



**Propuesta de Premio de la Academia de Ciencias de Cuba:
METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS Y LA SÍNTESIS DE
SISTEMAS DE INGENIERÍA Y MÉTODOS ASOCIADOS**

Dr. Ing. José Arzola Ruiz

Centro de Estudios de Matemática para las Ciencias
Técnicas, Universidad Tecnológica de La Habana “José
Antonio Echeverría” (CUJAE)

-2017-

Datos generales:

Título: Metodología de Análisis y Síntesis de Sistemas de Ingeniería y métodos asociados

Autor: Dr. Ing. José Arzola Ruiz

Centro de Estudios de Matemática para las Ciencias Técnicas. CEMAT
Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, CUJAE

Entidad colaboradora: Centro de Estudios CAD/CAM de la Universidad de Holguín “Oscar Lucero Moya” (ver certificado al final del documento).

Autor para la correspondencia:

José Arzola Ruiz

Centro de Estudios de Matemáticas para las Ciencias Técnicas,
Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”
Calle 114, s/n, Marianao, La Habana.

Título del resultado anterior premiado: Concepción y diseño de Sistemas de Ingeniería para la preparación y toma de decisiones bajo criterios múltiples

Año de premiación: Se obtuvo en el 2000, se presentó en el 1999

Autor: José Arzola Ruiz

Institución ejecutora: CUJAE

Área del conocimiento: Teoría de Sistemas

Impactos del trabajo correspondiente al premio anterior.

El premio en el año 2000, se otorgó a un trabajo que precedea la actual Metodología de Análisis y Síntesis de Sistemas de Ingeniería y los métodos asociados, los que se fundamentan en esta oportunidad. Se habían defendido 6 doctorados tutorados por el autor con aplicación en algunas de ellas del método de Selección de Propuestas.

Impactos correspondientes a la presente propuesta:

A partir de aquella fecha se han defendido otras 9 Tesis de doctorado de diversas áreas de las ingenierías Mecánica, Metalurgia, Energética, Hidráulica con la aplicación de la metodología, numerosas Tesis de Maestría y Doctorado. En esas 9 Tesis de Doctorado se aplican tanto la metodología de análisis y síntesis de sistemas de ingeniería, como los diferentes algoritmos desarrollados del método de Integración de Variables, varios algoritmos del cual se ha aplicado en las investigaciones de los Doctorados, Maestrías e incluso Tesis de Grado tutoradas. El método de Selección de Propuestas, el cual puede considerarse como un algoritmo particular del método de Integración de Variables, se ha perfeccionado con la elaboración de un modelo matemático para la estimación de sus condiciones de convergencia. Se ha realizado un gran número de publicaciones, incluyendo artículos de primer y segundo nivel. Se han presentado muchos trabajos en Eventos, principalmente en los Seminarios Euro-Latinoamericanos de Sistemas de Ingeniería (SELASI), que organiza anualmente en diferentes ciudades y países de América Latina y Europa, por el autor de la propuesta de Premio, con 13 ediciones realizadas a partir del año 2005. Se han aprobado y ejecutado 2 proyectos internacionales (Proyecto Alfa de la Comunidad Europea y otro AECI con España) y varios nacionales. Coordina el grupo inter-ces de investigación Sistemas de Ingeniería, en el que participan profesores de la CUJAE y de la Universidad de Holguín. Se han obtenido varios premios provinciales a partir de trabajos de colaboración con la Universidad de Holguín, la que le honró con la concesión Categoría Especial de Profesor Invitado de esa Universidad.

El cronograma e interrelación de las investigaciones realizadas en el periodo 1971-2017 se presenta en las páginas de la 8 a la 17 del documento principal.

Nivel de introducción

- La gran mayoría de las Tesis de Doctorado defendidas han tenido aplicación en la Industria, han propiciado el surgimiento de programas de Maestría y Doctorado. La línea de investigación se ha introducido en investigaciones a nivel de pregrado, Maestría y Doctorado, no solo en la CUJAE, sino también en la Universidad de Holguín. En esta Universidad se introdujo el curso Sistemas de Ingeniería en los programas de Maestría y Doctorado de Diseño y Fabricación asistidos por

computadora. Se trabaja para la Industria, con aplicaciones concretas. Se han impartido numerosos cursos de postgrado en el Perú, Ecuador, Venezuela.

- No solo está introducido sino que se continúa introduciendo, no solo en las Tesis, sino a través de ellas en la Industria y no solo en la cubana, sino también en la venezolana. Se tutoran actualmente Doctorados a 2 cubanos, 2 ecuatorianos, y un angolano.
- La introducción ampliada de la metodología y los métodos que se proponen en cursos y Tesis de pregrado y, sobre todo, en Maestría y Doctorado.

Información económica:

- El resultado se ha alcanzado sin gastos adicionales al salario del aspirante y de sus colaboradores, pues incluso en los casos que las investigaciones de aplicación hayan ocasionado gastos, éstos no se relacionan directamente con el resultado propuesto.
- La Línea de Investigación crece y se generaliza permanentemente, no solo en Cuba, sino también en el extranjero, a pesar de no contar con financiamiento explícito.

Correspondencia con las prioridades establecidas en los lineamientos de la política económica del país.

Dado el carácter sistémico del resultado presentado, su aplicabilidad demostrada en investigaciones de aplicación en diferentes áreas de la ingeniería el resultado favorece la implementación de los lineamientos de la política económica y social del partido y la revolución.

Publicaciones últimos 3 años

- MARTÍNEZ-VALDÉS O. Y J. ARZOLA-RUIZ (2017): [Exploration of Variable Codes Algorithm for Linings Materials and its Thickness Selection of Steel Casting Ladles](#). IEEE Latin American Transactions, V 15, N 8, pp1528–1535.(WoS)
- CORDOVÉS-GARCÍA, A., ARZOLA-RUIZ, J. and ASHGER, U. (2017)“[Incorporating the Cultural and Decisions Factors in Multi-objective Optimization of Air Conditioning Conduit Design Process](#)”. In Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer, ISSN 2194-5365 .
- ASGHER U., A. RIAZ, Y. AYAZ, N. NASEER, A. LIAQATI, J. ARZOLA- RUIZ AND M.KOLE(2017): [Analyzing Various Functions of Prefrontal Cortex \(PFC\) in Decision Making via Brain Imaging Techniques](#). In Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer, ISSN 2194-5365 .
- MARTÍNEZ-VALDÉS O. Y J. ARZOLA-RUIZ (2017):[Operadores genéticos y de búsqueda aleatoria aplicados a tareas de selección de materiales de revestimiento para cucharas metalúrgicas](#). Revista de Metalurgia, V 53, N 3.(WoS)
- ANTÓNIO-MAGAIA N., I. ALEMÁN-ROMERO, J. ARZOLA-RUIZ, O. MARTÍNEZ-VALDÉS (2017): [Ajuste posinomial combinando Enjambre de Partículas y Métodos de Programación No-lineal](#). Ingeniería Mecánica. Vol. 20. No. 2, p. 83-90.(SCIELO)
- MARTÍNEZ-VALDÉS O. Y J. ARZOLA-RUIZ (2016):. [Selección óptima bajo criterios múltiples de materiales refractarios y aislantes para cazuelas metalúrgicas](#). Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, V 32, N 4, pp 252–260. (WoS)
- ARZOLA-RUIZ J., M. ASÍS-LÓPEZ, J. ESPINOLA-GONZALES Y VLADIMIR RODRÍGUEZ SABINO(2015): [Generación automática de mallas triangulares con control de error y aplicaciones en la industria](#).Aporte Santiaguino. 8 (2), 2015: 183-192, ISSN 2070-836X. (LatIndex)
- TORANZO-LORCA G. J. ARZOLA-RUIZ (2015): [“Un algoritmo del método de integración de variables para la solución del problema Máximo Clique Ponderado”](#), Revista Investigación Operacional, Vol. 35, No. 1, pp. 27-34. (Scopus)

ÍNDICE

	Págs.
Resumen	1
INTRODUCCIÓN	5
1. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA DEL ANÁLISIS Y LA SÍNTESIS DE SISTEMAS DE INGENIERÍA	19
1.1 Teoría de sistemas y cibernética	20
1.2 Teorías de la complejidad	22
1.3 Autopoiesis y sistemas de dirección	27
1.4 Análisis de sistemas, ingeniería de sistemas y sistemas de ingeniería	30
1.5 Sistemas multiagentes	34
1.6 La inteligencia colectiva y la toma de decisiones	36
1.7 Análisis multicriterial	37
1.8 Técnicas modernas de optimización. Heurísticas	41
1.9 Sistemas de ayuda al diseño, la planeación de la producción y la tecnología, la operación del proceso y otros	47
1.10 Modelado y simulación	50
1.11 Funciones de aproximación	57
Conclusiones	61
2 ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS DE INGENIERÍA	64
2.1 El concepto de sistemas de ingeniería	64
2.2 Correspondencia entre las estructuras de los procesos de toma de decisiones y de los modelos matemáticos de los sistemas asociados	66
2.2.1 Estructura descentralizada	74
2.2.2 Estructura centralizada	81
2.2.3 Estructura disperso conciliada	88
2.2.4 Estructura jerárquica participativa	99
2.3 Principios de descomposición de la tarea de toma de decisiones en objetos complejos	111
2.4 Análisis de los sistemas de toma de decisiones por tareas	119

	Conclusiones	129
3	SÍNTESIS DE LOS SISTEMAS DE INGENIERÍA	130
3.1	Procedimientos y herramientas propios de la síntesis de los sistemas	131
3.2	Preparación de decisiones	132
3.3	Preparación y toma de decisiones en los sistemas de ingeniería organizados en estructuras centralizadas	140
3.4	Preparación y toma de decisiones en los sistemas de ingeniería organizados en estructuras disperso conciliadas	142
3.5	Preparación y toma de decisiones en los sistemas de ingeniería organizados en estructuras jerárquicas participativas.	143
3.5.1	Caso de objetivos separables	145
3.5.2	Método de selección de propuestas	146
3.5.2	Caso de objetivos no separables	172
3.6	Método de Integración de Variables	173
3.6.1	Búsqueda por localización aleatoria del extremo de una función de un código variable	175
3.6.2	Búsqueda por Exploración Aleatoria del Extremo de una Función de Códigos Variables	189
3.6.3	Búsqueda por Vectores Direccionales	207
	Conclusiones	216
	Conclusiones generales	217
	Recomendaciones	218
	Bibliografía	219

Resumen

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

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

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

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

En el presente trabajo se presentan los fundamentos de una metodología, elaborada por el autor, que permite analizar una amplia variedad de clases de problemas (tareas) de ingeniería como tareas de preparación y toma de decisiones bajo criterios múltiples y métodos de optimización asociados a ella. A partir del análisis se realiza la síntesis del sistema. Se da un modelo general de la preparación y toma de decisiones y se estudia el vínculo existente entre la estructura del modelo matemático de preparación y toma de decisiones con la estructura de descomposición de la tarea correspondiente, coincidente con las estructuras más difundidas en las organizaciones. La síntesis del sistema se presenta, para las estructuras disperso conciliada y jerárquica participativa en variables discretas, como un esquema consistente en la generación de opciones de decisión por los diferentes componentes resultantes de la

descomposición y la selección posterior de la mejor combinación de opciones para todo el sistema. Se establece el vínculo de los resultados obtenidos con la teoría general de sistemas, los métodos del análisis multicriterial, las técnicas de optimización, simulación y representación gráfica de soluciones. Se presentan los métodos de Selección de Propuestas y de Integración de Variables concebidos para la solución de la etapa de síntesis del sistema de preparación y toma de decisiones. Los resultados teóricos se ejemplifican con investigaciones de aplicación realizadas con la participación directa del autor.

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

- Deducción de la correspondencia existente entre las estructuras de los modelos matemáticos de los sistemas y las estructuras de preparación y toma de decisiones más adecuadas para su solución. Estas últimas se obtienen como consecuencia del esquema de descomposición y de solución, por partes, de la tarea original de toma de decisiones.
- Formulación de principios de descomposición de las tareas de toma de decisiones en objetos complejos, enfocados a las tareas propias de la ingeniería. La aplicación práctica de estos principios facilita el estudio del sistema de mayor envergadura, del que forma parte el estudiado, la determinación de las variables de enlace entre las tareas y su descomposición en subtareas interrelacionadas.
- Adición de un principio adicional a los conocidos como principios del enfoque cibernético, los que son utilizados, con posterioridad, en la deducción de la metodología propuesta de análisis de sistemas de preparación y toma de decisiones de ingeniería. Como salida del análisis se obtienen los modelos detallados de toma de decisiones de la tarea estudiada, los procedimientos de cálculo asociados y los complementarios gráficos y de simulación necesarios en el completamiento de la información requerida por el eventual decisor para buscar soluciones que satisfagan su sistema completo de preferencias.
- Desarrollo de metodología de síntesis del sistema de preparación y toma de decisiones, la que incluye:

- Herramientas para la preparación de decisiones, es decir, propias de la generación de opciones próximas al mejor compromiso entre los indicadores de eficiencia para cada elemento del sistema resultante de la descomposición, incluyendo una metodología concreta de generación de estas opciones.
- Herramientas para la toma de decisiones, es decir, propias de la conciliación de decisiones entre los elementos del sistema. Se deduce la *tarea de selección de propuestas bajo criterios múltiples*, el método de optimización asociado a esta tarea y su generalización correspondiente a la de toma de decisiones en estructuras jerárquicas participativas y de los algoritmos necesarios en el cálculo de las evaluaciones de las propuestas y de las pérdidas sistémicas de acuerdo con el *programa de Tchebycheff*.
- Método general de *Integración de Variables*, como herramienta de la generación y selección de opciones de solución. Este método generaliza, entre otros, al método de Selección de Propuestas y a los Algoritmos Genéticos. De este método potencialmente se puede desarrollar un número prácticamente ilimitado de algoritmos de optimización. Se han desarrollado, entre otros, el algoritmo exacto de selección de propuestas y los heurísticos Localización Aleatoria del Extremo de una Función de un Código Variable y Exploración Aleatoria del Extremo de una Función de un Código Variable. Se estudian esquemas de optimización discreta, su aplicación a tareas del diseño y la manufactura y su comparación con los Algoritmos Genéticos.

El autor ha participado en no menos de 20 temas de investigación aplicada, concluidos exitosamente, en los que se aplican los resultados de investigación básica mencionados. Algunos de estos resultados se reflejan en las aplicaciones expuestas en calidad de ejemplos. Estas investigaciones tienen relación con problemas de las ingenierías mecánica, metalúrgica, hidráulica, química, eléctrica e industrial. La mayoría de ellos han culminado con la defensa de Tesis de Doctorado tutoradas por el autor.

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

Entre los colaboradores principales que tuvieron y aún tienen una participación significativa en la realización de las investigaciones de aplicación que avalan los resultados teóricos se encuentran 15 doctorantes, ya defendidos exitosamente y otros 2 próximos a defenderse próximamente así como un gran número de Tesis de Maestría y de Grado cuyos trabajos están reflejados en alguna medida en la bibliografía referenciada.

INTRODUCCIÓN

Entre los conceptos que se han puesto de moda en los últimos decenios, el *desistema* se encuentra en los primeros lugares. Este concepto ha invadido todos los campos de la ciencia y penetrado en el pensamiento, el habla popular y los medios de comunicación. El razonamiento en términos de sistemas desempeña un papel dominante en muy variados campos, desde los hospitales, el medio ambiente, las empresas industriales y los armamentos hasta temas reservados a la ciencia pura. Se le dedican innumerables publicaciones, conferencias, simposios y cursos. En años recientes han aparecido profesiones y ocupaciones, desconocidas hasta hace poco, que llevan nombres tales como proyecto de sistemas, análisis de sistemas, ingeniería de sistemas, sistemas de ingeniería y otros. Este concepto ha invadido también las diferentes áreas de la ingeniería en su integración entre sí y con las ciencias sociales, políticas, ambientales, etc., entre las disciplinas de cada área y entre los tópicos de cada disciplina.

Las raíces de este proceso son complejas. La ingeniería ha transitado un largo camino desde las construcciones civiles de la antigüedad, pasando por la solución a los problemas fundamentales que permitieron la liberación de grandes cantidades de energía en las máquinas de vapor o eléctricas, propias del proceso de mecanización, que caracterizaron la Revolución Industrial, hasta el actual desarrollo de medios de cómputo y su integración a las telecomunicaciones, los que permiten automatizar todo tipo de procesos, incluyendo los de toma de decisiones. Han aparecido máquinas que se autocontrolan, desde el termostato doméstico hasta los proyectiles teledirigidos de la actualidad.

El hombre concibe la tecnología, cada día más, ya no en términos de máquinas sueltas, sino de sistemas. Una máquina de vapor, un automóvil o un receptor de radio, aunque constituyen también sistemas de componentes individuales que interactúan entre sí, se pueden enfocar como competencia del ingeniero de la correspondiente especialidad. Pero cuando se trata de proyectiles o de vehículos espaciales, hay que armarlos usando

componentes que proceden de áreas diferentes de la ingeniería: mecánica, electrónica, química y otras; empiezan a intervenir relaciones entre hombres y máquinas, y surgen innumerables problemas financieros, económicos, ambientales, sociales y políticos nuevos. Problemas tales como el tráfico aéreo o el diseño de automóviles tienen que analizarse no solo en función del número de vehículos en funcionamiento, sino como sistemas que hay que planear o disponer. Así, surgen innumerables problemas en la producción, el comercio, los armamentos, la energética, el medio ambiente vinculados todos estrechamente entre sí, los que deben ser solucionados como sistemas.

Se hizo necesario el enfoque sistémico. Dado un determinado objetivo, encontrar los medios para alcanzarlo requiere que el especialista en sistemas (o el equipo de especialistas) considere soluciones posibles y elija alguna entre las que prometen desempeños próximos a los mejores posibles. No solo las obras de la ingeniería, su fabricación, organización de funcionamiento, etc. son complejas, es decir, están compuestas por múltiples elementos constitutivos, los que son también sistemas, sino que el concepto mismo de desempeño es también complejo y puede ser evaluado por varios indicadores (incluso pueden ser muchos); su comprensión varía con las personas u otros sistemas que deben decidir y del momento en que se tomen las decisiones.

Por otra parte, en el mundo de hoy, de la calidad de construcción y organización de las pirámides de sistemas de preparación y toma de decisiones, asociadas a las pirámides de los objetos naturales y artificiales depende ya la sobrevivencia misma del ser humano, dados los peligros derivados de la acumulación del armamento nuclear, el acelerado deterioro del ecosistema, del calentamiento global y otros. O bien el ser humano es capaz de construir pirámides de sistemas que le permitan tomar las decisiones de todo tipo, desde las más elementales hasta las que atañen directamente a naciones enteras y la humanidad en su conjunto, o bien los actuales peligros latentes para la sobrevivencia humana terminarán por hacer desaparecer nuestra especie.

La conciliación de decisiones incluye desde los más pequeños sistemas ingenieros hasta los que atañen a todas las naciones. A todos los niveles de esta conciliación se requiere tomar en consideración factores sociales, políticos, éticos y de toda índole. Independientemente de la diversa terminología existente en la bibliografía, este autor entiende como sistemas de

ingeniería a los sistemas para hacer ingeniería, para los que sin duda se requiere de la aplicación más completa de los logros de la ingeniería de sistemas, entendida esta última como la ingeniería de hacer sistemas.

De esta manera se define como *problema de investigación* el insuficiente desarrollo de las metodologías de análisis y síntesis de sistemas de ingeniería y los métodos asociados para enfrentar los problemas más actuales de la humanidad.

Surge así la *necesidad* de desarrollar una metodología de análisis y síntesis de sistemas de ingeniería que sirva de punto de partida para la solución del problema y de completar el arsenal de métodos existentes con los requeridos para esta metodología.

De tal forma, el *objeto* del presente trabajo de investigación está constituido por el análisis y la síntesis de sistemas de ingeniería y el desarrollo de los métodos matemáticos asociados.

El *campo de acción* está dado por el desarrollo y la aplicación de una metodología de análisis y síntesis de sistemas de ingeniería y el desarrollo de los métodos matemáticos asociados.

La *hipótesis* de la presente investigación consiste en que si se desarrolla una metodología de análisis y síntesis de sistemas de ingeniería y métodos matemáticos asociados para la conciliación de decisiones entre los diferentes sistemas-elementos de otros sistemas de mayor envergadura, entonces se puede lograr un avance considerable en la tarea de construcción de pirámides de sistemas de toma de decisiones asociadas a las correspondientes pirámides de objetos reales o virtuales enfrentadas por las ingenierías.

El *objetivo general* consiste en el desarrollo de una metodología de análisis y síntesis de sistemas de ingeniería y de métodos matemáticos requeridos por ella y su aplicación a un número adecuado de investigaciones de aplicación a tareas propias de diferentes áreas de la Ingeniería que permitan avalar su aplicabilidad al menos a un número importante de problemas.

Para dar respuesta al objetivo general se establecieron los *objetivos específicos* siguientes:

1. Estudiar la evolución de la ciencia en las áreas propias de los sistemas en general y de las metodologías vinculadas a su análisis y síntesis.

2. Elaborar los fundamentos científico-técnicos de una metodología de análisis y síntesis de sistemas de ingeniería que facilite la integración intra e interdisciplinaria de las ingenierías entre sí y con otras esferas de la actividad humana.
3. Elaborar los métodos matemáticos requeridos que permitan completar los ya existentes y que satisfagan las necesidades de la metodología de análisis y síntesis desarrollada.
4. Validar los resultados teóricos obtenidos con investigaciones de aplicación en un número suficientemente numeroso y diverso que permitan juzgar objetivamente sobre la validez de la metodología y métodos elaborados.

Constituyen *novedades científicas* del trabajo las siguientes:

1. Un principio adicional, que completa los denominados principios del enfoque cibernético, propuestos por Norbert Wiener.
2. La metodología elaborada de análisis y síntesis de sistemas de ingeniería
3. El método general Integración de Variables y varios de sus algoritmos concretos, incluido el asociado al método exacto de optimización discreta Selección de Propuestas.

Los *beneficios* obtenidos de la presente investigación están dados por:

1. La realización de investigaciones de aplicación que han dado como resultado la concepción, el diseño y la ejecución de numerosos sistemas computacionales y soluciones de ingeniería utilizando los resultados de investigación básica obtenidos.
2. La tutoría de 14 temas de doctorado ya defendidos en los que se aplican los resultados de investigación básicos obtenidos.
3. La solución práctica en la industria de un número importante de problemas prácticos en los que se aplican los resultados de investigación básica obtenidos.

Para la realización del presente trabajo han sido empleados, entre otros, los métodos siguientes:

Método histórico-lógico: Durante el estudio del estado del arte, como marco teórico referencial y su relación con otras ciencias.

Método de inducción - deducción: A partir del análisis de la información recopilada se realiza

una valoración del estado de las ciencias vinculadas con los sistemas en general y con los sistemas de ingeniería en particular.

Método de análisis y síntesis: Para deducir la metodología de análisis y síntesis de sistemas de ingeniería y desarrollar los métodos matemáticos asociados.

Breve descripción de la investigación

El capítulo 1 trata sobre el estado alcanzado por las ciencias vinculadas a los sistemas, en general, y a los sistemas de ingeniería, en particular.

En el capítulo 2 se deduce la metodología propuesta de análisis de sistemas de ingeniería, a partir de la generalización de los logros de las teorías, previamente existentes, vinculadas a los sistemas y a su completamiento con otros deducidos por el propio autor. Los resultados se ejemplifican con investigaciones de aplicación concretas solucionadas con la participación directa del autor.

El capítulo 3 se dedica a la síntesis de sistemas de ingeniería a partir de su análisis, el método de Selección de Propuestas para la solución de determinada clase de tareas de síntesis y el método general de Integración de Variables para el caso más general, así como algunos algoritmos particulares del método desarrollado.

Los resultados teóricos se ejemplifican con soluciones a investigaciones de aplicación concretas desarrolladas con la participación directa del autor.

Resulta claro que el tema no queda agotado; solo se presentan resultados articulados de investigación básica que sirven de partida al desarrollo ulterior del tema, los que han sido avalados con numerosas investigaciones de aplicación en las que ellas se confirman.

Cronograma de realización e interrelación de las investigaciones asociadas

1. Años 1972-1973: primeras ideas y aplicaciones sobre optimización bajo criterios múltiples.

Planeación de producción de talleres de laminación que trabajan en paralelo. Se desarrollaron dos modelos matemáticos con los objetivos de minimizar costos el primero y maximizar producción el segundo. La planeación se desarrollaba con ayuda

de ambos modelos buscando soluciones de compromiso en estrecha colaboración con la dirección de la producción de Antillana de Acero en aquella época. El enfoque utilizado era novedoso pues no existía aún la teoría de la optimización bajo criterios múltiples. Se publicó el artículo *Automatización de los Procesos de Toma de Decisiones* en la Revista Tecnológica [15]. La aplicación de estos modelos aportó un efecto económico importante. En esos mismos años se desarrollaron modelos de secuenciación de la producción en los talleres de laminación, los que sirvieron de punto de partida al tema de doctorado desarrollado posteriormente. Todo esto se hizo en la única máquina computadora que existía en el país: la Elliot de JUCEPLAN.

