobjetivo y preparación para la fabricación (CAD/CAPP) de redes de conductos de climatización”, *Rev. Ingeniería Mecánica* **2**(1).
- [9] Díaz, A. y otros (1996) *Optimización Heurística y Redes Neuronales*. Ed. Paraninfo, Madrid.
- [10] Fiol, A. (1999) *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.
- [11] Gardiner, L. R.; Steuer, R.E. (1994) “Unified interactive multiple objective programming”, *Eur. J. Opr. Research* **74**.
- [12] Jachaturov V. (1989) *Métodos Matemáticos de la Programación Regional*. Ed. Nauka, Moscú (en ruso).
- [13] Karainova, J. N.; Narula, S.C.; Vassilev, V. (1993) “An interactive procedure for multi-objective integer programming”, *Eur. J. Opr. Research* **68**.
- [14] Komoda, N.; Kera, K.; Kubo, T. (1984) *Computer* **17**(12): 46–51.
- [15] Korhonen, P.; Steuer, R.E. (1993) *An Heuristic for Estimating Nadir Criterion Values in Multiple Objective Linear Programming*. Graduate Programs in Management Science, University of Georgia, Athens, Georgia.
- [16] Lewandowski, A.; Wierzbicki, A.P. (1989) *Aspiration Based Decision Support Systems*. Springer-Verlag, Berlin.
- [17] Mesarovic, M.D.; Macko, D.; Takahara, Y. (1970) *Theory of Hierarchical, Multilevel Systems*. Academic Press, New York-London.
- [18] Santana, R.; Arzola, J. (1997) “Optimización multiobjetivo de procesos de forja en estampas de piezas rotacionalmente simétricas”, *Proc. III Conferencia Internacional de Robótica y Fábrica del Futuro*, Pereira (Colombia).
- [19] Simeón, R. (1999) *Diseño Óptimo Multiobjetivo de Troqueles de Corte y Punzonado Simples y Progresivos*. Tesis en opción la grado científico de Dr. en Ciencias Técnicas, Holguín.
- [20] Steuer, R.E. (1986) *Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation and Application*. Wiley, New York.
- [21] Wiener, N. (1949) *Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and Machine*. Wiley, New York.