2. Años 1973-1975: primeras ideas y aplicaciones sobre heurísticas.

Elaboración de gráficos calendarios de trabajo de los hornos Siemens Martin de Antillana de Acero. Se utilizó en la planeación de producción de Antillana, a partir de una heurística propia en aquella época, en la que no se utilizaban aún las heurísticas, y se publicó como investigación de aplicación, en la revista Investigación Operacional [14]. El método desarrollado se corresponde con el que apareció posteriormente en la bibliografía como Búsqueda Local Iterativa [141,156].

Elaboración de gráficos de mantenimiento preventivo planificado. Se utilizó en la planeación del mantenimiento del Taller de Medición y Control de Antillana de Acero, a partir de la misma heurística del trabajo anterior. Se publicó en la revista Investigación Operacional [13].

3. Años 1974-1977: asimilación práctica de los sistemas de control y primeras ideas sobre operación de procesos.

Se dedicaron a los sistemas automáticos de control en los talleres de Antillana siendo J' Técnico del Taller de Medición y Control. No solo se asimilaron los sistemas de procedencia soviética, sino que se desarrollaron otros muchos. Como resultado de esta línea de trabajo tan solo se publicó un artículo dedicado a los Sistemas de Televisión en Circuito Cerrado al servicio del control de producción, único trabajo con relativa novedad científica [19]. Esta experiencia resultó de utilidad para el estudio posterior de los sistemas de operación de procesos tecnológicos, como parte de la estructura general de la dirección empresarial.

4. Años 1977-1979: primeras ideas sobre análisis de sistemas y aplicaciones prácticas.
Como parte de un colectivo de autores, se desarrollaron sistemas de información de control de producción, de entregas de producción terminada, control de movimientos de materiales y salarios, control de fuerza de trabajo y otros. No se publicaron, pues este autor no le encontraba aún novedad científica. No obstante, permitían elevar la cultura en los procesos organizativos y de control empresarial y dieron lugar a las primeras ideas sobre Análisis de Sistemas basadas en los principios del Enfoque Cibernético de Norbert Wiener, las que se aplicaron a los sistemas de gestión empresarial, sin conciencia que se estaba desarrollando una nueva metodología de análisis de sistemas.
5. Años 1979-1982: Periodo de realización de Tesis de Doctorado en la URSS, desarrollo del método de Selección de Propuesta, de esquema asociado de descomposición de tareas de optimización y de conciliación posterior de soluciones entre subtareas.
 - *Método de Selección de Propuesta.* Se desarrolló en el marco de la Tesis de Doctorado. Publicado en el libro *Selección de Propuestas* [10], el que recibió premio de la crítica al libro científico técnico de ese año ([Aval 18](#)). Se ha aplicado en la solución de los temas:
Optimización de secuencias de trabajo de talleres de laminación (tarea que dio origen al método, libro [Selección de Propuestas pag. 111-129](#))
Conciliación de secuencias de objetos productivos de determinada clase (tarea que dio origen al método, libro [Selección de Propuestas pag. 100-109](#))
Generación de tecnologías óptimas de maquinado en tornos con CNC (como parte de tema de doctorado tutorado por el aspirante, se describe más adelante) [30]
Diseño óptimo de redes de ventilación en edificaciones civiles (como parte de tema de doctorado tutorado por el aspirante, se describe más adelante) [[58](#), [59](#), [N3](#)].
6. Años 1983-1999: desarrollo y aplicación práctica de la metodología de análisis y síntesis de sistemas de ingeniería, denominado entonces “Enfoque Integrador para la concepción y el diseño de sistemas de ingeniería” en las diferentes investigaciones de aplicación, los principales resultados se recogen en el libro *Sistemas de Ingeniería* [11]

- *Sistema Automatizado para el Cálculo y la Optimización del Calentamiento del Metal en Hornos Metódicos.* El sistema calcula los indicadores de eficiencia de un régimen térmico de un horno dado como información de entrada o bien determina el régimen térmico de mínimo consumo energético. Su 1ª versión data de 1985. Su última versión se desarrolló en el año 2007. Se emplea habitualmente por algunos ingenieros de la Empresa Antillana de Acero y en trabajos docentes. Libro Sistemas de Ingeniería, [ejemplo 5.2, pag. 182](#)
- *Sistema Automatizado para el Cálculo y la Optimización de Calibraciones de trenes de laminación de perfiles.* El sistema genera opciones de calibración de los trenes de laminación de esa Empresa, de forma de tal de estabilizar “grado de dificultad por pases” o bien calcular los indicadores de eficiencia para una calibración cualquiera dada como información de entrada. Con ayuda del sistema, entre otras aplicaciones, se modificó completamente la calibración de un castillo “trio” con un resultado económico no inferior a 300 000 USD. La primera versión del sistema se desarrolló en el año 1985 y posteriormente se han desarrollado otras versiones. Libro Sistemas de Ingeniería, ejemplos 5.1 [pag. 178](#) y 11.3, [pag. 412](#).
- *Sistema Automatizado de Operación y Control para dos hornos metódicos de calentamiento del Taller 720 de Antillana de Acero.* El sistema establecía, en tiempo real, la temperatura por zonas correspondientes al mínimo consumo energético total en el horno y en el tren de laminación, cumplía, además tareas de señalización y emitía reportes de control de producción y registraba todas las mediciones en las últimas 8, 16 o 24 hs. Trabajó con éxito en el periodo 1986 – 1990, concluyendo su aplicación al remodelarse completamente el taller. En el marco de este trabajo se introdujo el concepto de Reglas de Conducta para la operación de procesos, las que en el caso particular de este sistema se elaboraban solucionando fuera de líneas las tarea de optimización correspondientes de calentamiento y deformación del metal con ayuda de los dos sistemas anteriores. Se publicaron los resultados en [\[16\]](#) y en el libro Sistemas de Ingeniería, ejemplo [12.3, pag. 464](#)
- *Sistema Automatizado de Destino del Metal, para la determinación del destino racional de las hornadas producidas en Antillana de Acero.* El sistema entrega una

serie ordenada, de acuerdo a la conveniencia económica de la Empresa, de opciones de destino de las hornadas producidas. El personal de operación selecciona la opción más adecuada de acuerdo a la situación operativa que se presente. Funciona desde el año 1987 hasta la fecha (Aval 17); actualmente se está perfeccionando en el marco de una Tesis de Doctorado. Los resultados se publicaron en Libro Sistemas de Ingeniería, [ejemplo 11.2, pag. 406](#).

- *Sistema Automatizado para el Cálculo y la Optimización de Paredes Refractarias y Aislantes.* El sistema calcula los indicadores térmicos de cualquier pared refractaria o aislante plana, cilíndrica o esférica y genera opciones de paredes (del mismo tipo) buscando un compromiso entre costo, espesor total y pérdidas energéticas a través de ella. La 1ra versión se desarrolló en el 1988 y posteriormente se ha ido perfeccionando. Se emplea habitualmente por algunos ingenieros de esa y otras empresas y en trabajos docentes. La última y más completa versión se desarrolló en el año 2007. Libro Sistemas de Ingeniería, [ejemplo 7.4, pag. 251](#). Se ha generalizado al tema del recubrimiento óptimo de instalaciones de alta temperatura, reflejado en las Tesis de Maestría [157], [193], [226], y en una Tesis de Doctorado en ejecución, con tres publicaciones disponibles [[159](#), [N1](#), [N2](#)].
- *Sistema CAD para el diseño óptimo de herramientas de forja en estampas.* Se ha aplicado en diseños realizados para la Fábrica de Implementos Agrícolas “26 de Julio” de la ciudad de Holguín. Genera diseños de herramientas de forja en estampas, para cada aplicación, próximas a la solución que minimiza una función de compromiso entre el costo, la fuerza empleada y la durabilidad estimada de la herramienta [[22](#), [208](#)]. El trabajo se utiliza, en esta concepción, a partir de 1996. Realizado en el marco de una Tesis de doctorado ([Ver Aval 1](#)).
- *Soldadura de metales por explosión.* A partir de toda una experiencia de un especialista en esta tecnología, incluyendo innumerables aplicaciones prácticas, se desarrolló toda la modelación matemática y el procedimiento de optimización que permitieron elaborar un software para generar la tecnología que asegura, con una probabilidad de confianza dada, el cumplimiento del límite de resistencia al cizallamiento establecida por el cliente, minimizando la cantidad de explosivo a

emplear seleccionado un grupo de explosivos disponibles [54]. Hasta el momento se han incluido en el software los bimetales: acero al carbono – titanio y acero al carbono – aleación de aluminio estaño (para la producción de cojinetes de deslizamiento). Fue tutor del trabajo, aportó el enfoque y los métodos a emplear. Realizado en el marco de una Tesis de doctorado ([Ver Aval 2](#)). En su actual concepción se aplica desde 1997. Libro *Sistemas de Ingeniería*, [Ejemplo 5.3, pag. 182](#).

- *Lixiviación óptima de minerales piríticos*. A partir del desarrollo de una nueva tecnología para aprovechar de forma integral un yacimiento de minerales piríticos (en la localidad de Santa Lucía, Pinar del Río, Cuba, se realizó toda la modelación matemática, el procedimiento de optimización y el software para definir la Inversión a realizar en una planta ya existente para el logro de la máxima ganancia del eventual inversionista [55]. Fue tutor del trabajo, aportó el enfoque y los métodos a emplear. Año 1998. Libro *Sistemas de Ingeniería*, [ejemplo 7.2, pag. 230](#). Realizado en el marco de una Tesis de doctorado ([Ver Aval 3](#)).
- *Sistema CAPP para la generación de tecnologías óptimas de maquinado en tornos con CNC*. A partir de la configuración de la materia prima y del diseño de la pieza a fabricar, de las máquinas herramientas disponibles, de sus características y del inventario de herramientas de corte disponibles el sistema genera una serie de opciones ordenadas de posibles tecnologías, de acuerdo al mejor compromiso posible entre el costo, la energía consumida y el tiempo necesario para el maquinado. Una vez seleccionada por el usuario la opción adecuada, genera el código CNC para su implementación en el control de la máquina[30]. Fue tutor del trabajo, aportó el enfoque general para la preparación y toma de decisiones y una parte de los métodos a emplear. Se ha aplicado desde el año 1999 en la Fábrica de Combinadas Cañeras KTP de la ciudad de Holguín. Libro [Sistemas de Ingeniería, ejemplo 10.4, pag. 366](#). Realizado en el marco de una Tesis de doctorado (Ver Aval 4).
- *Sistema CAD - CAPP para el diseño óptimo de redes de ventilación en edificaciones civiles*. A partir de la configuración de la edificación a ventilar y de los requisitos de

ventilación de cada local, el sistema genera series de opciones de redes de ventilación de la edificación que aportan valores próximos al mejor compromiso entre el costo de la red, el ruido ambiental y las pérdidas energéticas de la red [58, 59, N3]. Las soluciones incluyen trayectoria, accesorios que deben utilizarse en cada punto de la trayectoria, etc. Fue tutor del trabajo, aportó el enfoque y una parte de los métodos a emplear. Se ha aplicado, en su actual concepción, desde el año 1999 en la Empresa Frio Clima de la ciudad de Holguín. En su concepción anterior a su intervención, el sistema se había utilizado en una Empresa Suiza de Proyectos de este tipo. El Sistema incluye módulos para el despliegado de piezas no estándar, la distribución de piezas en la chapa, y la elaboración del código CNC para el corte del metal. Libro [Sistemas de Ingeniería, ejemplo 11.6, pag. 418](#). Realizado en el marco de una Tesis de doctorado ([Ver Aval 5](#)).

- *Sistema CAD para el diseño óptimo de troqueles de corte y punzonado simples y progresivos.* A partir de la configuración de la pieza a producir, el material y espesor de la pieza, el sistema genera series de opciones de diseños de troqueles y correspondientes distribuciones de las piezas en la chapa próximos al mejor compromiso entre el costo del troquel, el aprovechamiento de la chapa, la fuerza de corte, la precisión, la productividad y la durabilidad del troquel [20, 22, 221]. Fue tutor del trabajo, aportó el enfoque y una parte de los métodos a emplear. Se ha aplicado, eventualmente, en un combinado mecánico militar en la ciudad de Camaguey y en la Fábrica de Herramientas “Herramix” en la Ciudad de La Habana. Ejemplo 11.4, [pag. 413 del libro Sistemas de Ingeniería](#). Realizado en el marco de una Tesis de doctorado ([Ver Aval 6](#)).

7. Años 2000-2017: Aplicación ampliada y perfeccionamiento de la metodología de Análisis y Síntesis de Sistemas de Ingeniería y de desarrollo del método de Integración de Variables. Los resultados teóricos principales se publicaron en la monografía “Análisis y Síntesis de Sistemas de Ingeniería” [12]

- Formulación de la *Tarea Generalizada de Selección de Propuestas* y elaboración de método general de solución, denominado método de Integración de Variables [12, 17, 18]. Se desarrollaron los siguientes algoritmos del método: Localización

Aleatoria del Extremo de una Función de un Código Variable, Exploración Aleatoria del Extremo de una Función de Códigos Variables y Búsqueda por Vectores Direccionales. La comparación de los primeros dos algoritmos con los algoritmos genéticos en las tareas de diseño óptimo de troqueles de corte y punzonado simples y progresivos [12] y con la de diseño del recubrimiento refractorio de cazuelas metalúrgicas [158, N1, N2] aportaron resultados semejantes con un número menor de iteraciones y con menor tiempo de ejecución. La Localización Aleatoria del Extremo de una Función de un Código Variable se aplicó con éxito también a la Compensación de potencia reactiva en redes de suministro eléctrico industriales [99, 100]. La Búsqueda por Vectores Direccionales resultó muy efectiva en la solución de la tarea del Máximo Clique Ponderado [227].

- *Diseño óptimo multiobjetivo de motores hidráulicos de alto par adecuados a la capacidad tecnológica disponible en Cuba.* Se trata de toda una metodología para el diseño orientado a la Ingeniería Inversa Incremental. Se aplicó al diseño de prototipos virtuales de motores hidráulicos de alto par, para un tipo de motor conceptualmente nuevo. Realizado en el marco de una Tesis de doctorado (Ver [Aval 7](#)).
- *Utilización de mineral de Mn en sustitución de ferroaleaciones al Mn en hornos de fundición por arco eléctrico.* El Enfoque Integrador se utiliza en este caso como metodología de investigación científica para la solución de un problema tecnológico. Se elaboró además un software de ayuda a la dosificación de hornadas en hornos de fundición por arco eléctrico. Los principales resultados se publicaron en [180, 181]. Se realizaron satisfactorias pruebas industriales (ver aval del Centro de Investigaciones siderúrgicas). Realizado en el marco de una Tesis de doctorado (Ver [Aval 8](#)).
- *Compensación, bajo criterios múltiples, de potencia reactiva en redes de suministro eléctrico industriales.* Se desarrolló la metodología de solución del problema de conciliación de indicadores de calidad en los diferentes nodos de redes de suministro eléctrico industriales y se han aplicado recomendaciones en la Empresa Niquelífera Ernesto Che Guevara. Los principales resultados se publicaron en [99,

[100](#)]. Se realizaron satisfactoria pruebas industriales. Realizado en el marco de una Tesis de doctorado (Ver [Aval 9](#)).

- *Diseño Óptimo, bajo Criterios Técnicos y Económicos de Redes Hidráulicas Cerradas*. Autor: MSc. Jesús Hechavarria Hernández, Universidad de Holguín. Tribunal de Energética, Diciembre 2008. Los resultados teóricos de esta Tesis se implementaron en un Sistema Automatizado compuesto de varios software de aplicación, todos registrados en el CENDA, con ayuda de los cuales se han rediseñado actualmente varias redes de acueducto del país, y redes de distribución de agua en numerosas empresas. Algunos resultados se publicaron en [\[111, 112, 113\]](#) y en el capítulo *Optimización del diseño de redes de distribución bajo criterios múltiples* del libro *Planificación, proyecto y operación de sistemas de abastecimiento de agua* publicado por la Universidad de Valencia. Realizado en el marco de una Tesis de doctorado (Ver [Aval 10](#))
- *Modelación de la operación de ruedas desecantes razón 3:1 con silica gel en climas tropicales*. Autor: Ing. Tania Carbonell Morales, CUJAE, Tribunal de Energética, Diciembre de 2008. Los resultados primarios los realizó la autora con anterioridad de la tutoría. Se aplicaron los logros del autor de esta Tesis en el área de la operación de procesos, en particular el concepto de reglas de conducta. Realizado en el marco de una Tesis de doctorado ([Ver Aval 11](#))
- *Conciliación, bajo criterios múltiples, de secuencias de trabajo de talleres de producción de piezas maquinadas*. Autor: MSc. Alberto Antonio Fiol Zulueta, CUJAE, Tribunal: Ingeniería Mecánica. Enero 2009. La tutoría se compartió con el 2do. Tutor Dr. Adriano da Silva Carvalho, de la Universidad de Porto, Portugal. Este trabajo fue validado en una de las Empresas de las FAR el método de Integración de Variables hibridizado con otra metaheurística. Los principales resultados se publicaron en [\[91, 92\]](#). Realizado en el marco de una Tesis de doctorado (Ver [Aval 12](#)).
- Desarrollo del Algoritmo del método de Integración de Variables “Exploración Aleatoria de Códigos Variables”, aplicado a la Tesis Doctoral: Distribución y corte de Piezas Irregulares Planas con Anidamiento Bidimensional. Autor: A.M. Lastres

Aleaga, Universidad de Holguín, Tutores: A. Cordovés García, J. Arzola Ruiz. Los principales resultados se publicaron en los artículos [[136](#), [137](#)]. Realizado en el marco de una Tesis de doctorado (Ver [Aval 13](#))

- Determinación de las Características Técnicas Básicas para el Diseño de los Conjuntos Tractivos del Transporte de la Cosecha Cañera, adecuados a las condiciones propias de cada Complejo Agroindustrial. Algunos resultados se reflejaron en [[5](#), [6](#)], se obtuvieron numerosas patentes y se realizaron numerosas aplicaciones parciales. Realizado en el marco de una Tesis de doctorado (Ver [Aval 14](#))
- Optimización multiobjetivo de los parámetros que intervienen en los procesos de doblado de tubos cilíndricos metálicos por el método de arrastre. Trabajo de doctorado de un venezolano, aplicado por él mismo en su propia empresa. Los resultados asociados a la metodología de Análisis y Síntesis se reflejan en [[117](#), [118](#)]. Realizado en el marco de una Tesis de doctorado (Ver [Aval 15](#)).
- Desarrollo del algoritmo del método de Integración de Variables “Búsqueda por vectores direccionales” el que se aplicó con éxito al trabajo investigativo “Un algoritmo del método de integración de variables para la solución del problema máximo clique ponderado” [[227](#)].
- Modelado para la operación de instalaciones radiales de vaciado continuo de aceros de sección cuadrada. Trabajo de doctorado predefendido y en proceso de defensa, aplicado parcialmente en Antillana de Acero. Antecedentes en el libro [Sistemas de Ingeniería, ejemplo 12.2, pag. 462](#): publicado parcialmente en [[79](#), [80](#)](Ver [Aval 16](#)).
- Generación automática de mallas triangulares con control de error, para el desarrollo de aplicaciones de diseño gráfico [[N5](#)], lo que se requiere tanto para las etapas del análisis y la síntesis de algunos sistemas.
- Elaboración de modelos posinomiales de ajuste de datos [[N6](#)], herramienta con amplias posibilidades de aplicación en la etapa de análisis del sistema.

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES DEL PROBLEMA DEL ANÁLISIS Y LA SÍNTESIS DE SISTEMAS DE INGENIERÍA

Son muchas las áreas de la ciencia y la técnica relacionadas directamente con los sistemas en general y los sistemas de ingeniería en particular. En primer lugar, las ciencias que estudian los sistemas en general tienen que ser tomadas en consideración, pues se trata de la teoría de sistemas, la cibernética y otras ciencias vinculadas. Entre ellas se destacan la ingeniería de sistemas, el análisis de sistemas informáticos, la automatización de procesos de todo tipo, incluyendo los comunes a diferentes áreas de las ingenierías: la planeación de la producción y los servicios, el diseño, la fabricación, la operación y el control de procesos, etcétera.

Por otra parte, para preparar y/o tomar decisiones se requiere necesariamente crear modelos que describan su desempeño y/o la representación geométrica de determinados objetos. Estos modelos pueden tener carácter descriptivo del objeto o proceso estudiado, o bien representar el proceso de preparación y toma de decisiones. En el primer caso se trata de modelos de simulación y en el segundo de modelos de optimización con uno o múltiples objetivos para la generación o selección de opciones de decisión. En dependencia de la designación del sistema varía la precisión de su descripción: mientras menor sea la envergadura del objeto estudiado mayor tiene que ser la precisión de su descripción. Según crece la envergadura del sistema se utilizan conjuntos de modelos que aproximan la descripción

del desempeño de sus elementos constitutivos con ayuda de modelos de aproximación, los que a su vez están constituidos por funciones de aproximación.

1.1 Teoría de sistemas y cibernética

Hasta el año 1928 el pensamiento científico se basaba en dos supuestos: un sistema puede ser descompuesto en sus componentes individuales de forma de analizar cada uno de ellos como un objeto independiente, y los componentes y sus propiedades pueden ser adicionados de manera lineal para describir el objeto total. En 1928 von Bertalanffy demostró que ambos supuestos son erróneos y que, por el contrario, el sistema tiene propiedades adicionales a la simple unión de sus elementos y se caracteriza por las interacciones no lineales entre ellos[231].

Los primeros teóricos sistémicos trataron de desarrollar una teoría general de sistemas que pudiera explicar los sistemas en todas las esferas de la actividad humana. El término se adoptó a partir del trabajo básico de Bertalanffy, *Teoría General de Sistemas*[231], elaborado sobre la base de principios adoptados a partir de la ontología, filosofía de las ciencias, biología e ingeniería y extendida después a otros campos, incluidos la geografía, medicina, teoría organizacional, gestión empresarial y economía, entre otros. Su objetivo era sustituir las bases mecanicistas de la ciencia por un planteamiento holístico.

El clima global, las economías, las colonias de hormigas y los sistemas inmunológicos constituyen sistemas que tienen conductas con múltiples propiedades, las cuales no son fácilmente predecibles a partir de las correspondientes a las partes, denominadas los *componentes*, *elementos* o *agentes*, y las interacciones entre ellos.

Las propiedades derivadas de las interacciones entre los elementos del sistema se llaman *efectos emergentes*. Los efectos emergentes se manifiestan en el clima a corto y largo plazo, los precios en los mercados, la recolección de cosechas, las construcciones de las colonias de hormigas y la habilidad de los sistemas inmunológicos de distinguirse a *sí mismos* de *los otros*. Otro ejemplo importante de sistema es un ecosistema. Dependiendo del punto de vista, se puede considerar por igual organismos individuales o especies enteras, o ser elementos de los que se construye un ecosistema. Las interacciones entre estos elementos toman una amplia variedad de formas. Mucho interés se ha dedicado a las interacciones depredador-

presa y organismo-parásito. Estas interacciones son asimétricas, ambos elementos se involucran y desempeñan diferentes papeles.

Existen también interacciones simétricas, como la competencia entre elementos por recursos tales como comida o espacio. La competencia puede establecerse entre los miembros de las mismas especies o de especies distintas. Las competencias durante la búsqueda de pareja son internas de los miembros de una misma especie. Las relaciones sociales entre individuos o especies son otra forma de interacción simétrica, en este caso beneficiosas para ambos participantes[131].

Los sistemas mencionados son reales. Dada su estructura compleja y la existencia de propiedades emergentes, resultantes de interacciones esenciales entre sus elementos, las edificaciones, maquinarias, los modelos matemáticos y procedimientos computacionales de solución de múltiples tareas incluidos los requeridos para gobernar procesos tecnológicos, todo tipo de obras de arte, las instituciones, y otros resultados del pensamiento humano constituyen también sistemas, con la diferencia que en su etapa de concepción son sistemas abstractos o virtuales.

La cibernética surgió como la ciencia que estudia los procesos de dirección en su sentido más amplio y ha logrado un desarrollo considerable en el estudio de los problemas vinculados a la obtención, transmisión y tratamiento de la información en todo tipo de sistemas[220], por lo que se relaciona directamente con el concepto de sistema. Esta ciencia fue constituida por un grupo de científicos multidisciplinarios (matemáticos, ingenieros, neurocientíficos, científicos sociales), entre los cuales se encuentran Claude Shannon, John von Neumann, Gregory Bateson[183, 212, 213].

Heinz von Foerster y Norbert Wiener (quien creó el término cibernética), se unieron para investigar la representación matemática de los mecanismos cerebrales. La atención central recaía sobre los patrones de organización, pero mientras Wiener y Bateson se dedicaron a buscar el patrón común que está por detrás de los fenómenos vivos, describiéndolos holísticamente, Neumann se centraba en el control a través de la programación[83].

Se trató principalmente de crear modelos mecanicistas de sistemas vivos y algunos de sus aportes se derivan de comparar máquinas con seres vivos. La cibernética construyó marcos teóricos importantes en varias líneas de investigación, como la teoría de la información de

Shannon[212, 213] y los modelos de procesos neuronales en el cerebro de Ross Ashby[26-28]. Los modelos informáticos de cognición de Von Neumann son los predecesores de la moderna inteligencia artificial[183].

Una vez esclarecidos las ideas y conceptos claves vinculados a los sistemas, las investigaciones posteriores se dedicaron a los principios que rigen el comportamiento, la evolución y la autoorganización de los sistemas naturales, en el marco de las teorías de la complejidad.

Entre los aportes de Norbert Wiener se encuentran los llamados *principios del enfoque cibernético*[237], los que constituyen uno de los cimientos sobre los que se construye toda la moderna teoría de sistemas y los que se enuncian a continuación:

1. Los fenómenos del mundo real se contemplan por medio de la vinculación entre las acciones del medio externo y las características del estado del sistema. Las primeras se denominan entradas y las segundas, salidas del objeto. Parte de las entradas se consideran dirigidas y la otra parte son perturbaciones no dirigidas. La descripción formal entre las entradas y las salidas se denomina modelo matemático del objeto.
2. Las acciones dirigidas pueden seleccionarse de un conjunto determinado de variantes posibles. La tarea fundamental de la cibernética consiste en hallar el método de seleccionar las directivas que garanticen el cumplimiento de los requerimientos dados exteriormente al estado del sistema.
3. Las perturbaciones no son conocidas de antemano. Estas pueden ser en general indeterminadas, o bien dadas por sus características probabilísticas.
4. La dirección es un proceso dinámico y requiere la adopción de una secuencia de decisiones y el control de los parámetros de entrada y salida.

1.2 Teorías de la complejidad

A partir del trabajo de investigadores de diferentes áreas del pensamiento: filósofos, físicos, químicos, biólogos, médicos, informáticos, especialistas en gestión empresarial, etc., en las últimas décadas ha surgido toda una corriente de pensamiento científico que se agrupa bajo la denominación común de teorías de la complejidad. Estas se han conformado a partir de nuevas ideas y conceptos desarrollados en los campos científicos mencionados y

muchos otros que cuestionan un conjunto de premisas y nociones que orientaron hasta un pasado reciente la actividad de investigación científica, dando lugar a nuevas reflexiones sobre la definición de las leyes de la naturaleza[174,177], cuyo surgimiento está motivado por las contradicciones observadas entre las predicciones teóricas y los datos experimentales[133] y la condicionalidad mutua detectada entre aspectos de la realidad, tales como orden y desorden, equilibrio y desequilibrio, certidumbre e incertidumbre, determinismo y azar, linealidad y no linealidad, entre otros.

Algunos investigadores profundizan en el problema de la entropía versus el equilibrio del sistema, con la definición de los sistemas alejados del equilibrio y la teoría de las estructuras disipativas[184, 185, 195, 196, 197], la que aporta los conceptos de caos activo y pasivo; el primero está relacionado con el equilibrio del sistema y con la entropía negativa, que es la entropía existente cuando el sistema se desarrolla en intercambio con el medio; el segundo se relaciona con el concepto clásico de entropía, según el cual el sistema pierde orden hasta caer en el desorden.

Otros investigadores consideran que los grandes sistemas interactivos evolucionan de modo natural hacia un estado crítico. Si estos sistemas sufren perturbaciones cuando se encuentran en este estado, sus respuestas se describen exponencialmente. Un ejemplo de este comportamiento es el grano de arena que provoca una pequeña avalancha en un cúmulo de arena. Después siguen avalanchas de todo tipo: grandes, medianas y pequeñas. La complejidad se manifiesta en una transición de fases. La frontera del cambio es un punto crítico que corresponde a una tendencia del sistema complejo. La complejidad se halla justamente en el límite porque esta no existe solamente con el caos o con el orden, sino con los dos al mismo tiempo[48, 49, 145, 146]. La complejidad se origina en un punto crítico porque es donde hay más capacidad de crear, almacenar, procesar y organizar información. Por eso esta concepción es denominada *críticidad autoorganizada*[35]. En este punto el equilibrio del sistema es más inestable.

No linealidad. La no linealidad es una característica común a todo tipo de sistemas. En un sistema no lineal, una mínima alteración en el valor de una variable inicial puede tener un macro efecto y al revés. Los modelos que explican el comportamiento no lineal determinan con frecuencia más de una solución. Suelen ser no deterministas y comportarse de acuerdo con

la probabilidad de que el sistema esté en determinado estado, en un momento eventual. La nomenclatura que suelen tener las soluciones a modelos no lineales da lugar a bifurcaciones en el comportamiento de los sistemas. El sistema adopta una solución entre las posibles. La pérdida de la unicidad de soluciones se debe a la desproporcionalidad: los pequeños cambios o variaciones en las condiciones iniciales llevan el sistema no lineal a estados muy distintos durante la dinámica, lo que no ocurre en los sistemas lineales, los que constituyen generalmente aproximaciones, en ocasiones alejadas del comportamiento real de los sistemas pero suelen resultar de utilidad en la organización de ciertos sistemas. En particular, en la organización de sistemas de toma de decisiones en diferentes esferas de actividad, entre otras en las ingenierías, se hace necesario utilizar modelos lineales en calidad de aproximaciones iniciales del sistema estudiado o como descripciones de sus elementos las que se precisan, con posterioridad, con ayuda de modelos no lineales[11].

Lógica clásica. La lógica clásica precisa de definiciones de intersecciones y de uniones. Ella suele ser incongruente con los hechos reales como resultado de las dificultades que surgen en los sistemas complejos para definir las fronteras de un conjunto. Estas fronteras son frecuentemente vagas, es decir, con definición imprecisa.

Lógica difusa y borrosidad. La lógica difusa estudia la categorización de elementos en conjuntos [244, 245, 252]. Se denomina conjunto completo al sistema mayor del que el estudiado es parte componente. Por supuesto, la definición del sistema mayor depende de qué se esté estudiando. Por ejemplo, en el caso de un perro, el conjunto completo puede consistir de todos los perros, todos los mamíferos o todas las criaturas vivientes. Lo importante es la variabilidad del universo. El complemento de un conjunto es todo lo que no pertenece al conjunto.

En 1920 el matemático Jan Lukasiewicz propuso la idea que la simple dicotomía verdadero (V) o falso (F) pudiera contener también un tercer valor posible, lo que constituye también la base de la lógica dialéctica enunciada ya desde mediados del siglo XIX por los clásicos del marxismo. Una vez hecha tal asunción, Lukasiewicz se percató que cualquier número de valores intermedios eran igualmente posibles. En lugar de la simple evaluación de V o F podía ser utilizado un valor numérico para representar el grado de veracidad.

El investigador iraní Lofti A. Zadeh[244, 245], introdujo el concepto de la *posibilidad*, según la cual la relación de pertenencia no es simplemente bivalente, sino que existe infinidad de posibilidades, como una línea gradual, una escala. Zadeh y sus continuadores elaboraron la teoría de los conjuntos difusos, la que formaliza el concepto de la borrosidad en un modelo lógico y matemático.

El lingüista George Lakoff[134], introduce el uso de vocablos para modificar los conjuntos difusos. Estos términos caen en categorías tales como: modificadores de cantidad (mucho, suficiente, extremo); valores de veracidad (suficientemente verdadero, básicamente falso); probabilidades (al parecer, no muy parecido); cuantificadores (la mayoría, varios, pocos); posibilidades (próximo a lo imposible, suficientemente posible). Unas palabras conforman una dilatación o expansión del conjunto, mientras que otras su concentración o reducción. Los extremos son vagos, borrosos, pues no tienen definición exacta, pero reflejan el pensamiento humano. Múltiples experimentos han confirmado que las personas ordenan de igual forma los conjuntos. Palabras tales como siempre, muy frecuentemente, casi nunca y nunca tienen un significado comúnmente aceptado, aunque no exacto.

Azar. La palabra azar puede tener varias interpretaciones. Una de ellas es que el azar constituye el conjunto de causas imprevisibles e independientes entre sí, que no se atan a un encadenamiento lógico o racional y determinan un acontecimiento cualquiera[130]. Se distinguen dos tipos de azar: el benigno y el salvaje[153]. El *azar benigno* es aquel que puede ser tratado con las técnicas estadísticas existentes, responde a una distribución de probabilidades y presenta una regularidad final no aleatoria, mientras que el *salvaje* no puede ser estudiado con las técnicas estadísticas existentes, debido a su aparente cambio continuo de carácter[182], no admite ser descrito por un formalismo, se resiste a ser reducido a un proceso algorítmico conocido y constituye un concepto complementario del conocimiento. Se puede decir que el azar es todo aquello del cual no se conocen las causas complejas[153]. El azar siempre ha sido el peor enemigo de la predicción y del control por parte del ser humano.

Entropía. La termodinámica es el área de la física que investiga los procesos de transformación de energía y el comportamiento de los sistemas en esos procesos. La entropía es un concepto muy importante para el estudio de los sistemas, en la termodinámica. Rudolf

Clausius, en el siglo XIX, utilizó por primera vez la palabra entropía para definir las leyes de la termodinámica.

Un resumen histórico sobre el vínculo de la entropía con otros campos de estudio conduce a trabajos realizados apartir de los años cincuenta, en los que se compara la entropía con el concepto de información[50, 197]. Esta idea se utiliza posteriormente para relacionar ambos conceptos y llegar a la conclusión de que la información es igual a la cantidad de entropía negativa. Rolf Landauer y Charles H. Bennett[36, 135] descubren más tarde el porqué los procesos costosos o irreversibles requieren la destrucción de información.

Claude Shannon parece contradecir a Brillouin al afirmar que información y entropía no son opuestas[202]. La ecuación de la información de Shannon es muy similar a la ecuación de entropía de Boltzman[43], hecho que implica que la producción de información está relacionada con la de entropía. Sin embargo, para que esta relación sea viable, en la teoría hizo falta separar la información del significado y asociar información con novedad. Un ejemplo de esta última asociación es un algoritmo implementado en un ordenador que genera números aleatorios. Los números salen con cierta periodicidad en la pantalla del ordenador, en secuencia. Como no se hace posible predecir el próximo número, el momento en que este aparece es el instante de máxima información y también de caos[48]. El hecho de interpretar lo aleatorio como máximo de información permite imaginar el caos como la fuente de todo lo que es nuevo en el mundo[127, 162].

Otros autores[143, 195 -197] definen la entropía como la diferencia entre los flujos útiles. Formulan la siguiente definición matemática de la variación de entropía, válida para cualquier tipo de sistema:

$$dS = d_i S + d_e S; \quad d_i S \geq 0$$

Donde:

dS : cambio de entropía a lo largo del tiempo

$d_i S$: la producción interna de entropía

$d_e S$: el flujo de entropía a través de los límites del sistema

Según la segunda ley de la termodinámica, el cambio de entropía (dS) es simplemente la suma de los dos términos y, definida para sistemas aislados, se concluye que $d_e S = 0$, es decir que no hay flujo de entropía en los límites del sistema y que la entropía interna siempre

es positiva ($d_i S \geq 0$). Por lo tanto, los cambios de entropía son siempre positivos, lo que se define como *entropía positiva*. Luego, tiende siempre a crecer.

Para los sistemas abiertos hace falta un flujo de entropía a través de los límites del sistema ($d_e S$) de igual valor, pero con signo contrario a la producción interna de entropía, (fenómeno conocido como *entropía negativa*), para que el sistema pueda mantener su configuración. El valor ($d_e S$) significa el flujo de entropía entre el sistema y el medio y es reversible. Así mismo describe el conjunto de transformaciones del sistema determinadas por los flujos de intercambio con el medio que pueden ser anulados por una inversión de estos flujos. Este valor es independiente de la dirección del tiempo y su signo depende solamente del sentido de los intercambios con el medio.

El valor ($d_i S$), que siempre es positivo o nulo, establece las transformaciones no reversibles en el interior del sistema, las cuales son provocadas por los intercambios con el medio. Una inversión de los intercambios con el medio no cambiará su signo y sí hará crecer la entropía en el curso del tiempo o bien la dejará constante.

El equilibrio en los sistemas. El término *equilibrio* se define como el *estado de un sistema invariable con el tiempo*[52]. Según Prigogine, los sistemas pueden estar en equilibrio, próximos al equilibrio o alejados del equilibrio[195].

1.3 Autopoiesis y sistemas de dirección

Los *sistemas autopoieticos* han sido definidos como redes de producción de componentes que, a través de las interacciones, generan de manera recursiva las redes que los producen y constituyen la frontera que identifica el sistema como una unidad diferente del entorno[160-163]. Estos sistemas se renuevan permanentemente y se mantienen como entidades autónomas mediante el reciclaje de sus componentes, los que son periódicamente autoproducidos y autoconsumidos. En otras palabras, estos sistemas evolucionan por sí mismos.

El concepto de autopoiesis contempla una aparente paradoja. Por un lado, la capacidad de autoproducción y autorrenovación implica tener autonomía y por otro lado dependen del medio circundante con el cual interactúa permanentemente. Los sistemas autopoieticos poseen una identidad propia que se mantiene por los propios procesos dinámicos de

autoproducción, o sea, por los procesos de cambio y renovación. La única manera de preservar esta identidad es cambiando constantemente y el cambio está relacionado con su inserción en un ambiente, desde donde recibe la energía necesaria para los procesos internos. Es decir, es autónomo pero a la vez depende del entorno. Para que sea posible la renovación y el intercambio, el medio tiene que estar constituido por un sistema alejado del equilibrio. El ser humano, por ejemplo, es un sistema autónomo, se puede percibir su identidad y su perímetro definido como “hombre”, pero estas fronteras son abiertas y lo conectan con el entorno a su alrededor de manera compleja. Su historia está vinculada con el ambiente que lo rodea y con otros sistemas autopoieticos.

En el trabajo de Maturana y Valera[163] se definen los principios de la autopoiesis con base a estudios neurocientíficos sobre el funcionamiento del cerebro humano en forma de red de interacciones que influyen unas sobre las otras y establecen una organización circular. Se propone que la organización circular es básica para todos los organismos vivos y que todos los cambios que ocurren en el sistema se desarrollan dentro de ellos. Por lo tanto, para mantener la circularidad, todos los componentes que la caracterizan deben producirse y mantenerse internamente. En otras palabras, la organización de los sistemas vivos está hecha de forma que cada elemento produce y transforma a otros elementos del mismo sistema, autoorganización que ese autor denomina *organización cerrada* porque se encierra en sí misma[129].

La principal diferencia entre un sistema no vivo (por ejemplo, un automóvil) y un sistema vivo radica en que en el primero la estructura permanece fija una vez constituida, mientras que en los sistemas vivos los componentes cambian continuamente. Esto se debe a que el organismo vivo recibe e intercambia flujos de materia y energía con el entorno, y así evoluciona. Por lo tanto, se puede decir que el proceso vital es la actividad que se ocupa de la continua renovación del patrón de organización del sistema[49] en forma de estructura. En otras palabras, el proceso de continua renovación, propia de los sistemas vivos, constituye el vínculo que existe entre la organización y la estructura.

A partir de este concepto, derivado de la neurociencia, se introduce un segundo planteamiento innovador basado en el sistema nervioso, el cual además de autoorganizado es autorreferente. Esto significa que no es posible la construcción del mundo independiente del

organismo que lo observa y percibe, lo que se debe al hecho de que la realidad externa se especifica cognitivamente en el sistema nervioso a través de la organización cerrada[139, 153]. Las relaciones que definen al sistema como unidad y determinan la dinámica de las interacciones y transformaciones que ocurren en esta unidad constituyen la organización del sistema, mientras que las relaciones existentes entre los componentes que integran el sistema dentro de un espacio constituyen una estructura[160 -163].

El desarrollo de los sistemas de dirección está dando lugar, en los últimos decenios, al surgimiento de sistemas autopoieticos de origen artificial, como resultado de la creciente automatización de los diferentes componentes del ciclo de vida de estos sistemas; esto conduce a la sustitución paulatina de la participación de los hombres en los sistemas por automatismos que gobiernan todo tipo de mecanismos, los que evolucionan como sistemas hombres-máquinas con ayuda de los hombres que los crean.

Una de las características fundamentales de una parte importante de los sistemas, lo constituye la existencia de un fin de funcionamiento, el que incluye generalmente un conjunto de indicadores (objetivos). Esto se refiere, entre otros, a los sistemas autopoieticos más evolucionados, principalmente los hombres, y los sistemas de dirección de complejos organizativos y técnicos, en losque se involucran hombres y medios computacionales trabajando de forma coordinada. La existencia de fin de funcionamiento presupone la actuación sobre otros sistemas, lo que conduce al concepto de dirección.

Los sistemas-objetos pueden ser reales (físicos) o abstractos. Por ejemplo, un objeto inexistente sometido a un proceso de diseño constituye un objeto abstracto. A diferencia de los sistemas reales, los que pueden intercambiar información, los sistemas abstractos son información e intercambian información.

Los clásicos habían observado que la presencia de una organización entre los elementos de un sistema está asociada a la existencia de restricciones a los posibles estados que puede adoptar cada uno de ellos[28]. Si bien desde el punto de vista de las propiedades del sistema-objeto el todo es más que las partes, como resultado de las propiedades emergentes de la interacción entre los elementos desde el punto de vista de los posibles estados que pueden adoptar las partes (los elementos) del sistema, el todo resulta inferior a las partes[26-28,165,169].La complejidad puede no concernir más que a los constituyentes

parecidos y distintos, como los átomos que conforman un conjunto cristalino. Pero basta con esa diferencia para que se constituya una organización entre estos átomos que impone restricciones a su disposición y produce emergencias (propiedades cristalinas)[174].

Los sistemas pueden ser controlados o no controlados. En los sistemas controlados la información es captada y se realizan cambios en respuesta a la información obtenida como resultado de las funciones de detección, selección y reacción de los sistemas[143]. La detección concierne a la comunicación de información entre sistemas. La selección se define como las reglas que el sistema utiliza para tomar decisiones. La reacción es el medio por el cual se realizan las transacciones entre los sistemas. La comunicación y las transacciones son las únicas interacciones intersistémicas. La comunicación es el intercambio de información, mientras la transacción involucra el intercambio de materia y energía. Todas las interacciones organizacionales y sociales involucran la comunicación y/o la transacción.

En los últimos decenios, como resultado de la necesidad de lograr el funcionamiento de la mejor forma posible de los diferentes objetos que afectan la vida del hombre, la evolución de la teoría y la práctica de los sistemas de toma de decisiones vinculados a la Ingeniería han conducido al desarrollo de sistemas automatizados que son estudiados por la ciencia denominada ingeniería de sistemas y, actualmente, por la de los sistemas de ingeniería.

El surgimiento y desarrollo de las máquinas computadoras desde fines de la primera mitad del siglo pasado determinó la necesidad del desarrollo de enfoques que faciliten el diseño de sistemas informáticos y de ayuda a la toma de decisiones para todo tipo de procesos y organizaciones. Estos enfoques se agrupan en determinadas teorías conocidas como análisis de sistemas, ingeniería de sistemas y sistemas de ingeniería.

1.4 Análisis de sistemas, ingeniería de sistemas y sistemas de ingeniería

El campo de acción del análisis de sistemas se aplica a todo tipo de sistemas sociales humanos: instituciones educacionales, comunidades, familias, y organizaciones comerciales, de beneficencia, privadas, públicas y también de máquinas, fábricas, sistemas ingenieros, economía de las naciones, ecosistemas, etc.

Por otra parte, en la literatura dedicada al análisis de sistemas informáticos predominan los procedimientos que se inician por el análisis del sistema actual y la búsqueda de

procedimientos que permiten automatizarlo, mejorando determinados aspectos de su desempeño. Esta misma idea prevalece en todo tipo de obras clásicas dedicadas al análisis de sistemas[40, 52], idea que ha evolucionado en el sentido de perfeccionar cada vez más las técnicas de desarrollo de software, pero sin perder la metodología básica según la cual el usuario o cliente determina la solicitud de elaboración de software con el fin de solucionar las tareas de procesamiento por él determinadas. Así, se han desarrollado numerosas metodologías de análisis, incluyendo las más modernas, entre las que se encuentran las denominadas metodologías ágiles en el desarrollo de software[52] las cuales proveen tecnologías de aseguramiento de las solicitudes del cliente en un mínimo de tiempo con su máxima satisfacción con el sistema desarrollado. La práctica generalmente aceptada de satisfacer las solicitudes del cliente se adecua perfectamente a la visión empresarial moderna, pero transfiere al cliente la tarea de la concepción del sistema; es decir, la tarea de decidir cómo debe ser el sistema. Esta práctica, correcta desde la visión de las empresas desarrolladoras de software, ha dificultado el desarrollo de metodologías de análisis de sistemas basadas en la lógica misma de los procesos de toma de decisiones en los sistemas organizativos y se ha transferido a otras esferas, incluyendo las ingenierías, lo que determina el traspaso de la función de análisis al ingeniero especialista en cada tecnología específica.

Según algunos autores, análisis de sistemas es una denominación incoherente, pues los sistemas no se dejan analizar en el sentido de estudiar las partes por separado, sino que tienen que asociarse al sistema mayor del cual constituye un elemento y el carácter de sistemas de los elementos constituyentes[186]. El autor del presente trabajo considera, sin embargo, que el análisis no solo es posible, sino necesario, con la particularidad que requieren ser analizados los componentes del sistema y también las interacciones entre ellos.

En sus orígenes, en las diferentes áreas de la ingeniería se habla de análisis en las máquinas, ingeniería de máquinas o simplemente ingeniería, porque la palabra alude al pensamiento clásico, que desconoce el carácter sistémico incluso de las máquinas. Las máquinas son también sistemas, pues ellas constan de elementos de cuya interacción surgen propiedades adicionales a las propias de la simple unión de sus componentes.

Los sistemas artificiales, creados por los hombres, están plenos de objetivos, al contrario de los sistemas naturales pues, en rigor, al natural no le falta nada. La naturaleza es tal cual

es, pero cuando el hombre interactúa con la naturaleza, le impone a ella una finalidad inexistente con anterioridad. Esto es válido tanto para los sistemas computacionales creados con la finalidad de gobernar los sistemas naturales como para los creados por el hombre, resultantes de previas creaciones virtuales: máquinas, obras de arte, fábricas, organizaciones de todo tipo, etcétera.

Entre las áreas predominantes de actuación de la ingeniería de sistemas se encuentran [40, 126]:

- Sistemas de información para negocios.
- Ingeniería de Software.
- Lenguajes de programación y bases de datos.
- Minería de datos.
- Optimización como ciencia y solución de tareas concretas.
- Reconocimiento de patrones.
- Procesamiento de lenguaje natural.
- Ingeniería del conocimiento y ontología.
- Realidad virtual.
- Seguridad tecnológica.
- Tecnología móvil.
- Geoinformática.
- Criptografía
- Programación paralela

La función de la Ingeniería de sistemas, en su concepción más moderna [127], consiste en encaminar la ingeniería de los sistemas complejos. Un sistema ingeniero complejo está compuesto por múltiples y diversos elementos intrínsecamente relacionados, y requiere de la ingeniería de sistemas para encaminar su desarrollo.

Una perspectiva más amplia y robusta se enfoca a la solución de problemas ingenieros muy extensos mediante la integración de los enfoques de la ingeniería, la gestión y las ciencias sociales, utilizando metodologías avanzadas de modelado [135, 186]. Esta perspectiva ha recibido la denominación de sistemas de ingeniería. Es un intento de tratar los grandes retos

de la sociedad con impacto global significativo, mediante la investigación de las vías en que los sistemas se comportan e interactúan entre sí, incluyendo los factores sociales, económicos y ambientales. Este enfoque procura abarcar los procesos de las ciencias de la ingeniería, sociales y de la gestión con mayor flexibilidad y amplitud que la ingeniería de sistemas moderna. Entre las probables aplicaciones críticas se destacan los problemas propios de la atención médica, la energética, el medio ambiente, la seguridad, entre otros. De la búsqueda de solución a problemas de tal magnitud en el período 1998-2001 surge el concepto de Sistemas de ingeniería para designar grandes sistemas en los que se integran las soluciones a las diferentes áreas de la ingeniería con los problemas de carácter social, político, energético, medioambiental, etc., que repercuten en la vida de las naciones; se desarrolla en paralelo en varias universidades de vanguardia del mundo, lideradas por el Massachusetts Institute of Technology y se agrupan en el Consejo de Universidades de Sistemas de Ingeniería (Council of Engineering Systems Universities (<http://www.cesun.org/>)).

En la comprensión de los investigadores de vanguardia, la ingeniería de sistemas, al igual que los sistemas de ingeniería, difieren de las disciplinas tradicionales en que están enfocados en lo siguiente:

- Tratar los sistemas como un todo.
- Conciliar las necesidades del cliente con el ambiente operacional.
- Realizar el diseño sistémico conceptual.
- Establecer el necesario enlace de las disciplinas tradicionales de la ingeniería y llenar los vacíos entre las especialidades.
- Formar parte integral de la gestión de proyectos, planes y guía del esfuerzo ingenieril.

La ingeniería de sistemas moderna redefine su esfera de actuación y enfoque de investigación a partir de los riesgos que se presentan ante el avance tecnológico y la competencia, así como por la complejidad asociada al incremento de la automatización y la especialización requerida para actuar en las áreas e interfaces entre las disciplinas.

Entre los sistemas ingenieros complejos se incluyen:

- Satélites artificiales de la Tierra.
- Sistemas de control de tráfico en los aeropuertos.
- Sistemas de localización vehicular.

- Sistemas de navegación aérea.
- Sistemas de información clínica.
- Aviones de pasajeros.
- Combinadas modernas de cultivo.
- Plantas industriales de todo tipo y sus elementos componentes.

Un enfoque sistémico busca como regla el balance de un sistema, asegurando que ningún indicador mejore a expensas de otros de igual o mayor importancia; por ejemplo una mayor productividad a expensas de un mayor costo o consumo energético. Como todos los indicadores son interdependientes, las decisiones deben asegurar valores adecuados de todos ellos para el sistema en su integralidad y para cada una de sus partes.

Aporte de las diferentes disciplinas. El desarrollo de los sistemas de ingeniería, según la concepción del término asumida por el autor de esta Investigación, se puede asemejar a la construcción de una Torre de Babel, donde interactúan miles de especialistas en disciplinas diferentes cuyos esfuerzos colectivos son requeridos para la construcción de un sistema exitoso capaz de conciliar debidamente las partes de los distintos niveles de agregación del objeto estudiado, sus diversas funciones, en el tiempo y asegurando un compromiso adecuado entre los indicadores que intervienen en la toma de decisiones [189]. Sin el concurso de especialistas dotados de herramientas adecuadas de análisis y síntesis de sistemas, los especialistas de distintas áreas específicas de la ingeniería, economía, humanidades y otras áreas del conocimiento no se pudieran entender entre sí y el sistema sería tan imposible de construir como lo fue la famosa torre bíblica.

Dada la naturaleza compleja de los sistemas para hacer ingeniería, en su implementación se requiere del concurso de elementos que preparen y/o tomen decisiones inteligentes. En la bibliografía especializada a los elementos de este tipo se les denomina agentes y de sus diferentes manifestaciones se ocupa la teoría de los sistemas multiagentes.

1.5 Sistemas multiagentes

El concepto de sistema multiagente surge como una necesidad en la búsqueda de soluciones a tareas de toma de decisiones de gran complejidad en sistemas distribuidos, como resultado

de su descomposición en elementos. Este concepto se basa en la actividad de agentes “inteligentes” que realizan funciones complejas en la dirección de un gran número de agentes simples capaces de producir una conducta inteligente global llevando a la solución de problemas intratables de otra forma[239]. El concepto del multiagentese inspira frecuentemente en sistemas biológicos basados en las interacciones sociales entre agentes, entre las que se incluye la negociación y se aplica con frecuencia en tareas propias de las ciencias económicas, sociales, médicas y técnicas.

La relación entre agentes puede ser de cooperación si el agente trabaja en sociedad para lograr objetivos comunes. Así, en una comunidad de cooperación, los agentes tienen capacidades individuales, las cuales, al combinarse, conducen a la solución del problema completo. Sin embargo, esa relación de cooperación no siempre es posible y en ocasiones los agentes tienen una relación de competencia debido a diferencias de objetivos. Esto significa que si los agentes son capaces de alcanzar sus propios objetivos, su comportamiento puede beneficiar parcialmente la cooperación para mejorar el desempeño y, por lo tanto, la formación de alianzas.

En cuanto a la coordinación de actividades, ya sea en un ambiente de cooperación o de competencia, una forma básica para solucionar los conflictos es mediante la negociación. Esta puede ser vista como el proceso de identificación de las interacciones basadas en la comunicación y el razonamiento sobre el estado y las intenciones de otros agentes[85].

Las propiedades básicas que rigen las acciones de un agente y las cuales debe cumplir para llegar a la solución de un problema[240], son:

- Reacción: los agentes perciben su entorno y responden de manera oportuna a los cambios que ocurren en él, para satisfacer sus propios objetivos.
- Proactividad: los agentes exhiben una conducta dirigida a objetivos tomando la iniciativa para satisfacerlos.
- Sociabilidad: los agentes interactúan con otros agentes con el fin de satisfacer objetivos comunes.

Las propiedades antes mencionadas, junto con las propiedades del ambiente o entorno en el que tienen lugar las interacciones entre los agentes, hacen que un sistema multiagente cumpla los siguientes propósitos:

- Estructuración: el sistema multiagente se comporta como un todo.
- Gestión de recursos y servicios.
- Observabilidad.
- Definición de los medios concretos para que los agentes se comuniquen.
- Responsabilidad de mantener los procesos en curso en el sistema.
- Definición de diferentes tipos de reglas sobre todas las entidades del sistema multiagente.

Una vez esclarecidas las relaciones y propiedades de los agentes y su ambiente, un programa de acciones combinadas determinará la ocurrencia de un proceso en el tiempo, por lo que un sistema multiagente se puede definir como diversas redes de solucionadores de problemas que interactúan para encontrar la solución común y que van más allá de las capacidades individuales o conocimiento de cualquier solucionador individual. Debido a las características del sistema multiagente, como la descentralización de datos y la asincronía en la computación, son capaces de ofrecer soluciones de aplicaciones distribuidas.

En muchas aplicaciones para la planeación industrial, los agentes modelan los recursos del sistema y las tareas de secuenciación se hacen de forma distribuida mediante la cooperación y la coordinación entre agentes[239, 240]. Existen también enfoques que utilizan un solo agente que define la secuencia de los trabajos que ejecutarán los agentes de recursos[1, 156]. Al responder a las perturbaciones, la naturaleza distribuida de los sistemas multiagentes también puede beneficiar el algoritmo de reprogramación involucrando solo a los agentes directamente afectados, sin alterar al resto de la comunidad de agentes, la que puede continuar con su trabajo. En calidad de agentes pueden coexistir tanto seres humanos como medios computacionales.

Un caso particular muy importante de aplicación de los sistemas multiagentes en la industria, los servicios, la investigación científica está constituido por los sistemas multi-robots (MRS) los que están dados por conjuntos de robots móviles autónomos que cooperan con el fin de realizar misiones colectivas[7, 8, 51, 201]. Los MRS pueden sustituir a los seres humanos en escenarios de riesgo[201, 219], o liberar al hombre de tareas colectivas monótonas y repetitivas. Más aún, ellos permiten automatizar misiones distribuidas en el espacio, la función y el tiempo. La distribución de los recursos y la información dota a los MRS con características

tales como: la distribución en el espacio y el tiempo, el manejo de la complejidad a través de la distribución del riesgo y el incremento de la robustez[7]. Estas ventajas potenciales requieren de la cooperación de los robots para ser efectivos[72,197]. La cooperación requiere en su turno compartir eficientemente la información y propiamente la coordinación.

Se debe notar que, en todos los casos, la interacción entre agentes conduce al concepto de estructura del proceso de toma de decisiones del sistema, en el cual ellos actúan. En efecto, un agente siempre representa un elemento de un sistema, el conjunto de los agentes que son parte de un sistema se relacionan entre sí mediante determinadas reglas, mientras que el (los) agente(s) que representa(n) al sistema en su integralidad participa(n) del proceso de toma de decisiones del sistema y de cada una de sus partes, así como tal vez de otro sistema mayor del cual el estudiado es a su vez parte componente.

Se distinguen tres grandes grupos de metodologías para el diseño de sistemas multiagentes: el primero basado en orientación a objetos y constituye una extensión de metodologías semejantes propias de la informática; el segundo basado en ingeniería del conocimiento y se relaciona con los logros en las áreas de la ontología, la inteligencia artificial y los conjuntos difusos; el tercero se basa en el llamado *paradigma de agentes* y se fundamentan en una estructuración social, donde existen individuos (agentes), grupos y organizaciones[239].

La práctica del diseño y la explotación de sistemas computacionales de todo tipo ha determinado el desarrollo de complejos hombre-máquina en los que ambos componentes interactúan de forma inteligente como agentes, aportando cada elemento aquellas capacidades para las que se encuentra mejor preparado. De tal forma, han surgido sistemas multiagentes hombre-máquina en los cuales la inteligencia colectiva permite la toma de decisiones racionales.

1.6 La inteligencia colectiva y la toma de decisiones

El concepto de la inteligencia colectiva presupone la utilización de varios presupuestos sistémicos: considera la inteligencia colectiva como consistente en un número grande de agentes cuasi-independientes, estocásticos, interactuando localmente entre ellos, y con un ambiente activo, en ausencia de organización jerárquica, y capaz de llevar una conducta adaptable[1,154]. El presupuesto de la inteligencia colectiva se entiende como “grupos de

individuos que hacen las cosas colectivamente de forma inteligente”[148]. Los enfoques diferentes de las inteligencias colectivas contribuyen a formular un problema de la investigación básica: cómo pueden las personas y las computadoras conectarse para lograr en común una actuación más inteligente que cualquier individuo, grupo o computadoras ha logrado alguna vez con anterioridad[161].

Este problema presupone a humanos y computadoras como entes que se influyen unos a otros mutuamente; no es solo el hombre o la computadora los que muestran capacidades inteligentes, sino que la mezcla de computadoras con humanos son las que se integran para exceder las capacidades de ambos tomadas independientemente. En efecto, independientemente del grado de correspondencia de los modelos de toma de decisiones implementados en la computadora (o sistemas de ellas) con el objeto que se trate, siempre pueden ser completados con la representación (modelo) subjetivo del decisor (persona o colectivo de personas)[41]. Por supuesto, el incremento sustancial en la calidad de la toma de decisiones depende del uso de estructuras adecuadas[219]. Para encaminar adecuadamente los procesos de toma de decisiones se hace necesario, en el caso más general, el uso de las técnicas más modernas del análisis multicriterial.

1.7 Análisis multicriterial

El análisis multicriterial se ha desarrollado básicamente en dos escuelas: la de Ayuda Multicriterial a la Toma de Decisiones (MCDA) y la de la Toma de Decisiones bajo Criterios Múltiples (MCDM)[35, 248]. Ambas difieren en que la primera busca dar recomendaciones, mientras que la segunda procura aproximarse a una solución ideal a partir de un conjunto de axiomas[185].

Aunque la historia del análisis multicriterial data desde el siglo XVIII, tan solo en los años sesenta del siglo XX, hizo su aparición en la literatura científica con formulación y vocabulario propios. Desde entonces el número de contribuciones a la teoría y aplicaciones ha transcurrido en constante crecimiento.

En la obra de Bana y Costa[35] se argumenta que las primeras contribuciones a un real enfoque científico al análisis multicriterial fueron realizados por la escuela MCDM, sin embargo,

surgían dificultades con los objetivos que se debían cumplir porque los decisores humanos nunca alcanzan el grado de consistencia necesaria. Esta se introducía por la escuela MCDA como una solución.

El principio metodológico de la escuela MCDM presupone la identificación de preferencias claras de un decisor y mediante la solución de una serie de problemas de optimización tratar de minimizar alguna distancia entre una solución ideal para niveles de importancia concedidos a cada criterio por un analista en correspondencia con algún algoritmo.

El principio metodológico de la escuela MCDA consiste en entregar una lista de diferentes soluciones, mostrando los valores de los criterios y otras características de cada solución. La solución final es seleccionada por el decisor. De tal forma, la toma de decisiones queda en manos del decisor y no en las del analista.

Aunque hay algunas diferencias entre las escuelas MCDM y MCDA, el objetivo general es el mismo: ayudar a los tomadores de decisiones a solucionar complejos problemas de una forma sistémica y consistente. Se debe, no obstante, notar que el enfoque de la escuela MCDA es más consistente con el propósito de automatización de los procesos de preparación y toma de decisiones que el de la escuela MCDM.

Existen cuatro enfoques principales en el análisis multicriterial:

El enfoque de prevalencia basado en el trabajo de Bernard Roy [203], caracterizado por el establecimiento de relaciones de prevalencia utilizando el principio de la concordancia-discordancia. Este principio conduce a la declaración de que una alternativa es al menos tan buena como otra si:

- Una mayoría suficiente de criterios apoya esta alternativa (principio de concordancia).
- La minoría de los criterios que niegan la alternativa no son suficientemente fuertes (principio de la no discordancia)

Los muy conocidos métodos ELECTRE [77] se basan todos en el enfoque de la prevalencia.

La teoría de la Utilidad Multi -Atributo (MAUT) es ampliamente utilizada en los problemas

de ayuda a la decisión así como en problemas de carácter económico y financiero y fue enunciada principalmente por Keeney y Raiffa[131], e implementada posteriormente en un número importante de métodos.

Esta teoría se basa en la existencia de una función de utilidad para representar las preferencias del tomador de decisiones mediante la agregación de consideraciones en todos los criterios (o atributos en el contexto del MAUT). La importancia de cada uno de estos criterios se establece por sus correspondientes pesos. Los diferentes métodos de este enfoque se caracterizan precisamente por la determinación de pesos a los criterios propios de cada tarea.

El método más ampliamente utilizado para asignar pesos está constituido por el denominado método del “Proceso Jerárquico Analítico” (AHP) desarrollado por Saaty[205]. AHP es un proceso de decisión [35,205] que consiste en la agregación de varias comparaciones para obtener un vector de prioridades que sea representativo de resultados coherentes. En otras palabras, el AHP genera prioridades consolidadas sobre una serie de alternativas que representan la voluntad, gusto o decisiones reveladas por los datos de preferencia proporcionados por uno o más actores o grupos de actores involucrados en el proceso de toma de decisiones.

El Proceso Jerárquico Analítico AHP utiliza un formato de entrada específico para que los tomadores de decisiones expresen sus preferencias con respecto a los criterios y alternativas: las comparaciones por pares. Este formato expresa las preferencias del usuario en muchas situaciones prácticas. Una limitación de las comparaciones por pares es que antes de aplicar el modelo de decisión los expertos deberán facilitar los datos de juicio que representan sus preferencias con respecto a todos los elementos involucrados. Así, el método consta de los pasos:

- a) El problema de decisión es representado como una jerarquía en la cual el vértice superior está constituido por el principal objetivo del problema, los vértices intermedios representan los criterios y los vértices inferiores son las acciones.
- b) En cada nivel de la jerarquía se realiza una comparación inteligente de los vértices desde el punto de vista de su contribución a cada uno de los vértices del nivel

superior a los que ellos se encuentran vinculados. La comparación por pares es efectuada en términos de la relación preferencia/importancia evaluada de acuerdo a la escala numérica propuesta por el método.

El método más extendido entre todos es el del enfoque de la Programación Multiobjetivo Interactiva iniciados por P.L.Yu, Stanley Zionts, Milan Zeleny, Ralph Steuer y otros, e incluye un grupo de técnicas tales como: la del Vector de Criterios de Aspiración[140], el Método de Proyección de la Eficiencia[218, 248], etcétera.

El enfoque de la teoría de la decisión y la negociación[131] introduce nuevas vías para trabajar explícitamente con dinámicas de grupos con diferencias en el conocimiento y de los valores de los objetivos del sistema entre los miembros del grupo.

En los últimos tiempos la teoría de los conjuntos difusos se ha venido introduciendo paulatinamente en las técnicas del MCDM sobre las bases de las líneas anteriormente mencionadas. Hay un número importante de bibliográficas sobre las técnicas MCDM difusas[139, 207].

Las tareas de toma de decisiones se modelan de acuerdo al enfoque interactivo. Se muestra que estas técnicas pueden servir como base para el desarrollo de la teoría y las aplicaciones de los sistemas de ingeniería, ya que permite la generación automática de opciones para su selección posterior por las personalidades o colectivos de ingenieros, dirigentes de organizaciones, o simplemente por un sistema de mayor envergadura encargado de tomar las decisiones adecuadas, tomando en consideración el sistema de mayor envergadura aún mayor asociado al estudiado. De tal forma, la base metodológica requerida resulta más próxima a las ideas del enfoque MCDA que a las del MCDM.

Tanto en la generación de opciones de solución como en la selección posterior de las mejores combinaciones de opciones resulta posible utilizar el siguiente modelo general de optimización:

Minimizar $[z_1(x), z_2(x), \dots, z_m(x)]$,

y satisfacer, al mismo tiempo, el conjunto de restricciones:

$$g_1(x) \geq b_1.$$

$$g_2(x) \geq b_2.$$

$$\cdot \quad 41$$

$$\cdot$$

$$\cdot$$

$$g_r(x) \geq b_r.$$

El modelo anterior puede tener carácter determinístico o aleatorio. Tanto los objetivos como las funciones restringidas $g_i(x)$ pueden tener carácter difuso. Independientemente de los enfoques del análisis multicriterial que se utilicen se requiere, en todos los casos, hacer uso de las técnicas modernas de optimización, por lo que se pasa a un breve resumen de las técnicas utilizadas.

1.8 Técnicas modernas de optimización. Heurísticas

Los modelos y métodos clásicos de la programación matemática (PM) tales como la Programación Lineal (PL), Programación Cuadrática (PC), Programación Geométrica (PG), sus homólogos en variables discretas, la Programación Nolineal (PNL), en su concepción más general y la Programación Discreta (PD) en general, incluida la Programación Dinámica (DP), han desempeñado roles relevantes durante la solución de muchas tareas[200]. A los algoritmos de solución de los correspondientes modelos ha sido dedicado un número significativo de obras. Los modelos de carácter analítico dados por los correspondientes de las PL, PC, PG, PNL y sus homólogos discretos constituyen, como regla, aproximaciones a los modelos requeridos para la solución de tareas de ingeniería. Sobre estos modelos y métodos existe abundante literatura[11, 74, 193, 200]. Sin embargo, la necesidad de solucionar tareas de complejidad tal que los métodos clásicos de la PM se vuelven inaplicables (llamados NP completos) han dado lugar a los modernos enfoques de optimización heurística[78, 101]. En este contexto, heurístico es un algoritmo que localiza las soluciones suficientemente buenas a un problema sin la preocupación que la solución sea óptima. Entre los indicadores que caracterizan los métodos heurísticos se encuentran la precisión, calidad, y exactitud resultantes del esfuerzo computacional.

Los tipos de heurísticas se pueden clasificar atendiendo al modo en que se buscan y

construyen las soluciones[78].

- Métodos constructivos. Se caracterizan por la adición paulatina de componentes individuales a la solución, hasta obtener una solución factible con valor de la función objetivo suficientemente satisfactorio. El método más conocido de este grupo lo constituye el GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedures). Cada iteración en GRASP consta de dos pasos: el de construcción y el de búsqueda local. La solución inicial se construye iterativamente, considerando cada vez una componente de forma aleatoria, devoradora (por su aporte a la función objetivo) y adaptiva (en dependencia de las selecciones anteriores). La eficiencia del GRASP depende de la eficiencia en la construcción de la solución inicial [78, 199].
- Manipulación del modelo. Se modifica la estructura del modelo con el fin de hacerlo mas sencillo. Las modificaciones pueden consistir en la linealización de modelos no lineales, la agregación de variables para reducir su número, la reducción o el incremento de restricciones, y otras. Un ejemplo de manipulación se obtiene al utilizar funciones de aproximación en la simplificación de la tarea original sin asegurar las condiciones de optimalidad requeridas.
- Métodos de descomposición. El problema se divide en subproblemas de menor complejidad mediante la manipulación del modelo original. Una vez solucionados todos y cada uno de los subproblemas se busca una composición de soluciones tal, que aporte el mejor valor posible a la función objetivo del problema original. Estos métodos se basan, generalmente, en la simplificación de métodos exactos de descomposición.

Entre los métodos de descomposición se destaca por su aplicabilidad no solo a la búsqueda de soluciones óptimas a tareas complejas, sino también a soluciones aproximadas que responden a este tipo de heurísticas, el método Aproximatorio-Combinatorio de V. R. Jachaturov[11, 121], basado en lo siguiente:

En el conjunto de las posibles decisiones D se define la función $Z(x)$ que describe el objetivo mono o multicriterial de la tarea que se requiere solucionar. Se requiere hallar

un elemento $x^* \in D$ tal que $Z(x^*) = \min_{x \in D} Z(x)$. Prácticamente, cualquier tarea de

optimización puede ser formulada de esta forma.

Se utiliza el siguiente procedimiento general:

En el conjunto D se define una función de aproximación $Q(x)$, tal que $Z(x^*) \geq Q(x^*)$ y para $Q(x)$ existen métodos efectivos y algoritmos de determinación no solo de $x^0 \in D: Q(x^0) = \min Q(x)$ sino también de todos los elementos $x \in D$, con valores de $Q(x)$ que se diferencien de $Q(x^0)$ en no más que un parámetro $\alpha \geq 0$. Así, se hace posible la determinación de un conjunto $D_0 \subset D$, tal que:

$$Q(x^0) \leq Q(x) \leq Q(x^0) + \alpha \Rightarrow x^0 \in D_0$$

$$Q(x) > Q(x^0) + \alpha \Rightarrow x^0 \in D - D_0$$

En otras palabras, D_0 contiene todas las soluciones α -óptimas de la tarea de aproximación. Se hace de tal forma posible la búsqueda de solución a la tarea original de alta complejidad entre opciones de solución a tareas de inferior complejidad.

En el trabajo [125] se demuestra que si el valor seleccionado de α satisface la condición $\min \{Z(x) / x \in D_0\} \leq Q(x^0) + \alpha$, entonces el conjunto D_0 contiene la solución óptima de la tarea original. En caso contrario las opciones de solución a la tarea original con valor mínimo $Z(x)$ contenida en el conjunto D_0 constituye una solución aproximada. La aplicación del método permite la solución de tareas de muy alta complejidad, representadas por $\min \{Z(x) / x \in D\}$ entre las opciones de solución que se diferencian de la óptima en no más α de una tarea más sencilla representada por $\min \{Q(x) / x \in D\}$.

Entre otros esquemas de descomposición derivados de la aplicación del método se encuentra la búsqueda de solución por aproximaciones sucesivas dadas por la serie de tareas aproximadas de aproximación $Q^1(x)$, ..., $Q^n(x)$, tales que $Z(x^*) \geq Q^1(x^*) \geq Q^2(x^*) \geq \dots \geq Q^n(x^*)$, es decir $Q^i(x)$ constituye una aproximación de $Q^{i+1}(x)$, entonces se hace posible la búsqueda de la solución óptima a la tarea original en subespacios de opciones de solución cada vez más reducidos, empezando por D_0^n .

$$D_0^0 \subset D_0^1 \subset \dots \subset D_0^n \text{ y } f(\bar{x}) = f(x^*).$$

Donde \bar{x} solución óptima de $Z(x)$ en D_o

En el caso mas general, si los conjuntos de soluciones generados en la búsqueda de solución a las subtareas de una tarea original son incompletos, aunque la selección de la mejor composición de soluciones de las subtareas fuera “óptima” se tendría un procedimiento aproximado de optimización a partir de poblaciones de solución obtenidas por procedimientos de carácter heurístico, por lo que el procedimiento en su totalidad será también heurístico.

- Métodos de reducción. Se identifican las características que presumiblemente debe poseer la solución óptima y que conducen a la simplificación del problema. Así, puede detectarse que alguna variable debe adoptar valor 0, que otras están correlacionadas, etcétera.
- Métodos de búsqueda por entornos. Parten de una solución inicial factible y, mediante alteraciones de esa solución, van pasando iterativamente a nuevas soluciones factibles de su entorno, mientras no se cumpla un criterio de parada. Se considera como óptima la mejor entre las soluciones examinadas. Los métodos de este grupo se diferencian entre sí por el modo de pasar de una solución factible a la siguiente. Al grupo de las heurísticas desarrolladas mas difundidas se les denomina como Búsqueda Local Iterativa [144, 156]. El autor de este trabajo desarrolló, ya en los años setenta, un algoritmo perteneciente a este grupo y lo aplicó a la solución de tareas de secuenciación y de clustering [11, 13, 14].

Al igual que las heurísticas, las metaheurísticas pueden ser consideradas un almacén algorítmico general aplicable a diferentes problemas de optimización con relativamente pocas modificaciones para ser adaptadas a las particularidades de cada problema específico. Las metaheurísticas extienden las capacidades de las heurísticas combinando uno o más métodos heurísticos (llamados procedimientos) utilizando una estrategia de nivel superior. Los procedimientos pueden ser tan simples como la manipulación de una representación, o tan complejos como otra metaheurística. Algunos ejemplos de metaheurísticas están dados por los métodos de Búsqueda Local Iterativa, Búsqueda Tabú, Algoritmos Genéticos, Optimización por Colonia de Hormigas, Recocido Simulado, entre otros [78, 82, 152].

Entre las características distintivas de las metaheurísticas se encuentran:

- Son estrategias que guían el proceso de la búsqueda.
- El objetivo de la búsqueda consiste en explorar eficazmente el espacio de solución para encontrar soluciones cercanas a las óptimas.
- Las técnicas que constituyen los algoritmos metaheurísticos van desde los procedimientos simples de búsqueda local a los procesos complejos de aprendizaje.
- Los algoritmos metaheurísticos son aproximados y frecuentemente no determinísticos.
- Estos algoritmos pueden incorporar mecanismos para evitar ser atrapados en áreas específicas del espacio de la búsqueda.
- Los conceptos básicos de las metaheurísticas permiten una descripción a nivel abstracto.
- Las metaheurísticas no se orientan a problemas específicos.
- Las metaheurísticas pueden utilizar el conocimiento de un problema específico, expresado en forma heurística, bajo el control de la estrategia global.
- Las metaheurísticas más avanzadas utilizan la experiencia acumulada en pasos precedentes durante la búsqueda en los pasos posteriores.

Los métodos de Búsqueda Tabú y de Recocido Simulado siguen diferentes estrategias para evitar caer en óptimos locales. La búsqueda tabú se realiza en el entorno de una solución actual. Con la finalidad de evadir posibles óptimos locales se permiten movimientos que empeoran el valor de la función objetivo. Para evitar que el proceso retorne a puntos ya examinados se declaran prohibidos (tabú) determinados movimientos. El procedimiento de paso de una solución a la siguiente es siempre determinístico.

El recocido simulado utiliza conceptos originalmente descritos por la mecánica estadística y consiste en la selección aleatoria de una entre las posibles soluciones que componen el entorno de la solución actual. Si la nueva solución es mejor que la actual, entonces se acepta como nueva solución actual. En caso contrario, se acepta como actual con una probabilidad

que decrece según crece la diferencia entre el valor de la función objetivo en la solución candidata y la actual[78, 199].

Un grupo importante de metaheurísticas está conformado por las técnicas de optimización inspiradas en la naturaleza (TOIN) y tienen que ver con el hecho que los algoritmos correspondientes convergen, en general, a soluciones satisfactorias de una manera efectiva y eficiente (tiempo de cómputo y esfuerzo de implementación). Las TOIN han mostrado a menudo su eficacia ante problemas combinatorios de optimización difíciles que aparecen en dominios industriales, económicos, y científicos[11, 82, 150, 152].

Entre las TOIN más utilizadas en la actualidad se encuentran:

- Los Algoritmos Genéticos, los que imitan procesos de la evolución natural tales como la selección, el cruzamiento y la mutación de elementos de una o más poblaciones de seres vivos de una misma especie. Se crea aleatoria o determinísticamente una población inicial de soluciones codificadas generalmente en códigos binarios y se hace evolucionar mediante los operadores de selección, cruzamiento y mutación en el sentido de mejorar un criterio de eficiencia denominado *función de adaptación*, hasta que se cumple un criterio de parada.
- Los Algoritmos de Enjambres se enfocan en métodos que se aprovechan de las propiedades de la inteligencia colectiva de forma semejante al comportamiento de hormigas, aves y peces, cuyas conductas individuales se asocian no solo al estado de cada miembro del enjambre, sino a la conducta del enjambre en su totalidad. La estrategia de estos algoritmos consiste en la búsqueda del óptimo por todas las partículas simultáneamente de forma individual y grupal. Esto se logra asignando inicialmente posiciones espaciales y pequeñas velocidades iniciales aleatorias a todas las partículas. El algoritmo se ejecuta como una simulación, adelantandola posición de cada partícula en basea su velocidad, la mejor posicion conocida global en el espacio del problema y la mejor posición conocida de cada partícula. La función objetivoes muestreada después de cada actualización de la posición. Con el tiempo, a través de una combinación de exploración y explotación de las mejores posiciones conocidas en el espacio de búsqueda, las partículas convergen juntas hacia uno o varios óptimos.

- **Algoritmos Inmunes.** Se inspiran en la estructura y función del sistema inmunológico de los vertebrados. Una descripción simplificada del sistema inmunológico es un sistema destinado a proteger el organismo huésped de las amenazas de patógenos y sustancias tóxicas. Los patógenos incluyen un conjunto de microorganismos, como bacterias, virus, parásitos y polen. La perspectiva tradicional con respecto al papel del sistema inmunológico se divide en dos tareas primarias: la del descubrimiento y la de la eliminación del patógeno. Esta conducta está llamada a diferenciar las moléculas y células propias del huésped de otras potencialmente perjudiciales. Recientes perspectivas en el papel del sistema adicionan un sistema de mantenimiento, y otro cognoscitivo. Los enfoques populares incluyen procesos de: selección clonal, selección negativa, algoritmo dendrítico celular y algoritmos inmunes de redes. Los procesos adaptivos inmunoinspirados varían en su estrategia, muestran similitudes con las Redes Neuronales Artificiales y se utilizan básicamente para la solución de problemas de optimización.

A pesar de las posibilidades crecientes de las técnicas de optimización, incluidas las heurísticas, estas resultan conceptualmente insuficientes por sí solas para satisfacer las necesidades de la toma de decisiones de ingeniería, ya que para decidir correctamente los ingenieros tienen que hacer uso de técnicas gráficas y de simulación propias de los sistemas de ayuda al diseño, la planeación del proceso productivo, la planeación del proceso tecnológico y la operación del proceso.

1.9 Sistemas de ayuda al diseño, la planeación de la producción y la tecnología, a la operación del proceso y otros

En las últimas décadas se ha desarrollado una serie de técnicas para el procesamiento automatizado de la información que se identifican con las siglas CAD, CAPP, CAM, CAE, CAP, CAS y otras.

Los sistemas CAD (Computer Aided Design) constituyen sistemas computarizados destinados a la ayuda al diseño automatizado de productos, equipos, instalaciones, y todo tipo de obras propias de las ingenierías. Con ayuda de estos sistemas el diseñador tiene la posibilidad de

generar diferentes alternativas de productos, máquinas, construcciones, etc., en el sentido del cálculo de indicadores de eficiencia, otras variables de interés y representación gráfica a opciones de solución ideadas por él. A este tipo de sistemas se ha dedicado abundante bibliografía[2, 119,123,170,186,250]. El desarrollo de software de ayuda al diseño está determinado por el desarrollo de métodos efectivos de procesamiento y representación de imágenes gráficas y su parametrización a partir de valores de las variables de decisión del problema de diseño enfrentado.

El término sistemasCAPP (Computer Aided Process Planning) se refiere a los sistemas computarizados destinados a la ayuda a la elaboración automatizada de tecnologías de fabricación de objetos a partir de su diseño. El conjunto de técnicas de diseño y planeación para la fabricación asistidos por computadora ha experimentado un notable progreso en los últimos años, hasta el punto de que pueden considerarse suficientemente maduras y aplicarse de forma rentable a lo largo de todo el proceso de diseño y fabricación de un producto. De hecho, cuando las técnicas de diseño asistido por ordenador se contemplan de forma global e integrada a la planeación de la fabricación, el proceso se vuelve verdaderamente efectivo[25, 39, 41, 123, 144].

Los sistemas CAM (Computer Aided Manufacturing) constituyen sistemas computarizados destinados a la manufactura de acuerdo con la tecnología elaborada por el CAPP, generalmente mediante la ejecución de un código CNC generado por elCAPP. El concepto se vincula también al proceso de manufactura ayudado por robots en la industria de ensamble. En la bibliografía relacionada aparece un gran número de obras dedicadas a este tipo de sistemas[25,123,130, 239,250]. Por otra parte, los sistemas CAM se aplican a procesos discretos de la industria mecánica. En el caso de los sistemas continuos propios de las industrias química, metalúrgica y otras, la determinación de la información directiva que se establece como tarea a los sistemas de control de procesos de fabricación se denomina operación de procesos, cuya necesidad no queda suficientemente clara en la bibliografía clásica asociada al control[148, 187, 236].

En las últimas décadas se observa la tendencia a la integración del diseño, la planeación del proceso de fabricación y a la fabricación automatizada. Los sistemas que han alcanzado un

apreciable grado de integración se conocen bajo el término de sistemas CAD/CAM [39, 166, 171, 235, 239, 246].

Los sistemas CAE (Computer Aided Engineering) son sistemas computarizados destinados a la automatización del trabajo del ingeniero, e incluye los cálculos necesarios para la preparación de la tecnología, todo tipo de software de simulación de los más disímiles proceso, modelado geométrico, dibujo automatizado de las soluciones adoptadas y la elaboración de la documentación técnica asociada [86, 88, 175, 217, 246, 250].

Los sistemas CAP (Computer Aided Planning) están destinados a la toma de decisiones de producción, su secuenciación y el control de los procesos productivos. Se incluyen, frecuentemente, en el concepto CAP las tareas relacionadas con la dirección y el control del suministro material, el mantenimiento del equipamiento de las ventas y otras actividades de la gestión empresarial [56, 102].

Actualmente se observa la tendencia hacia la integración de los sistemas CAD/CAM con los sistemas del tipo CAP. Los sistemas que han alcanzado un grado apreciable de integración se denominan comúnmente como CIM (Computer Integrated Manufacturing) [11, 36, 166, 170, 171].

Los sistemas CAS (Computer Aided Simulation) están formados por sistemas computarizados destinados a la simulación de diferentes procesos productivos y tecnológicos. Además, complementan las posibilidades de los sistemas CAD, CAM, CAP, CAE, CIM. En el siguiente epígrafe se desarrollan en detalle el tema de la simulación y las herramientas computacionales asociadas.

En el caso más general, la búsqueda de solución a tareas de alta complejidad propias de las ingenierías responde a sistemas de modelos en los que la tarea de toma de decisiones a solucionar $\min \{Z(x) / x \in D\}$ está precedida por una tarea de optimización mono o multiobjetivo más sencilla $\min \{Q(x) / x \in D\}$ entre cuyas opciones de solución se requiere seleccionar aquella que mejor satisface, además, criterios subjetivos del decisor que se derivan de la observación de las imágenes gráficas obtenidas con ayuda de técnicas propias de sistemas de los tipos CAD, CAPP, CAM, CAE, CAP, CAS. La aplicación de estas técnicas presupone la realización de trabajos complejos de modelado físico y geométrico asociados y de simulación correspondientes.

1.10 Modelado y simulación

Se denomina modelado matemático al conjunto de métodos y procedimientos destinados a la elaboración de la descripción matemática de los objetos de dirección. La simulación es el proceso de reproducir un sistema físico con un modelo matemático. Aunque los modelos matemáticos se elaboran para la simulación y/o para la optimización de procesos, en el presente acápite se analizan tan solo los modelos para la simulación de procesos.

Por su designación se diferencian dos tipos de procedimientos de simulación: la simulación tradicional, utilizada para analizar los sistemas como parte del proceso de toma de decisiones de operación, diseño, fabricación, transportación, de políticas de utilización de recursos, almacenamiento y otros muchos y la simulación para el entrenamiento, la cual se emplea para entrenar a los usuarios en el uso de equipos de diferente tipo, de forma de elevar el desempeño individual [93, 175].

Aunque pueden modelarse y simularse muchos tipos diferentes de sistemas, en el presente trabajo prevalecen los modelos destinados para el diseño, la planeación para la fabricación, la operación de procesos, la planeación de la producción y otros, propios de la industria y los servicios. La simulación permite al ingeniero verificar que los valores adoptados por los indicadores de desempeño del proceso que se requiere reproducir son los adecuados utilizando modelos virtuales en lugar de experimentos físicos.

El uso de los modelos acorta significativamente los ciclos de diseño y fabricación, reduce los costos e incrementa la calidad de los objetos del diseño y la fabricación. En la etapa del diseño a los modelos integrados geométricos y de desempeño se les denomina prototipos virtuales. La simulación es particularmente importante para el diseño y la fabricación de sistemas multidisciplinarios en los que los componentes de diferentes disciplinas (mecánicas, eléctricas, control empotrado, etc.) están estrechamente acopladas para lograr el desempeño óptimo del sistema completo [57].

Al nivel del sistema, los componentes interactúan entre sí a través de una interfaz discreta. En general, tales sistemas pueden ser modelados utilizando sistemas de ecuaciones algebraicas [42], ecuaciones diferenciales ordinarias [29], ecuaciones diferenciales parciales [176], procedimientos complejos de cálculo que incluyen modelos de los tipos

anteriores y que son el resultado de la evolución histórica de las disciplinas técnicas asociadas [11] y sistemas de eventos discretos[247].

Uno de los requisitos básicos para la simulación en el contexto del diseño y la fabricación consiste en la adecuación al carácter no lineal, interconexión de fenómenos híbridos continuo-discretos que se encuentran con mucha frecuencia en el diseño de prototipos y en la simulación de los procesos de su fabricación su desempeño futuro durante la explotación.

En su forma más elemental, los *modelos basados en ecuaciones algebraicas no lineales y trascendentes* se expresan como: conocida un conjunto de funciones $f_i(x)$, se requiere determinar el valor del vector x^* para el cual se cumple:

$$f_i(x) = 0, x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in X; i = 1, \dots, n$$

Las funciones $f_i(x)$ pueden ser algebraicas, trascendentes o designar un procedimiento implícito de cálculo.

Los métodos de solución difieren en dependencia de la linealidad, del número de incógnitas, etc. En el caso lineal, los métodos directos se basan en la eliminación sucesiva de las incógnitas. Los más conocidos de este grupo son el método de eliminación de Gauss y la modificación de Jordan. Entre los métodos iterativos para la solución de sistemas de ecuaciones lineales se destacan los métodos de Jacobi y de Gauss-Seidel[42].

En los sistemas no lineales no resulta posible, en general, obtener las raíces exactas del sistema, por lo que se utilizan numerosos métodos iterativos[11, 42]. La determinación de los ceros del sistema $f_i(x) = 0$ se divide en dos partes: La primera tiene como objetivo hallar regiones, a cada una de las cuales pertenezca una y solo una solución del sistema y, en la segunda, se busca la raíz correspondiente con la precisión requerida.

Se denomina *ecuación diferencial ordinaria* la ecuación donde la función incógnita entra bajo el signo de derivada o diferencial y sólo depende de una variable independiente. En el caso general, una ecuación diferencial ordinaria de n -ésimo orden contiene una variable independiente, una función incógnita y sus derivadas o diferenciales hasta el n -ésimo orden inclusive y tiene la forma:

$$F(x, y, y', \dots, y^{(n)})$$

Muchos de los modelos fenomenológicos presentes en los procesos tecnológicos se basan en ecuaciones diferenciales ordinarias[251]. Así, procesos tales como los del

crecimiento demográfico, la desintegración radiactiva, el interés compuesto continuo, las reacciones químicas, la salida de un líquido por un agujero en un tanque, la velocidad de caída de un cuerpo, la rapidez de memorización y la corriente en un circuito en serie se describen por ecuaciones diferenciales de primer orden.

Por ecuaciones y sistemas de ecuaciones diferenciales ordinarias de segundo y mayor orden se describen los sistemas de resorte y masa, circuitos en serie LRC, flexiones de vigas y otros muchos procesos de todas las áreas de las ingenierías.

Para la simulación de procesos descritos por sistemas de ecuaciones algebraicas y en derivadas ordinarias se han desarrollado varios lenguajes de simulación de propósito general, los que se pueden clasificar de acuerdo a los siguientes criterios[47]: modelos basados en grafos vs basados en lenguajes, modelos procedurales vs declarativos, modelos multidominio vs modelos de dominio simple, modelos continuos vs modelos discretos, paradigma funcional vs paradigma orientado a objeto.

Los grafos han sido utilizados para representar sistemas interconectados en muchos dominios de modelado[33, 84, 90, 175, 223]. Al modelado con ayuda de grafos se denomina como *Modelado basado en grafos*. En el modelado de sistemas, la investigación se ha enfocado en tres esquemas: grafos enlazados (bond graphs), grafos lineales[175, 210, 224] y diagramas de bloques.

El modelado en grafos enlazados[88, 224] se basa en la conservación de la energía en las uniones que conectan o transforman los elementos a través de los enlaces. Los enlaces representan el flujo de energía entre los elementos modelados, como el producto de una variable de flujo o esfuerzo. Los elementos se conectan entre sí por uniones 1 ó 0 las que representan las leyes de corriente o voltaje de Kirchhoff, respectivamente. Aunque los grafos de enlace constituyen dominios independientes, ellos no son muy adecuados para el modelado de mecanismos en 3D[209, 212] o para sistemas híbridos continuo-discretos. Algunos lenguajes, tales como el CAMP-G y SIDOPS+ soportan modelos de grafos[87, 88] enlazados no lineales multidimensionales y contienen componentes en tiempo continuo y en tiempo discreto [46].

El segundo paradigma del modelado basado en grafos se construye sobre la teoría lineal y fue reconocido inicialmente por Trent[221] y Branin[46]. De forma similar a los enlazados,

estos grafos lineales representan los flujos de energía a través del sistema, expresados por variables y a través de ellas (también llamadas variables terminales).

Una arista en el gráfico lineal indica la existencia de un flujo de energía en un componente del sistema, mientras los terminales del componente corresponden a los nodos del gráfico. Para cada arista hay una ecuación terminal que expresa la relación entre sus variables terminales.

Las aristas y las ecuaciones terminales asociadas definen completamente las dinámicas de un componente. Tales grafos terminales de componentes individuales pueden ser parte de grafos sistémicos.

Los grafos del sistema se crean fusionando los nodos entre los que existen conexiones físicas. A diferencia de los grafos enlazados (bond-graphs), los modelos lineales reflejan directamente la topología del sistema [43, 165], son independientes del dominio y pueden ser fácilmente extensibles para modelar sistemas mecánicos 3D [33, 175] e híbridos [175]. Los grafos lineales conforman la representación subyacente del lenguaje de simulación VHDL-AMS.

El tercer grupo de paradigmas del modelado basado en grafos se configura con ayuda de diagramas de bloque, como en SimuLink o Easy5. Aquí, los modelos son especificados interconectando las entradas y rendimientos de modelos primitivos tales como integradores, multiplicadores, o sumadoras. Los sistemas complejos son modelados configurando sistemas encapsulados en modelos.

Típicamente, los modelos individuales en los diagramas de bloques se definen procesalmente. Como resultado, los solucionadores no pueden romper los lazos algebraicos, y el usuario debe reorganizar las ecuaciones del sistema manualmente [125]. Similar representación en bloques se utiliza para el modelado declarativo o orientado a objetos [87] y el modelado discreto por eventos [247]. Cada componente en el modelo conceptual se representa como un componente de un modelo basado en puertos.

Las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales se encuentran entre los tipos de modelos típicos más difundidos en las ingenierías metalúrgica, química, mecánica, civil, etcétera [11, 251]. Así, la deformación elástica, plástica, elasto-plástica de los metales, la transferencia de calor y masa, la difusión, las oscilaciones mecánicas, eléctricas y acústicas, así como otros

procesos típicos de la ingeniería se describen mediante ecuaciones diferenciales en derivadas parciales.

Las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales lineales de segundo orden son las que se encuentran con mayor frecuencia en las aplicaciones de ingeniería. Estas se clasifican en elípticas, hiperbólicas o parabólicas según los casos particulares que se obtienen de [222]:

$$\sum_{i=1}^n A_i \frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2} + \sum_{i=1}^n B_i \frac{\partial u}{\partial x_i} + Cu + D = 0,$$

donde los coeficientes A_i , B_i , dependen de los valores de $x_i \forall i = 1, \dots, n$ y pueden tomar valores positivos, negativos y cero. Esta dependencia se relaciona con la posible dependencia de esos mismos coeficientes de la variable de salida u para cada valor de las variables de x_i .

La expresión anterior se denomina forma canónica de las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales lineales de segundo orden. A partir de ella se realiza la siguiente clasificación:

- Ecuaciones diferenciales en derivadas parciales elípticas. Todos los A_i son diferentes de cero y tienen el mismo signo.
- Ecuaciones diferenciales en derivadas parciales hiperbólicas. Todos los A_i son diferentes de cero y, con la excepción de uno de ellos (generalmente, la que depende de t , tienen el mismo signo).
- Ecuaciones diferenciales en derivadas parciales parabólicas. Sólo uno de los coeficientes A_i (por ejemplo, A_k) es igual a cero, pero todos los demás tienen signos iguales, mientras que el coeficiente B_k correspondiente es también diferente de cero.

Para la solución numérica de los procesos descritos por ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, estudiados por las ingenierías se han desarrollado varios métodos [225] entre los que sobresalen por sus aplicaciones el método de las diferencias finitas [176], y el de los elementos finitos [209].

La idea central del método de diferencias finitas consiste en que la región continua de variación de las variables espaciales y del tiempo se sustituyen por un conjunto finito de puntos nodales. Al sustituirse en la ecuación que describe el proceso estudiado la ecuación original se sustituye por un sistema de ecuaciones algebraicas que lo describen de forma aproximada.

El método de elementos finitos es una técnica computacional que permite obtener soluciones aproximadas a las ecuaciones diferenciales parciales que surgen en aplicaciones científicas y de ingeniería. En lugar de aproximar la ecuación diferencial parcial directamente, como se hace por los métodos de diferencias finitas, el método del elemento finito utiliza un problema variacional que involucra la integral de la ecuación diferencial sobre el dominio del problema. Este dominio es dividido en varios subdominios denominados elementos finitos y la solución de la ecuación del diferencial parcial se aproxima por una función polinómica más simple sobre cada uno de los elementos. Estos polinomios tienen que ser identificados de conjunto para que la solución aproximada tenga un grado apropiado de suavidad sobre el dominio completo. Una vez que esto ha sido realizado, se evalúa la integral variacional como la suma de las contribuciones de cada elemento finito. El resultado es un sistema algebraico para la solución aproximada que tiene una dimensión finita en lugar de la ecuación diferencial original.

Una clase muy importante y difundida de modelos está dada por los llamados *sistemas de servicio masivo*. Ejemplos de modelos de esta clase se desarrollan para:

- hospitales y clínicas médicas,
- tiendas mayoristas y minoristas para la venta de disímiles productos,
- centros colectivos de alimentación,
- prestación de información,
- sistemas de transportación, en los que se incluyen: aeropuertos, puertos, estaciones de trenes, autobuses y otros.

El diseño de *sistemas multidisciplinarios complejos* requiere de la experiencia y colaboración de grupos de especialistas. Los diseñadores con entrenamiento en diferentes disciplinas colaboran con los analistas, ingenieros en manufactura, especialistas en mercadeo y gestión de negocios.

Una clase muy difundida de modelos está enmarcado en las técnicas de *modelado con ayuda de redes neuronales artificiales*. Una red neuronal imita enlaces entre las neuronas del cerebro para modelar procesos muy variados. Los modelos de redes neuronales asumen habitualmente que los cálculos se distribuyen en unidades simples denominadas neuronas, las que se interconectan entre sí y operan en paralelo, por lo que ellas son también

denominadas sistemas de procesamiento paralelo distribuido[78, 190]. La señal de salida y_j es una función f de la suma de señales de entradas ponderadas x_i . La función de activación f puede ser lineal, de umbral simple, sigmoideal, tangente hiperbólica o de base radial. En lugar de ser determinística, f puede ser una función probabilística, en cuyo caso y_j será una cantidad binaria, por ejemplo, +1 or -1.

La organización de las conexiones interneuronales y la naturaleza de ellas determinan la estructura de la red. Se distinguen las siguientes estructuras

- Redes por capas
- Redes recurrentes
- Redes de conexión lateral

La característica más interesante de las redes neuronales artificiales es su capacidad de aprendizaje. Hay dos modos principales de aprendizaje: el supervisado y el no supervisado. En la práctica, las reglas de aprendizaje especifican cómo adoptar los pesos sinápticos. Las aplicaciones abarcan las áreas comerciales, militares y tecnológicas, que van desde el reconocimiento de patrones hasta el modelado de la descripción de procesos y de los resultados numéricos de optimización en forma de reglas de conducta.

Las redes neuronales poseen una gran capacidad de cálculo, principalmente por dos motivos: su estructura distribuida y paralela de procesamiento masivo, y su habilidad para aprender; por tanto, generar salidas razonables a partir de entradas no disponibles durante el aprendizaje. Por lo general, las redes neuronales son robustas o, al menos, potencialmente tolerantes a los fallos, dado que al tener muchos nodos en su estructura, unos pocos de ellos o de enlaces que se dañen no degradan significativamente la calidad del sistema. El aprendizaje supervisado entrena la red con muestras de entrenamiento, modificándose los pesos de los sinápticos hasta que no se producen cambios significativos[190].

El entrenamiento de la red neuronal consiste en obtener los pesos y los umbrales que minimicen el error entre las salidas reales y las salidas propuestas por la red para cada vector de entrada para lo que se utilizan diferentes métodos de optimización incluyendo las metaheurísticas modernas.

El conocimiento incompleto de los procesos asociados a los sistemas de ingeniería, exige con frecuencia la búsqueda de nuevas relaciones previamente desconocidas con ayuda de

experimentos pasivos o activos, realizados estos últimos a partir de las técnicas de planificación del experimento, y el procesamiento posterior de los resultados. Las relaciones obtenidas de tal forma pueden ser consideradas también funciones de aproximación a partir del supuesto que las funciones originales f están dadas por los resultados experimentales y la función ϕ por la elaborada a partir de estos resultados.

1.11 Funciones de aproximación

La síntesis de los sistemas de ingeniería está vinculada a la necesidad de elaborar los modelos requeridos a cada nivel de agregación del sistema que asegure la precisión necesaria a ese nivel. Esta necesidad tiene que ver con el sistema de relaciones que conforman los modelos matemáticos de los procesos estudiados y la organización de los procedimientos de cálculo requeridos. Tradicionalmente esto se hace de manera intuitiva, sobre la base de la experiencia y el conocimiento acumulados en el devenir histórico de la evolución de cada disciplina; tiene que ver con la necesidad del incremento de la profundidad o precisión descriptiva del sistema según se reduce su envergadura. Al conformarse el sistema objeto de estudio como un elemento del sistema mayor del cual forma parte, las variables que describen su estado se consolidan o agregan en otras, las que constituyen variables detalladas para el sistema mayor. Como resultado el sistema estudiado queda descrito en el modelo del sistema mayor de forma aproximada, aunque queda claro que se requieren de sistemas complementarios por los diferentes elementos del sistema con modelos detallados del desempeño de cada elemento y que, de forma coordinada con el sistema mayor determinen el comportamiento del sistema mayor y de cada una de sus partes. No obstante, según ha sido reflejado en menor o mayor grado por algunos autores[167, 172, 185], como los elementos de todo sistema son también sistemas, se requiere considerar el comportamiento holístico no solo del sistema, sino también de cada una de sus partes. En otras palabras, se requiere organizar estructuras conciliadas de cada uno de los sistemas con sus elementos componentes, independientemente de su complejidad. En la elaboración de tales modelos aproximados se requiere de la utilización de funciones de aproximación, es decir, funciones analíticas próximas, por sus valores numéricos, a los resultados de

procedimientos complejos de cálculo, los que incluyen sistemas de ecuaciones, tablas, gráficos, funciones trascendentes y de carácter implícito, etc. Las funciones analíticas que satisfacen estos objetivos se denominan funciones de aproximación a los correspondientes procedimientos de cálculo.

El enfoque clásico para la solución de estos problemas consiste en que utilizando la información disponible sobre la función (indicador de procedimiento de cálculo) original f de un vector variable x es construida otra función φ próxima por sus valores numéricos a f que permite realizar la correspondiente aproximación y obtener la estimación del error obtenido como resultado de tal sustitución analítica[11, 42].

La realización numérica de este enfoque requiere del examen de las siguientes cuestiones fundamentales:

1. Forma de la representación de la función f
2. Clases de funciones que son próximas a f .
3. Criterio de proximidad entre la función original f y la de aproximación φ que debe ser satisfecho.
4. Determinación del error de aproximación, es decir, diferencia máxima que puede ser admitida entre los valores exactos y aproximados.

Con respecto a la forma de la función f se distinguen tres clases fundamentales de funciones: las funciones analíticas, las expresadas en forma de tablas o cualquier forma de representación gráfica o las constituidas por los resultados de procedimientos complejos de cálculo, incluidos los procedimientos de simulación y optimización.

Conocida la función continua $f(x)$ de un vector x se considera una red de sus valores numéricos en los nodos x^j :

$$\Omega_n : \left\{ a \leq x^0 < x^1 < \dots < x^N \leq b \right\}.$$

En relación con la clase de funciones de aproximación es necesario tomar en consideración dos factores fundamentales. En primer lugar ella debe reflejar las características propias de la original y, en segundo lugar, ser suficientemente cómoda para el tratamiento requerido, es decir, para realizar sobre ella las operaciones necesarias.

Se consideran tres grupos principales de funciones de aproximación:

- Las funciones trigonométricas, principalmente $\sin a_i x$ y $\cos a_i x$.
- Funciones que describen fenómenos de descomposición y acumulación y que incluyen funciones exponenciales del tipo $e^{a_i x}$
- Funciones monomiales, posinomiales y signomiales, las que son utilizadas para modelar una gran diversidad de modelos, las que se combinan frecuentemente con términos logarítmicos de las variables independientes y los dos grupos anteriores de modelos. Además de permitir muy buen ajuste, las funciones posinomiales y signomiales permiten construir modelos que responden a la estructura propia del modelo de la Programación Geométrica y próximos a él[11, 83].

Los procesos dinámicos, presentes en todas las áreas de la ingeniería, en especial en las relacionadas con la teoría de control, se describen con ayuda de los dos primeros tipos de funciones de aproximación.

La cuestión acerca de la exactitud de la solución que se obtiene es, en muchos aspectos, la fundamental. Por esta razón, la elección de los puntos nodales, de la clase de funciones de aproximación y del criterio de aceptación, se subordinan a la cuestión de la exactitud requerida. La posibilidad de aproximar la función f tan exactamente como se quiera se somete a investigación para cada caso concreto.

La cuestión sobre el criterio de aceptación consiste en determinar la distancia entre las funciones de aproximación y aproximada, y después, entre todas las clases de funciones de aproximación elegir aquella para la cual esta distancia es mínima. En calidad de criterio de aceptación se utiliza la minimización de la distancia entre la función original f y la aproximada φ en los puntos nodales x_i por una de las métricas L_p [11, 218]. Las métricas más utilizadas

son la L_2 , dada por $\rho = \sum_{i=1}^N [f(x_i) - \varphi(x_i)]^2$ y la de Tchebycheff, dada por

$$\rho = \max_{0 \leq i \leq N} |f(x_i) - \varphi(x_i)|.$$

Tiene particular importancia la elección adecuada de los puntos nodales. El enfoque más utilizado consiste en la partición de los valores de las variables independientes en un cierto número de subintervalos iguales[42]. Sin embargo, se debe tener cuidado en la posibilidad de

pérdida de información vinculada a áreas que contienen puntos de inflexión, de mínimos o máximos.

El intervalo de variación de la variable dependiente, en el caso particular de minimización de la distancia por la métrica L_2 , se determina, con una probabilidad de confianza superior al 95%, como $\hat{y} \pm 2\sigma$, donde \hat{y} es el valor calculado de \hat{y} la función de aproximación y σ es el error estándar entre los valores nodales de ambas funciones. En el caso de minimización de la distancia de Tchebycheff se adopta la máxima diferencia de ambas funciones entre los puntos nodales como máximo error esperado, aunque en ambos casos el error máximo posible depende de la calidad de elección de los puntos nodales.

Presenta mucho interés, el caso particular cuando para la función de aproximación la distancia $\rho_1 = \max_{0 \leq i \leq N} |f(x_i) - \varphi(x_i)|$ que para la función $y = f(x)$, representada por sus valores $y_i = f_i = f(x_i)$ se requiere construir la función de aproximación $\varphi(x)$ que coincida en los nodos x_i con los valores f_i , es decir, $\varphi(x_i) = f_i$.

Este método de aproximación, basado en el criterio de coincidencia de f y φ en los nodos x_i se denomina interpolación. Si el argumento x , para el cual se determina el valor aproximado de la función, pertenece al segmento $[x_0, x_n]$ el problema de determinación del valor de la función en el punto x recibe el nombre de interpolación en sentido estrecho. En cambio, si el argumento x está fuera del segmento $[x_0, x_n]$, el problema planteado se denomina extrapolación[42].

Conclusiones

Del estudio realizado sobre temas íntimamente vinculados al problema de la determinación de metodologías eficientes de análisis y síntesis de sistemas de ingeniería se pueden extraer las siguientes conclusiones:

1. Los fundamentos teóricos de las actuales técnicas y métodos de la ingeniería de sistemas y de los sistemas de ingeniería se encuentran en los resultados de la teoría de sistemas, cibernética y las más recientemente surgidas teorías de la complejidad. Ellas explican el funcionamiento de sistemas muy grandes propios de la naturaleza, la ingeniería y la sociedad.
2. La evolución tanto de la ingeniería de sistemas moderna, como de los sistemas de ingeniería ha conducido a la necesidad de la conciliación óptima de diferentes subsistemas, independientemente de su naturaleza y envergadura. Se requiere, por tanto, desarrollar principios que permitan descomponer adecuadamente los sistemas en subsistemas, analizar cada sistema como elemento componente del sistema mayor, conciliar las decisiones de los diferentes subsistemas de un mismo nivel entre sí y con el sistema mayor del cual forma parte, generar opciones de solución para las partes y seleccionar las soluciones que mejor satisfacen los intereses de todo el sistema.
3. Los métodos disponibles para el análisis de sistemas, previos a los propuestos en esta Investigación, no permiten, conceptualmente, elaborar pirámides de sistemas de preparación y toma de decisiones correspondientes a las pirámides de los objetos físicos o virtuales, las funciones de su operación, en el tiempo y considerando los múltiples objetivos a satisfacer, por lo que adquiere alta prioridad el desarrollo de metodologías adecuadas para el análisis y la síntesis de los sistemas estudiados por la ingeniería de sistemas y por los sistemas de ingeniería. Ambos tipos de sistemas serán denominados en lo adelante como sistemas de ingeniería con el único requisito de la consideración de la integridad de cada sistema con el sistema mayor del cual forma parte y se centrará la atención en el análisis y la síntesis de sistemas de cualquier grado de complejidad.
4. El uso eficiente de los sistemas de preparación y toma de decisiones requiere del

concurso de la inteligencia colectiva de todos los agentes involucrados de alguna forma en la toma de decisiones. Esto se refiere a los sistemas automatizados que generan soluciones de ingeniería, a los sistemas que evalúan las soluciones generadas por criterios sociales, políticos, ambientales, etcétera. El problema científico derivado consiste en la concatenación óptima entre los agentes. En calidad de agentes de un mismo sistema conviven humanos, sistemas automatizados y/o robots, los que pueden encontrarse en situación de cooperación o competencia entre sí.

5. El análisis multicriterial, apoyado en las técnicas de optimización, incluyendo las metaheurísticas modernas, resultan herramientas poderosas para la generación de opciones de solución de los sistemas y de sus elementos componentes, los que también constituyen sistemas. El modelado de un sistema es incompleto si no toma en cuenta el entorno donde deberá funcionar; es decir, el sistema mayor del cual formará parte y la posibilidad estructural de ser descompuesto en subsistemas, agentes y elementos.
6. Los modelos de los procesos reales son frecuentemente incompletos sin un componente de modelado gráfico. En estos casos, como parte componente de los procesos de preparación y toma de decisiones se hace necesaria la representación gráfica de las diferentes opciones de solución utilizando las herramientas proporcionadas por los sistemas de representación gráfica modernos, propios de los sistemas CAD/CAPP/CAM. Así mismo, el modelo básico empleado para la generación de opciones de solución con frecuencia debe ser completado con modelos complejos de simulación que permitan filtrar o reevaluar soluciones previamente generadas. De tal forma, un mismo elemento de un sistema puede ser descrito por varios modelos interrelacionados: un modelo de optimización mono o multicriterial, uno o más modelos gráficos (geométricos) y uno o más modelos complementarios de simulación.
7. El requisito de proximidad de los modelos de preparación y toma de decisiones a los procesos que ellos describen requiere del desarrollo de métodos y procedimientos adecuados de aproximación de funciones de alta complejidad a otras de mayor sencillez descriptiva, pero con resultados de cálculo próximos a las funciones

originales. El modelo de cada elemento a cada nivel constituye un modelo aproximado con respecto al de los elementos del nivel superior, y un modelo detallado con respecto al de su propio nivel. Así, la complejidad descriptiva de los procesos crece según se baja en la pirámide sistémica y se reduce según se sube en ella.

CAPÍTULO 2

ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS DE INGENIERÍA

La complejidad descriptiva de los sistemas de ingeniería requiere de la utilización de múltiples modelos para su descripción. La determinación de estos modelos no puede dejarse a la simple imaginación del desarrollador del sistema, sino que debe ser el resultado de un trabajo de análisis sistémico de los procesos estudiados. La complejidad de los sistemas obliga, por otra parte, a su descomposición en elementos y a la organización de determinados procedimientos de conciliación de decisiones entre las diferentes partes del sistema, y de los diferentes indicadores de eficiencia de las partes y del todo.

Así, se requiere del desarrollo de metodologías que permitan someter a análisis sistémico las tareas enfrentadas, ubicar estas tareas en la pirámide de tareas donde ellas se encuentran, descomponer las tareas en subtarear componentes, desarrollar modelos conceptuales apropiados a esas tareas, concebir los modelos concretos que se deben desarrollar, parametrizarlos, elaborar los modelos de simulación, informativos y gráficos complementarios a los de optimización mono o multicriterial. El conjunto de estos trabajos se denominarán en lo adelante análisis del sistema,

2.1 El concepto de sistemas de ingeniería

La definición realizada en el capítulo 1 del concepto *sistemas de ingeniería* como los sistemas para hacer ingeniería presupone sistemas de cualquier grado de complejidad destinados para la ayuda a la preparación y toma de decisiones bajo criterios múltiples, incluyendo indicadores de carácter subjetivo, en los que las decisiones se integran al sistema mayor del cual forma parte el sistema estudiado y, si se requiere,

descomposición por elementos. Como se estudia en adelante, los criterios pueden ser evaluados con ayuda de modelos de diferente tipo: de optimización, simulación, representación gráfica. Se presta especial interés a los sistemas requeridos para el diseño, la generación de tecnologías, la operación de procesos, la planeación de la producción y su integración a la gestión económica de las empresas. Como se fundamenta en la Introducción, la característica principal de todo sistema de ingeniería consiste en su integración con el medio circundante en el cual deberá funcionar. Solo así a la esencia piramidal de los objetos físicos y virtuales que caracterizan el universo se le puede anteponer una estructura piramidal de sistemas de preparación y toma de decisiones que asegure el cumplimiento del sistema de preferencias establecido para todos los elementos componentes de toda la estructura. Sin el desarrollo de tales estructuras de sistemas resultaría imposible el máximo aprovechamiento de todo tipo de recursos, indispensable para la supervivencia misma de la humanidad.

Se define explícitamente por el autor, por primera vez, el concepto de preparación de decisiones, aunque de forma implícita aparece reflejado en la obra de otros muchos autores [189, 203, 236].

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

En el año 2000 se presentaron en el libro *Sistemas de Ingeniería* [11] algunos resultados del entonces llamado *enfoque integrador para la concepción y el diseño de sistemas de ingeniería, para la preparación y toma de decisiones bajo criterios múltiples*. Este enfoque constituyó el punto de partida del resultado de investigación propuesto. La metodología expuesta aporta el primer intento reflejado en la literatura científico-técnica internacional de satisfacer la necesidad de análisis y síntesis de sistemas de ayuda a la toma de decisiones de ingeniería. La solución de estas tareas incluye como componentes, por un lado, la solución de los problemas de la descomposición de tareas de gran complejidad y de la composición de soluciones entre las tareas resultantes, y por el otro el de la conciliación de criterios interrelacionados.

Se requiere conciliar decisiones entre las partes de un sistema, las funciones de las partes y del todo, en el tiempo y persiguiendo múltiples objetivos. Esta conciliación se realiza mediante una estructura, la que necesariamente está relacionada con la estructura del modelo matemático del objeto o proceso asociado. Sin embargo, en la literatura científico-técnica disponible se estudiaban tan solo las diferentes estructuras existentes para la organización de los sistemas complejos, sin establecer vínculo alguno con la estructura misma del modelo matemático del sistema analizado. Esta limitación no era superada tampoco por el enfoque integrador mencionado.

2.2 Correspondencia entre las estructuras de los procesos de toma de decisiones y de los modelos matemáticos de los sistemas asociados

Este tema se estudia a partir de la definición predominante de sistema como conjunto de elementos interrelacionados [126, 154, 167, 189], considerando, además, los conceptos de intensidad de los enlaces y de propiedades “emergentes”.

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

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

La *intensidad* g_j de cada relación G_j entre los elementos de un sistema es función del estado adoptado por cada objeto $s \in S$, es decir, $g_j = g_j(e^k)$, $\forall e^k \in E = (I_1 \times I_2 \times \dots \times I_n)$. Las intensidades de las relaciones entre los objetos (elementos) de un sistema suelen estar restringidas superior o inferiormente.

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

sistema.

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

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

Como cada Sistema es a parte componente de otro Sistema de mayor envergadura, con el conjunto de relaciones H , entonces se deben considerar también las restricciones a sus intensidades $h(u)$.

Según se puede constatar por los resultados de las investigaciones de aplicación que se utilizan en lo adelante en calidad de ejemplos de los resultados teóricos, los componentes cuantificables de Y de todo el sistema se determinan, para diferentes casos particulares:

- Como la suma de los correspondientes a sus elementos más una componente sistémica derivada de la interacción entre ellos.
- Como la suma de los correspondientes a sus elementos para las combinaciones de aquellas soluciones que satisfacen las restricciones sistémicas y, al mismo tiempo, aseguran el mejor valor de esta suma.
- Integralmente para todo el sistema sin vínculo directo a los indicadores de sus elementos

Sistemas de dirección

En general, todo sistema de dirección se puede representar de la forma mostrada en la figura 2.1 [146, 167]. El sistema de dirección actúa sobre el sistema-objeto y obtiene información de él sobre el resultado de las acciones aplicadas anteriormente. Además, y esto resulta esencial, el sistema director recibe también acciones directivas externas que deben ser satisfechas [139, 238]. Si se toma como sistema director una empresa de producción y como sistema-objeto (o simplemente objeto) al conjunto de sus talleres, las acciones externas de dirección pueden ser ejercidas, por ejemplo, por una corporación

a la que puede estar subordinada la empresa. En este caso, el sistema de dirección estudiado cumple, a los efectos de la corporación, la función de un elemento más del objeto de dirección. Como se puede apreciar, de la corporación emanan directivas de carácter general y el aparato empresarial realiza un conjunto de acciones sobre el objeto de dirección encaminadas al logro de las tareas emanadas del sistema mayor (la corporación). El objeto de dirección sufre determinadas perturbaciones del medio circundante, es decir, influencias inesperadas sobre las cuales muchas veces no se dispone de información. Ejemplos de perturbaciones se pueden considerar el mal tiempo, variaciones en el mercado, averías en el proceso productivo, y otras.

Se necesita, de tal forma, de un sistema de dirección (del sistema-objeto) que tome las decisiones adecuadas y las ejecute. Como consecuencia de las relaciones existentes entre los elementos del objeto, las decisiones que se adopten para todo el sistema tienen que estar conciliadas por los diferentes elementos del sistema de dirección. Dicho de otra forma, la estructura compleja del sistema-objeto condiciona, en el caso más general, una estructura compleja del sistema de dirección [11, 167, 231, 237].

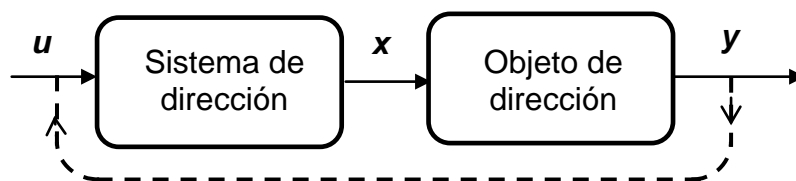


Fig. 2.1 Representación general de un sistema de dirección

La toma de decisiones para todo el objeto requiere la preparación de decisiones por cada elemento del sistema y de la posterior conciliación de decisiones entre ellos.

Para hacer cumplir las decisiones adoptadas, el sistema director necesita de un sistema de control [148, 187, 236] encargado de asegurar la ejecución de estas decisiones. El

procesamiento de la información sobre el resultado de las acciones ejecutadas y su presentación en forma asequible al sistema director se hace indispensable un sistema de información. En el caso general, la estructura del sistema de control está estrechamente relacionada con la estructura del sistema de toma de decisiones, pero este estudio se escapa de los objetivos del epígrafe. De tal forma, el sistema de dirección analizado pudiera representarse según se muestra en la figura 2.2.

En lo adelante, las acciones externas serán representadas mediante la letra w ; las de todo el sistema, por la letra u ; las acciones del sistema de dirección del elemento i del sistema objeto, por x_i ; las del sistema de control sobre cada elemento del sistema objeto, por x'_i (las cuales no son idénticas a las acciones del sistema de preparación y toma de decisiones, pues aunque el sistema de control procura asegurar los valores requeridos de x_i , no siempre logra alcanzarlos [187]. Las perturbaciones se simbolizan por la letra ζ .

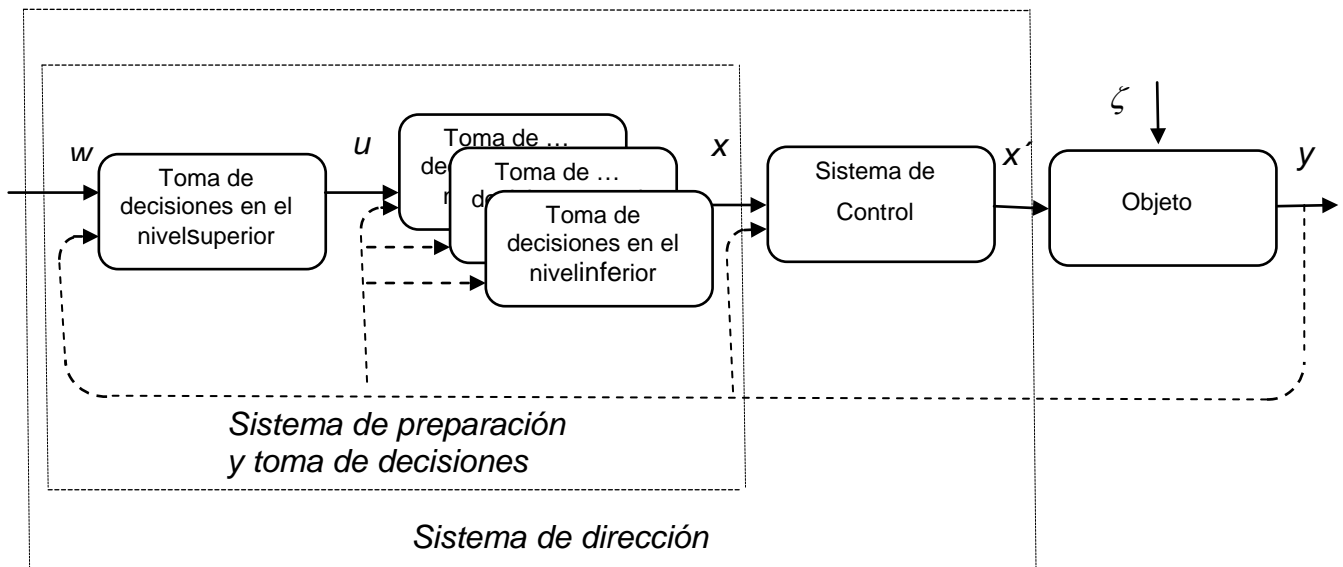


Fig. 2.2 Representación de un sistema de dirección por bloques principales

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

La cibernética es la ciencia que estudia los procesos de dirección en su sentido más amplio. Los principios generales del enfoque cibernético, expuestos por primera vez por Norbert

Wiener [236], fundador de esta ciencia, se utilizan como una de las bases en la elaboración de la metodología presentada, en lo adelante, para el análisis y la síntesis de sistemas de ingeniería para la preparación y toma de decisiones bajo criterios múltiples.

Según el primer principio, todo objeto se encuentra bajo la acción permanente de entradas, las que determinan su estado. Las entradas dirigidas permiten variar el estado del objeto con el fin de alcanzar determinados objetivos. Las perturbaciones constituyen entradas a las que no tiene acceso el sistema de dirección y reflejan, entre otras, la acción de otros elementos del mismo sistema al que pertenece, en calidad de elemento, el sistema de dirección del objeto dado o de otros sistemas. En lo adelante, las entradas dirigidas se simbolizan por el vector $x = x(x_1, x_2, \dots, x_n)$ y constituyen estados que se establecen para el sistema–objeto por el sistema de dirección; las perturbaciones, por el vector $\zeta = \zeta(\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_\kappa)$; y las salidas, por el vector $y = y(y_1, y_2, \dots, y_m)$ de las propiedades del sistema, resultantes de las interacciones entre sus elementos; w el vector de variables de decisión del sistema de mayor envergadura.

De acuerdo con el segundo principio, existe un conjunto X , tal que $x \in X$ y la tarea consiste en hallar un valor x^* que asegure que $x^* = \arg \text{Pref} [Y(x)]$, donde Pref designa un operador de preferencia de las soluciones de todos y cada uno de los elementos del sistema, a partir de los valores adoptados por el vector función de indicadores de eficiencia de dimensión m del sistema $Y(x)$; $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in X$ vectores de decisión de todos y cada uno de los n elementos del sistema, $x_s = (x_1^s, \dots, x_r^s) \in X_s$ variables de decisión del elemento s del sistema. Por otra parte, cada uno de los elementos del sistema se encuentra en interacción con los restantes elementos.

El tercer principio establece que las perturbaciones no son necesariamente conocidas, o bien su conocimiento puede ser incompleto. Se debe señalar una circunstancia no estudiada por Wiener en sus trabajos: las perturbaciones pueden ser el resultado de la acción sobre el sistema dado de otros sistemas que se encuentran relacionados con él; mientras mayor sea el grado de organización de un sistema, menor será la influencia de las perturbaciones sobre cada elemento que lo conforma. Así, si el sistema estudiado concilia sus decisiones con el de mayor envergadura, del cual es un elemento componente, los valores que adoptan las variables de decisión de los otros sistemas vinculados pueden constituir simplemente datos de entrada que se deben tomar en cuenta, mientras que, en ausencia de conciliación, los

valores desconocidos de estas variables constituyen perturbaciones no conocidas.

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

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

El autor del presente trabajo propone, como un principio adicional a los establecidos por Wiener, el siguiente: el sistema de mayor envergadura, al que pertenece el sistema estudiado, toma también decisiones $u = u(u_1, u_2, \dots, u_n)$, cuyos valores son de obligatorio cumplimiento para los diferentes elementos del sistema e influyen necesariamente en el comportamiento y los valores de los indicadores de eficiencia de cada uno de ellos, incluyendo el sistema estudiado. Si se designa por u el vector de variables de decisión del sistema en su integralidad, entonces $x^* = \arg \text{Pref} [Y(u, x)]$. Se requiere asegurar el cumplimiento de un conjunto de restricciones a las intensidades de las relaciones internas $g_j = g_j(e^k)$ del sistema, para cada posible decisión $u \in U$. El conjunto U está dado por las restricciones a las intensidades $h(u)$ de las relaciones del sistema con el exterior.

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

A partir de la definición del concepto de sistema, de la interpretación del segundo principio del enfoque cibernético y del principio complementario propuesto por este autor, la estructura

general de los modelos matemáticos de los sistemas de toma de decisiones se puede expresar como:

$$Pref\{Y(u, x) / h(u) \geq 0; g(u, x) \geq 0\} \quad (2.1)$$

Donde:

Pref: Designa el sistema de operadores de preferencia del eventual decisor, dependiente de las soluciones de todo el sistema (u, x) a partir de los valores adoptados por $Y(u, x)$.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

de existencia X_s para cada elemento $s \in S$; del espacio de existencia X para el conjunto de variables de decisión de los elementos del sistema, y del espacio de existencia U para las variables de decisión de todo el sistema, las que relacionan el sistema dado con otro de mayor envergadura del cual es, asimismo, parte componente.

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

Donde:

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

Como se estudiará en detalle posteriormente, los componentes no cuantificables de $Y(u, x)$ se toman en consideración mediante la elección adecuada de una solución con valores de los componentes de $Z(u, x)$ próximos a:

$$\text{Min}\{Z(u, x) / h(u) \geq 0; g(u, x) \geq 0\} \quad (2.2)$$

El modelo (2.2) constituye una aproximación al modelo (2.1) y, en correspondencia con lo estudiado por Jachaturov [121], las soluciones a (2.1) se encuentran entre las soluciones a (2.2) que se diferencian por cada uno de los criterios $z_j(u, x)$, en no más de una cierta magnitud α_j siempre que se cumplan las condiciones establecidas en ese trabajo.

Existe gran variedad de casos particulares de posibles formulaciones del modelo general (2.2), propias de los respectivos enfoques de solución. Los esquemas expuestos se fundamentan en los de descomposición de las correspondientes tareas de toma de decisiones y se vinculan con la experiencia del autor. Pudieran existir, probablemente, otros esquemas alternativos.

Muchos autores se han ocupado del estudio de las estructuras organizativas y de las correspondientes estructuras de descomposición de tareas de toma de decisiones. Entre los trabajos que a juicio del autor tienen una fundamentación basada en enfoques sistémicos se encuentran las que aparecen en [26, 56, 146, 170, 189]. En el campo de las aplicaciones se establecen las estructuras de conciliación de decisiones de acuerdo con las particularidades de la tarea que se debe solucionar (ver, por ejemplo, [170, 235]). Sin embargo, en la literatura disponible no se analiza la relación existente entre la estructura matemática de la tarea de toma de decisiones y la estructura adecuada del proceso de toma de decisiones. A continuación se estudian algunas estructuras específicas que pudiera tener el modelo (2.2) que sugieren esquemas de descomposición en estructuras semejantes a las utilizadas por el ser humano. Con seguridad la investigación ulterior del tema enriquecerán los resultados que se proponen.

2.2.1 Estructura descentralizada

Sea (2.2) representable en la forma:

$$\text{Min}\{Z(z_1(x_1), \dots, z_n(x_n)) \mid g(x_s) \geq 0; \forall s \in S\} \quad (2.3)$$

Donde:

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

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

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

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

La solución de (2.3) se reduce a la solución independiente de tareas de menor dimensión:

$$\text{Min}\{z_s(x_s) \mid g_s(x_s) \geq 0; \forall s \in S\} \quad (2.4)$$

Es decir, si la tarea de toma de decisiones tiene la estructura o es próxima al modelo (2.3), entonces puede ser resuelta mediante la búsqueda de soluciones a las subtarear componentes, lo que es consecuencia de la debilidad de los enlaces de los elementos del sistema entre sí. En este caso, el modelo (2.3) de la tarea de toma de decisiones se denomina directamente descomponible. La estructura organizativa más adecuada del sistema se conoce como *estructura descentralizada* y se caracteriza por la existencia de sistemas independientes por cada elemento del sistema. No se requiere, por tanto, la conciliación de decisiones entre los subsistemas (subtarear).

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

En la práctica del diseño de sistemas ha prevalecido, hasta el momento, la tendencia a la solución independiente de las tareas, lo que se corresponde con la organización de estructuras de este tipo, lo que está determinado por la sencillez de solución de las tareas, pues no se utilizan estructuras de conciliación. No obstante, como los sistemas reales se caracterizan por la presencia de relaciones esenciales entre los elementos del sistema objeto, se puede concluir que el campo de aplicación de esta estructura está básicamente restringido a los casos cuando el costo de diseño e implantación de un sistema de dirección para la conciliación de decisiones entre los elementos del sistema objeto es mayor que las pérdidas derivadas de su ausencia, o cuando el conocimiento insuficiente de las tareas vinculadas impide el desarrollo de procedimientos efectivos de conciliación de decisiones. Se debe, no obstante, notar que el desarrollo de estructuras conciliadas está siempre precedido por el desarrollo de sistemas individuales. La consideración de enlaces fundamentados entre las

subtareas permite, posteriormente, desarrollar los procedimientos requeridos de conciliación de decisiones con ayuda de algunas de las estructuras que se estudian en próximos acápite.

Aplicación 1: Generación de tecnologías de soldadura por explosión

Una de las vías de conciliar propiedades mecánicas y tecnológicas diferentes, con bajos costos de producción, la constituyen las tecnologías de soldadura y conformado por explosión. El uso de la energía de la explosión para la fabricación de semiproductos y piezas

se caracteriza por equipamientos relativamente sencillos, por concentrar altos niveles de energía en pequeños volúmenes y costos relativamente bajos. Sin embargo, requiere de métodos cuidadosos de manipulación y de la generación de tecnologías científicamente fundamentados [11, 54]. La investigación correspondiente fue resultado de una Tesis de doctorado (Ver Aval 2).

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

Formulación del problema de generación de la tecnología

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

De tal forma, se dispone de los siguientes datos:

M_1 :Material base.

M_2 :Material de la plancha volante.

A: Espesor de la plancha volante.

τ^{min} : Valor mínimo de la resistencia al cizallamiento de la unión soldada, determinado por las condiciones de operación del compuesto bimetálico.

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

tercera variable de decisión la velocidad de detonación, entonces el objetivo sería minimizar la altura del explosivo. Esta última composición de variables es la que se emplea en esta aplicación.

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

Así, la composición de variables de decisión de la tarea estudiada es D - velocidad de detonación de la sustancia explosiva empleada, h - espacio que separa las planchas que se sueldan, E - tipo de explosivo a seleccionar. El indicador de eficiencia adoptado es H - altura de explosivo depositado sobre la plancha volante.

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

$$\text{Minimizar } H(D, E) \quad (2.5)$$

Cada tipo de explosivo tiene asociada una función propia para la determinación de la relación $H(D, E)$. Para el caso específico de la amonita A-20.

$$H = -5583,3 - 0,4626D + 848,73 \ln D + 5,663 \cdot 10^{-9} D^{3,303}$$

Asegurando el cumplimiento de la restricción

$$\tau(D, h, E) - 3S \geq \tau^{min} \quad (2.6)$$

$$D^{min}(E) \leq D \leq D^{max}(E) \quad (2.7)$$

$$(2.8) \quad \frac{a}{2} \leq h \leq 2a$$

Donde:

τ : Resistencia al cizallamiento promedio, obtenida como resultado de la explosión.

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

$D_{min}(E)$, $D_{max}(E)$: Valores mínimo y máximo de velocidad de detonación propios del explosivo E utilizado.

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

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

Aplicación 2: Optimización multiobjetivo de procesos de doblado de tubos cilíndricos metálicos por el método de arrastre

Una de las tecnologías de doblado de tubos cilíndricos está constituida por la de doblado de tubos cilíndricos metálicos por arrastre[117, 118]. La investigación correspondiente fue objeto

de una Tesis de doctorado (ver Aval 15). En la figura 2.3 se ilustra el proceso tecnológico asociado. El tubo está sometido a tensiones longitudinales circunferenciales y radiales debidas al momento de flexión, la tracción axial y la presión interna. Son necesarias las siguientes cargas:

- a) M - Momento del doblado: a consecuencia de este momento se produce cierto esfuerzo en la sección transversal del tubo σ_{xm} el cual permite realizar el doblado,
- b) Carga de apriete P entre los dados de presión y soporte
- c) Otra carga también de apriete P_1 entre el dado mordaza y la parte recta del dado curvo, estas dos últimas cargas producen por rozamiento la carga axial F en la misma sección y esta a su vez un esfuerzo axial σ_{xf} esencial para el doblado. El mandril proporciona un esfuerzo radial p_i contra la superficie interna del tubo que impide el colapso de éste hacia adentro y a consecuencia de todas estas cargas se produce también cierto esfuerzo circunferencial en el tubo σ_c .

En la figura 2.3 se ilustran las cargas que se producen en el proceso de doblado.

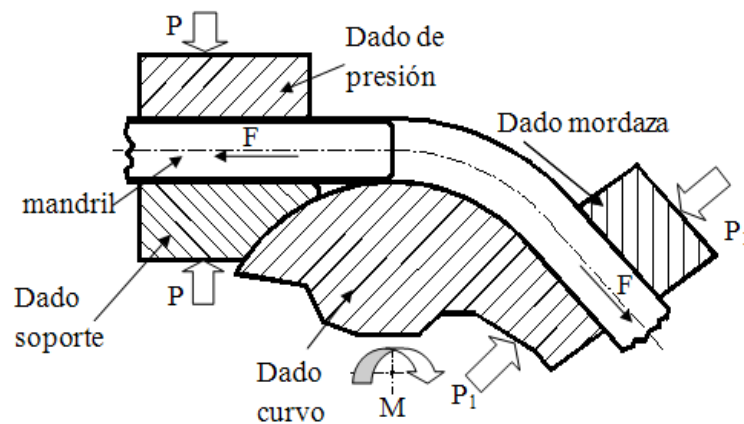


Fig. 2.3 Ilustración del proceso de doblado de tubos por arrastre.

Las variables de enlace de esta tarea con el sistema mayor está dada por:

- Material a doblar
- Radio de doblado (R)
- Diámetro del Tubo a doblar (D)
- Espesor del tubo (t)
- Ángulo de doblez.

Entre los defectos más comunes de fabricación por doblado de tubos se presentan como los más comunes, intrínsecos al proceso, los siguientes: el adelgazamiento del espesor de la pared del tubo en la parte externa de la curva, el aplanamiento en la pared del tubo y la formación de arrugas en la pared interna de la curva. Los indicadores técnicos y económicos del proceso de fabricación se determinan por la minimización del efecto conjunto de estos defectos durante la fabricación. Así, se seleccionan como indicadores de eficiencia, los siguientes:

- Mínimo adelgazamiento
- Mínimo aplanamiento
- Mínima arruga

Las variables que pueden ser gobernadas a voluntad durante la fabricación son:

- Presión interna (p_i)
- Esfuerzo axial (σ_{xf})

Otras variables de interés:

Para la solución de la tarea estudiada resulta indispensable la determinación de los intervalos límites de definición de las variables de decisión, y aquellas variables que determinan los valores de adelgazamiento, aplanamiento y arruga del tubo doblado.

De la clasificación de variables realizadas se deduce el siguiente modelo matemático conceptual:

$$\text{Minimizar } Z = \max[w_1(f_t - f_t^d), w_2(f_p - f_p^d), w_3(f_w - f_w^d)] \quad (2.9)$$

Asegurando:

$$p_i^{inf} \leq p_i \leq p_i^{sup} \quad (2.10)$$

$$\sigma_{xf}^{inf} \leq \sigma_{xf} \leq \sigma_{xf}^{sup} \quad (2.11)$$

Donde:

f_t es la función que caracteriza el adelgazamiento.

f_p es la que caracteriza el aplanamiento.

f_w es la función que caracteriza la formación de arrugas.

f_i^d son los valores deseados para cada función objetivo.

w_i es el valor de pesos asignado al objetivo i , el que refleja la importancia relativa concedida al peso i .

$p_i, p_i^{inf}, p_i^{sup}$ es la presión interna en el tubo y sus valores admisibles inferior y superior, respectivamente.

$\sigma_{xf}, \sigma_{xf}^{inf}, \sigma_{xf}^{sup}$ es el esfuerzo axial en el tubo y sus valores admisibles inferior y superior, respectivamente.

La función objetivo (2.9) expresa la intención de buscar un compromiso razonable entre el adelgazamiento, el aplanamiento y las arrugas en la pieza terminada.

Las restricciones (2.10) y (2.11) establecen, respectivamente, la necesidad de que la presión interna del tubo y el esfuerzo axial se encuentren entre límites inferiores y superiores admisibles.

La identificación del modelo y el desarrollo e implementación del método de solución permiten la solución de esta tarea, la cual se presenta de forma aislada, correspondiente a la estructura descentralizada mientras no se le inserte en el sistema mayor de diseño y fabricación. La inserción de esta tarea (y del sistema correspondiente) en el sistema mayor con ayuda de las variables de enlace se realizaría de acuerdo con determinada estructura de conciliación de decisiones, de forma semejante a la que se estudia en la Aplicación 10 del presente capítulo.

2.2.2 Estructura centralizada

Sea (2.2) representable en la forma:

$$\text{Min} \{ Z(u_1(x_1), \dots, u_n(x_n)) / g(u_1(x_1), \dots, u_n(x_n)) \geq 0 \} \quad (2.12)$$

Entonces, su solución es equivalente a la tarea de optimización en variables “agregadas” u_s :

$$\text{Min} \{ Z(u_1, \dots, u_n) / g(u_1, \dots, u_n) \geq 0 \} \quad (2.13)$$

La solución de (2.13) en las variables de decisión de los elementos de nivel inferior, en sus variables originales correspondientes a las componentes de u , se determina por las raíces de las expresiones:

$$u_s(x_s) = u_s^*; \forall s \in S \quad (2.14)$$

Donde:

u_s^* : Valor adoptado por u_s en la solución a (2.13).

Si la estructura de la tarea de toma de decisiones tiene la forma o resulta próxima a (2.12), entonces puede ser solucionada mediante la búsqueda de solución a la tarea en variables agregadas (2.13) y de los valores de las variables de decisión para cada elemento del sistema asociados a la solución encontrada. En este caso se requiere un órgano de toma de decisiones que solucione la tarea (2.13) y las n tareas (2.14), lo que no niega la posibilidad de establecer subsistemas por elementos especializados en el cálculo de (2.27). Esta tarea se denomina agregable directamente y a la estructura organizativa asociada se le da el nombre de *estructura centralizada directa* (figura 2.4) y se caracteriza por la toma centralizada de decisiones por el sistema central y su implementación directa a los elementos del sistema-objeto.

Un sistema con esta estructura puede constituir un elemento de un sistema mayor con estructura descentralizada, en correspondencia con lo estudiado en 2.2.1, o bien con estructura disperso conciliada o jerárquico participativa, las que se estudian en próximos acápite.

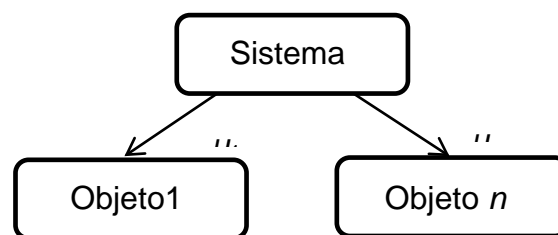


Fig. 2.4 Estructura centralizada directa

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

La aplicación se corresponde con el primer trabajo de investigación desarrollado por el autor, recién graduado [15]. Se parte del supuesto que la efectividad de todo el sistema empresarial depende básicamente de la asignación de volúmenes de producción a ser ejecutados por los diferentes elementos del sistema productivo, considerando un conjunto de criterios de optimalidad en cumplir la tarea productiva y los costos unitarios por

producto, productividad y fondo de tiempo disponible en cada taller, independientes del volumen y las condiciones de realización del proceso productivo[11, 15]. Para el caso en que la capacidad de la empresa esté determinada por un grupo de talleres que trabajan en paralelo, obviando el carácter multicriterial del problema, se pudiera utilizar el siguiente modelo de programación lineal:

$$\text{Minimizar} \quad \sum_{i=1}^{\bar{i}} \sum_{j=1}^{\bar{j}} c_{ijk} u_{ij} \quad ; k = 1, \dots, r \quad (2.15)$$

$$\text{Asegurando:} \quad \sum_i \frac{u_{ij}}{p_{ij}} \leq T_j, \quad j = (1, \dots, \bar{j}), \quad (2.16)$$

$$\sum_j u_{ij} \geq d_i, \quad i = (1, \dots, \bar{i}) \quad (2.17)$$

Donde:

c_{ijk} : Coeficiente del criterio k durante la producción del producto i en la unidad (taller) j .

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

T_j : Tiempo nominal disponible en la unidad j .

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

d_i : Demanda existente del producto i .

Las restricciones (2.16) limitan el fondo de tiempo a utilizar por cada uno de los talleres, mientras (2.17) aseguran el cumplimiento de los compromisos asumidos por la empresa en cada uno de los diferentes productos. El modelo pudiera contener restricciones a cualquier tipo de recursos.

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

Sea (2.2) representable en la forma:

$$\text{Min}\{Z(Z_1(u_1, x_1), \dots, Z_n(u_n, x_n) / h(u) \geq 0; g_s(u_s, x_s) \geq 0; \forall s \in S\} \quad (2.18)$$

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

Primer caso: la solución de (2.18) se reduce a la solución de

$$\text{Min}\{ Z(Q_1(u_1), \dots, Q_n(u_n)) / h(u) \geq 0 \} \quad (2.19)$$

Donde:

$$Q_s(u_s) = \text{Min} \{ Z_s(u_s, x_s) / g_s(u_s, x_s) \geq 0 \} ; \quad \forall s \in S, u / h(u) \geq 0 \quad (2.20)$$

$$x_s = x_s(u_s^{opt}) \quad (2.21)$$

Si la estructura de la tarea de toma de decisiones toma la forma (2.18) entonces ella puede ser solucionada mediante:

- La búsqueda de solución a (2.20), para cada elemento s del sistema, para valores discretizados admisibles de las variables de coordinación u (o todos sus valores admisibles, en el caso de u discreta).
- La determinación de las funciones de aproximación $Q_s(u_s)$, $x_s = x_s(u_s^{opt})$.
- La solución de los modelos aproximatorios (2.19) con el fin de hallar valores próximos al óptimo de $u = (u_1, u_2, \dots, u_n)$ correspondientes a valores establecidos de las variables de coordinación por el nivel central a los sistemas de toma de decisiones de todos y cada uno de los elementos del sistema.
- El cálculo de los valores de $x_s^{opt}(u_s)$, para $u_s = u_s^{opt}$.

Esta tarea se denomina agregable indirectamente, mientras la estructura organizativa más adecuada del sistema, muchos autores se refieren a ella con el nombre de estructura jerárquica y se caracteriza también por la toma centralizada de decisiones por el sistema central y su implementación con ayuda de los sistemas locales. La calidad de funcionamiento de esta estructura depende de la calidad de elaboración de las funciones de aproximación (2.20) y (2.21). Estas últimas constituyen reglas de conducta de los sistemas del nivel inferior [11, 16]. El autor de este trabajo hace extensiva la denominación de *estructura centralizada* a esta forma organizativa. La solución de tareas de toma de decisiones, por esta estructura, se restringe por la posibilidad de obtener funciones de aproximación $Q_s(u_s)$, $x_s = x_s(u_s^{opt})$, con errores de aproximación aceptables.

En la figura 2.5 se ilustra el modo de funcionamiento de esta variante de la estructura centralizada: el sistema de mayor nivel elabora acciones directivas que son de obligatorio cumplimiento para los sistemas del nivel inferior [11, 12]. Para un funcionamiento eficiente de esta estructura se requiere de la utilización de funciones de aproximación de las acciones óptimas de los sistemas del nivel inferior, dependientes de la acción directiva recibida del nivel superior. Este tipo de estructura resulta muy frecuentemente apropiada, entre otros, para los sistemas de operación de procesos, en los que el tiempo de preparación de decisiones resulta muy limitado [146, 167, 168, 189]. La calidad de funcionamiento del sistema depende de la calidad de elaboración de las funciones de aproximación mencionadas, las que constituyen *reglas de conducta*[11, 12, 16] del sistema.

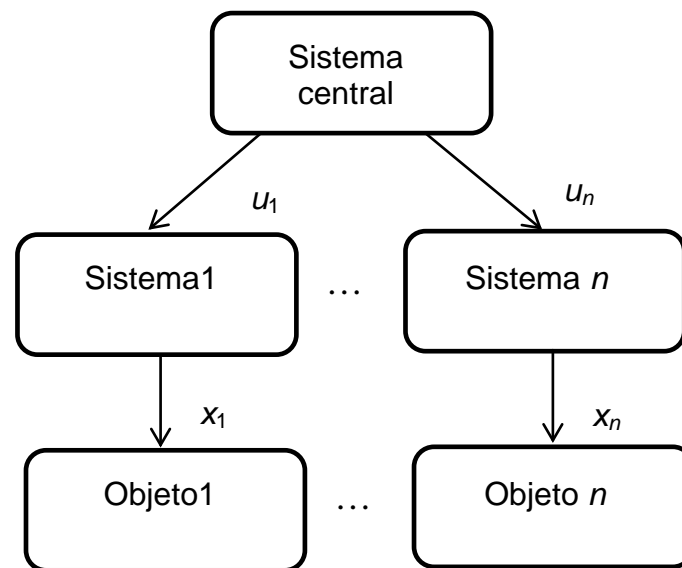


Fig. 2.5 Estructura centralizada

Aplicación 4: Operación de hornos de calentamiento en talleres de laminación

El estudio de esta tarea se inicia por la de mayor envergadura, de la cual ella forma parte, en calidad de subtarea. El sistema de toma de decisiones del taller de laminación debe solucionar la tarea de compatibilización del trabajo de diferentes agregados del taller al ritmo del proceso productivo, y asegurar el cumplimiento del gráfico operativo de trabajo establecido por el sistema de toma de decisiones empresarial. El objetivo del trabajo del sistema de toma

de decisiones del taller consiste en la minimización de los gastos totales en calentamiento y laminación del metal, asegurando el cumplimiento de determinada tarea productiva (productividad establecida) y las propiedades mecánicas previstas para las diferentes hornadas.

La solución al modelo matemático correspondiente [12], el que se estudia en la aplicación 6, para diferentes valores de p permite hallar funciones de aproximación a los valores óptimos de $T = (T_1, \dots, T_n)$ con respecto a p , donde T_i es la temperatura establecida para la zona i del horno. Estas funciones de aproximación constituyen *reglas de conducta*, las que pueden ser elaboradas separadamente para cada marca de acero r . De tal forma, se obtiene un cierto número de funciones $T_{i,r}(p)$, cada una de las cuales determina el valor que se debe asignar a la temperatura T de cada zona del horno, en dependencia de la productividad que haya sido establecida por el nivel superior de la estructura centralizada estudiada, para cada marca de acero que se esté laminando [11, 16].

Aplicación 5: Operación óptima de ruedas desecantes

La investigación se corresponde con una Tesis de doctorado tutorada por el autor (Aval 11) Las ventajas energéticas, económicas y medioambientales de la moderna tecnología de deshumidificación basada en ruedas desecantes han determinado el incremento de sus aplicaciones, en los últimos años, en diversos procesos industriales, los servicios y los sistemas de acondicionamiento de aire [12, 75, 76, 96].

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

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

- Variables asociadas con la necesidad a satisfacer.

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

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

- Indicador que caracteriza la eficiencia de la rueda.

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

- Restricciones a tener en consideración.

Se debe asegurar la humedad requerida (W_{po}^{req}) a la salida de la rueda desecante y el balance energético en la rueda.

- Variables de decisión.

rph : Velocidad de rotación de la rueda desecante

TR : Temperatura del aire de regeneración.

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

- Datos de entrada.

T_{pi} : Temperatura del aire de proceso a la entrada de la rueda desecante

W_{pi} : Humedad del aire de proceso a la entrada de la rueda desecante

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

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

$$\begin{array}{ll}
 \text{Minimizar: } T_{po} & \\
 \text{Asegurando:} & \\
 W_{po} = W_{po}^{req} & \\
 \text{Energía de entrada} = \text{Energía de salida} &
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array}} \right\} (2.22)$$

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

$$\left. \begin{aligned} rph^{opt} &= rph^{opt}(T_{pi}, W_{pi}, W_{po}^{req}, M_{pi}) \\ TR^{opt} &= TR^{opt}(T_{pi}, W_{pi}, W_{po}^{req}, M_{pi}) \end{aligned} \right\} \quad (2.23)$$

Las funciones (2.23) permiten calcular, con un error conocido y determinado por los errores estándar de las ecuaciones obtenidas, los valores óptimos de ambas variables de decisión como función de las condiciones de operación. La implementación de ambas expresiones permiten establecer una estructura centralizada del sistema de operación en la que el nivel central establece los valores W_{po}^{req} , M_{pi} y cada uno de los dos sistemas del nivel inferior calculan los valores requeridos de rph y TR para valores medidos de T_{pi} , W_{pi} . En la elaboración de funciones de este tipo el autor utiliza asiduamente funciones de aproximación logarítmico- posinomiales o logarítmico-signomiales [11]. Estas reglas pueden ser también elaboradas por técnicas de redes neuronales [168], en dependencia del error de apreciación que se obtenga. En caso que la precisión de las funciones (2.23) sea inferior a los requerimientos establecidos, en lugar de estas funciones se puede implementar un algoritmo de operación basado en comandos del tipo “if condición then acción” a partir de los resultados obtenidos de la solución fuera de línea del modelo matemático (2.22), o bien implementar un sistema extremal para la búsqueda, en los entornos determinados por los intervalos de confianza de ambas variables, de sus valores óptimos (de mínimo consumo energético), a partir de los valores calculados por ambas reglas de conducta.

2.2.3 Estructura disperso-conciliada

Sea (2.2) representable en la forma:

$$Min\{Z(Z_1(u, x_1), \dots, Z_n(u, x_n))/h(u) \geq 0; g_s(u, x_s) \geq 0; \forall s \in S\} \quad (2.24)$$

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

La solución de (2.5) se reduce a la solución de

$$\text{Min} \{ Z(Q_1(u), \dots, Q_n(u)) / h(u) \geq 0 \} \quad (2.25)$$

Donde:

$$Q_s(u) = \text{Min} \{ Z_s(u, x_s) / g_s(u, x_s) \geq 0 \}; \quad \forall s \in S, u / h(u) \geq 0 \quad (2.26)$$

$$x_s = x_s(u^{opt}) \quad (2.27)$$

Si la estructura de la tarea de toma de decisiones tiene la forma o resulta próxima a (2.25), entonces ella puede ser solucionada mediante:

- La búsqueda de solución a (2.24), para cada elemento s del sistema, para valores discretizados admisibles de las variables de coordinación u , o todos sus valores admisibles, en el caso de un número finito de valores de u discreta.
- La determinación de las funciones de aproximación $Q_s(u)$ y $x_s = x_s^{opt}(u)$.
- La solución del modelo aproximatorio (2.25) con el fin de hallar valores próximos al óptimo de $u = (u_1, u_2, \dots, u_k)$.
- El cálculo de los valores de $x_s^{opt}(u)$, para $u = u^{opt}$.

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

En el proceso de funcionamiento, cada órgano ejecuta la recepción y la elaboración de la información correspondiente y la entrega de la acción directiva a los objetos subordinados. Para la realización de la función de toma de decisiones, cada órgano local entra en

intercambio informativo con los otros órganos de toma de decisiones. Como resultado de este intercambio se concilian las acciones de los diferentes sistemas entre sí. En la figura 2.6 se brinda una representación gráfica de esta estructura.

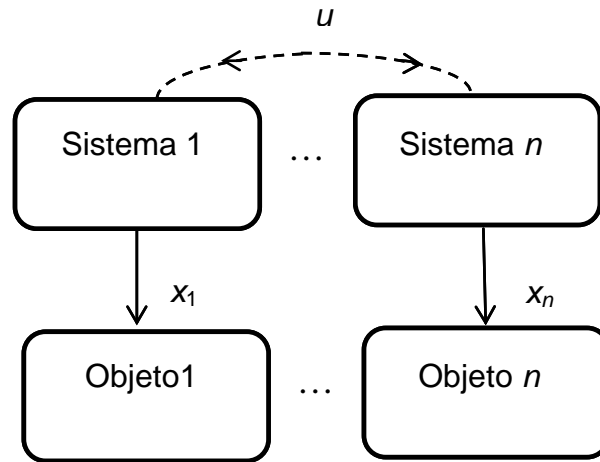


Fig. 2.6 Estructura disperso - conciliada

Aplicación 6: Conciliación del régimen térmico en hornos metódicos y del régimen de deformación del acero en molinos de laminación

La aplicación se corresponde con las investigaciones realizadas por el autor que aparecen reflejadas en los ejemplos que se inician en las pag. 178 y 182 de la obra Sistemas de Ingeniería [11]. Se dispone de un sistema computacional destinado para la síntesis de calibraciones de molinos de laminación de perfiles [11, 16]. Este sistema permite, entre otras tareas, elaborar funciones $E_L(T, p)$ que caracterizan la energía necesaria para deformar 1 tonelada de palanquilla hasta el perfil requerido como función de la temperatura de inicio de laminación (fin del calentamiento).

Un segundo sistema [11, 16] debe elaborar el régimen térmico de un horno de calentamiento de forma tal de minimizar la energía total en calentar y en deformar cada tonelada de palanquilla procesada.

Formulación de la tarea de conciliación

Minimizar

$$E_T = E_H(T, p) + E_L(T, p) \quad (2.28)$$

Asegurando

$$T_{sup}(T, p) \geq T_{sup}^{min} \quad (2.29)$$

$$\Delta T_{s,c} \leq \Delta T_{s,c}^{max} \quad (2.30)$$

Donde:

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

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

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

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

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

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

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

Aplicación7: Optimización de características técnicas básicas de conjuntos tractivos del transporte de la cosecha cañera.

La investigación se corresponde con la Tesis de doctorado expuesta en [5]. Los parámetros constructivos básicos de los conjuntos tractivos para la transportación de mercancías, en general, y para el transporte de la cosecha cañera asociada a la industria azucarera, en particular, condicionan por sí mismos determinada estructura de costos intrínsecos durante la explotación de estos conjuntos, lo que se estudia en profundidad en [5, 6].

El sistema mayor está constituido por:

- Los bloques cañeros con una determinada variedad y disponibilidad de caña, ubicados a distancias dadas con respecto a la industria, con valores conocidos de rendimientos y densidad de la caña según las variedades sembradas y las condiciones edafoclimáticas.
- Brigadas de corte que cosechan la caña en cada uno de los bloques, integradas por la cosechadora de caña, el tractor movedor que es el encargado de mover los remolques dentro del campo.
- Los caminos cañeros, los que se caracterizan por el coeficiente de resistencia a la rodadura (f) y el coeficiente de adherencia (ϕ) que inciden, respectivamente, en el esfuerzo de tracción del conjunto y en la fuerza tractiva máxima que se puede ejercer sobre el terreno.

Variables del sistema mayor:

- Tipo de equipo de tiro ($TTipo$).
- Tipo de camino predominante en cada empresa azucarera ($Tcam$).
- Tipo de cosechadora $Tcos$ al que se asocia el rendimiento de descarga horario (Wd).

Indicadores de eficiencia:

Aunque pueden ser seleccionados varios indicadores, en esta aplicación se toma en cuenta tan solo el siguiente:

- Gastos intrínsecos del conjunto tractivo (G_i): sumatoria de las partidas de gastos que dependen de forma independiente de las características técnicas básicas.

Variables de Decisión:

- Capacidad de carga de los remolques cañeros (CC).
- Velocidad técnica media de ida del conjunto tractivo (V_i).
- Velocidad técnica media de vuelta del conjunto tractivo (V_v).
- Parámetros constructivos de la zona de carga de los remolques (alto, largo, ancho y radio de curvatura entre el lateral y fondo).
- Cantidad de remolques en el conjunto tractivo (I_r).

Modelo matemático conceptual de la tarea.

Los gastos intrínsecos de los conjuntos tractivos en un día de zafra, se expresan en función de los costos totales del consumo de combustible y de los gastos de depreciación de los equipos de tiro y de los remolques, los que se requieren minimizar

$$Gi = Gi(Ccom, Gdet, Gdr) \quad (2.31)$$

Donde:

Gi: Gastos intrínsecos del conjunto tractivo.

Ccom: Costos del consumo de combustible.

Gdet: Gastos de depreciación de los equipos de tiro.

Gdr: Gastos de depreciación de los remolques.

Las otras partidas de gastos de explotación del transporte de la cosecha no se consideran porque no son función directa de las características técnicas básicas

Las restricciones que se imponen al modelo matemático conforman el espacio de solución y están dadas por las condiciones en que se realiza la transportación, las características técnicas de los equipos de tiro y la exigencia que impone la industria a la frescura de la caña. A continuación se detallan las mismas, para cualquier conjunto tractivo:

La fuerza tangencial necesaria para mover el tren de remolques no puede ser mayor que la mayor fuerza que pueden ejercer los elementos del rodaje sobre el terreno sin patinar.

$$P_{tg} I(CC, ccet, Gr(CC), Ir, \psi, Get(TTipo)) \leq P\phi(Get(TTipo), \phi(Tcam)) \quad (2.32)$$

Donde:

ψ : coeficiente reducido de resistencia al camino

Gr: Masa de los remolques, la que es función de *CC*

ccet: capacidad de carga del equipo de tiro

Get: Masa del equipo de tiro

P ϕ : fuerza tangencial máxima que se puede aplicar sobre el terreno.

La demanda de la potencia efectiva no puede superar el valor de la potencia efectiva, tanto en el viaje de ida como en el de vuelta.

$$Nei(\psi, Get, ccet, Ir, Gr(CC), CC, Vi) \leq Nemc(TTipo) \quad (2.33)$$

$$Nev(\psi, Get, ccet, Ir, Gr(CC), CC, Vv) \leq Nemc(TTipo) \quad (2.34)$$

El tiempo sumario de traslado (T_{tras}), desde que las primeras cañas que llenan el remolque son cortadas hasta que éstas llegan al destino final, debe ser inferior al tiempo crítico. Se define como tiempo crítico (t_c) a la diferencia entre el tiempo que puede permanecer la caña cortada sin que su deterioro afecte el rendimiento industrial (tri) y el tiempo de permanencia en el patio (tpa) de la industria en espera de ser molida.

$$t_c = tri - tpa$$

$$T_{tras}(CC, ccet, Wdc(Tcos), D, Vi, Tft, te, tdes, tpo, tca) \leq t_c \quad (2.35)$$

Donde:

Wdc : es el rendimiento de descarga de la combinada cañera

te : Tiempo de enganche.

tde : Tiempo de desenganche.

tpo : Tiempo de posicionamiento.

tca : Tiempo de cambio del remolque desde abajo de la combinada.

$tdes$: tiempo de descarga del equipo de tiro

Restricciones de no negatividad de las velocidades de ida y de vuelta del CConjunto tractivo.

$$Vi \geq 0 \quad (2.36)$$

$$Vv \geq 0 \quad (2.37)$$

Descomposición de la tarea en elementos componentes

La masa de la zona de carga es proporcional a su área (A_{zc}) y para cada capacidad de carga existe un volumen dado, para el que se corresponde un valor mínimo del área. Por tanto existe un determinado vínculo entre la masa de los remolques, las áreas de la zona de carga y su capacidad de carga ($Gr(A_{zc}(CC))$). Es decir, a cada valor de capacidad de carga le corresponde un volumen dado, y a dicho volumen se le asocia un diseño óptimo de la zona de carga que lo delimita, con un mínimo valor de su masa y de su costo de fabricación (o de compra). Esto significa que la salida del procedimiento de optimización de la capacidad de carga genera la información requerida para el diseño óptimo de la zona de carga del remolque. Pero para solucionar el modelo de la capacidad de carga con rigor, se precisa conocer la expresión de la masa y el precio en función de la capacidad de carga, expresada a través del valor óptimo del área total de la zona de carga del remolque.

Por otra parte, para cada distancia de tiro se puede generar un valor de capacidad de carga idóneo, pero como a la entidad transportista se le complica la organización del trabajo con el incremento de la composición de remolques, se parte del supuesto que el decisor determina el número de ellos que se incluirán en el parque de su empresa. Esta información es suministrada en calidad de propuestas, y luego se evalúa con cuál de ellas se logran los mínimos gastos intrínsecos sumarios de transportación en toda la zafra.

Del análisis anterior se concluye:

Para solucionar el modelo de los gastos intrínsecos con rigor, se precisa conocer la expresión de la masa de los remolques, ($Gr(Azc(CC))$), su precio y el área de la zona de carga en función de la capacidad de carga óptima.

Los (*conjuntos tractivos*), se determinan al evaluar el modelo de los Gastos intrínsecos para distintas distancias de tiro y constituyen las propuestas ($prop_j$) a partir de las que se selecciona el (los) conjunto(s) tractivo(s) óptimo(s) a emplear en una empresa azucarera en toda la zafra.

El valor de la capacidad de carga (CC^*), correspondiente al conjunto tractivo óptimo, es información de entrada para determinar los parámetros óptimos de la zonas de carga de los remolques, con éstos últimos se elabora la tarea técnica que se entrega a los proyectistas.

De tal forma, se hace posible establecer un esquema de triple descomposición, correspondiente a la estructura disperso-conciliada de organización de los sistemas de preparación y toma de decisiones, la que se ilustra en la figura 2.7.

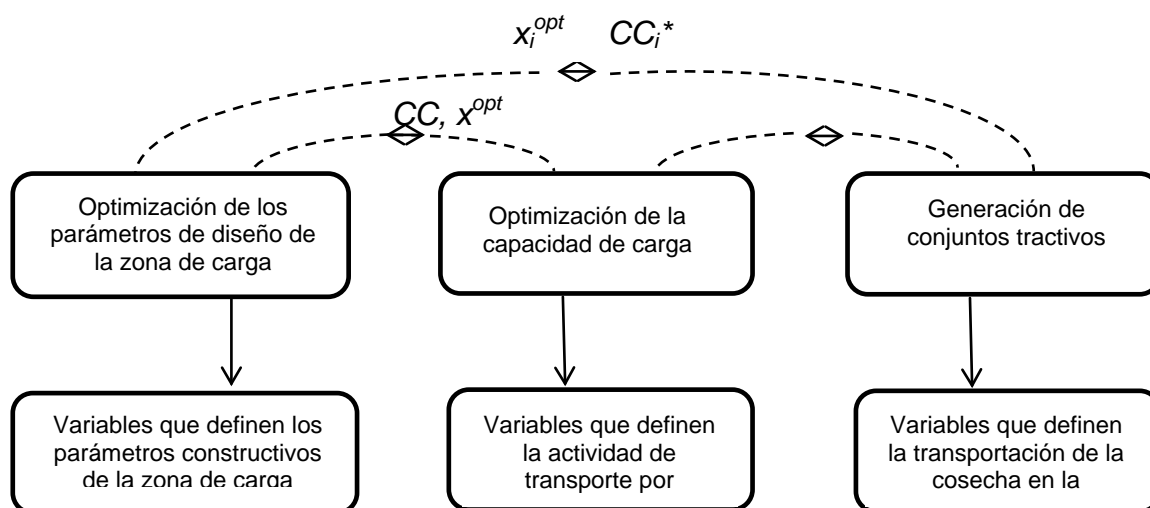


Fig 2.7 Estructura disperso conciliada de descomposición de la tarea.

Modelo matemático para la optimización de la zona de carga.

En la determinación de los parámetros constructivos de la zona de carga de los remolques cañeros, para un valor de capacidad de carga, la tarea se reduce a minimizar el área que delimita el volumen de carga (A_{zc}), con el objetivo de disminuir la masa del remolque lo que incide en disminuir los costos de fabricación y de consumo de combustible.

El modelo matemático de optimización requerido se corresponde con una de las tareas clásicas del Análisis Matemático:

$$\text{Min } A_{zc} = 2 \cdot \left(\left((H \cdot Bb) + 2(H - R)R + \left(\frac{\pi R^2}{2} \right) \right) + \left(L(H - R) + L \left(\frac{\pi R}{2} \right) \right) \right) + (L \cdot Bb) \quad (2.38)$$

Con las restricciones:

$$0 \leq H \leq H^{max} \quad (2.39)$$

$$0 \leq B \leq B^{max} \quad (2.40)$$

$$B - (2 \cdot R) \geq Bb \quad (2.41)$$

$$0 \leq L \leq L^{max} \quad (2.42)$$

$$L \cdot \left((H \cdot Bb) + 2(H - R)R + \left(\frac{\pi R^2}{2} \right) \right) = \frac{CC}{\rho} \quad (2.43)$$

Donde:

B : Ancho de la zona de carga.

B^{max} : Ancho máximo de la zona de carga.

Bb : Ancho mínimo del bastidor.

H : Altura de la zona de carga.

H^{max} : Altura máxima del cabezal.

L : longitud de la zona de carga.

L^{max} : longitud máxima de la zona de carga.

R : Radio definido entre la unión de los laterales y el fondo.

ρ :

Densidad volumétrica de masa.

Fundamentación de las restricciones:

- La altura (H) de la zona de carga se restringe por su altura máxima (H^{max}) la que se define como la diferencia entre la máxima que se puede alcanzar ($H\ lim$) y la mínima altura de la parte superior del bastidor al suelo ($hmin$).

$$H^{max} = H\ lim - h\ min$$

Donde

$H\ lim$: Altura límite. En el caso de los remolques que se cargan situados debajo de la combinada, el límite, lo impone la altura de trabajo del transportador, en el caso que se llenan con remolques autobasculantes, el límite lo imponen la máxima altura que permiten las leyes de vialidad y la estabilidad lateral.

$hmin$: altura mínima de la parte superior del bastidor al suelo en (m).

- El ancho máximo de la zona de carga (B) definido como la diferencia entre el ancho máximo que permite la norma cubana de carretera a los vehículos automotores ($Amax$) menos el ancho de seguridad que contempla dicha norma, dado por la oscilación del remolque debido al coleteo durante el tránsito por la carretera.

$$B^{max} = Amax - As$$

Donde:

$Amax$: Ancho máximo de un vehículo en la vía

As : Ancho de seguridad en (m).

- El ancho mínimo del bastidor (Bb) está dado por restricciones tecnológicas.
- El volumen de cálculo ($Vc = Ac.L$), área de la sección transversal por la longitud de bastidor, deberá ser igual al volumen necesario (Vn).

La función objetivo (2.38) expresa el mínimo del área de la zona de carga del remolque, lo que presupone el mínimo de su masa y de su costo de fabricación y, por lo tanto, de la depreciación del remolque.

La restricción (2.39) establece que la altura del remolque no podrá sobrepasar lo establecido en las normas.

Para considerar los factores tecnológicos de la industria se establece que el ancho del bastidor no debe ser inferior al valor mínimo que permiten las condiciones creadas en cada industria (restricción (2.40)).

Limitaciones de diferente naturaleza pueden establecer un máximo valor de la longitud permisible de los remolques, lo que expresa la restricción(2.41).

La restricción (2.42)define que el volumen que delimita el área de la zona de carga debe ser igual al volumen de carga correspondiente a la capacidad de diseño.

La tarea planteada constituye un modelo de optimización no lineal con restricciones del tipo igualdad y desigualdad clásico, en cuya solución se utilizan, entre otros, los métodos del análisis matemático clásico. En él se pueden determinar las dimensiones constructivas óptimas para un valor de capacidad de carga.

La solución de este modelo de optimización para varios valores de capacidad de carga y el posterior procesamiento de estos resultados permiten elaborar funciones de aproximación de las dimensiones constructivas $x_i^{opt}(CC)$ óptimas y, por lo tanto, la masa G_{ry} los gastos de depreciación G_{dr} como función de la capacidad de carga.

Modelo matemático para la generación de opciones de conjuntos tractivos.

Al sustituir las funciones de aproximación obtenidas en el modelo original, para la determinación de la capacidad de carga y del número de remolques óptimos, para los bloques cañeros de igual distancia al centro de descarga, este modelo se convierte en el siguiente modelo de generación de opciones de conjuntos tractivos.

Minimizar $G_i = Com + G_{det} + G_{dr}$,

Asegurando el cumplimiento de las restricciones (2.32) – (2.37) para valores de CC dados por la solución del modelo (2.38) – (2.43) y de $TTipo$, $ccet$, ψ , φ dados por los valores de las variables de coordinación para la tarea concreta que se esté solucionando.

Las soluciones generadas, para las diferentes distancias de los bloques cañeros al centro de recepción, constituyen opciones entre las que se requiere seleccionar las más adecuadas para la empresa cañera estudiada.

Modelo matemático para la selección de conjuntos tractivos a utilizar por la empresa cañera.

En esta fase el sistema determina los bloques que mejor se vinculan a cada tipo de conjunto tractivo. El sistema debe asegurar el cálculo de los costos totales mínimos correspondientes a la selección que se realice, en correspondencia con el siguiente modelo matemático

Minimizar

$$\sum_{k \in K} \sum_j \theta_{k,j} G_{k,j} \quad (2.44)$$

Asegurando:

$$\sum_{k \in K} \sum_j \theta_{k,j} = N \quad (2.45)$$

$$\sum_{k \in K} \theta_{k,j} = 1, \quad , \forall j \in J \quad (2.46)$$

$$\theta_{k,j} \text{ enteras}$$

Donde

$$\theta_{k,j} = \begin{cases} 1 & \text{Si al bloque } j \text{ se asocia la opción } k \text{ de conjunto tractivo del Grupo} \\ K \text{ de índices} & \text{de conjuntos tractivos generados previamente} \\ 0 & \text{- en otro caso} \end{cases}$$

N : Cantidad de conjuntos tractivos seleccionados por el decidor (incluidos en el grupo K).

G_j : Gastos intrínsecos totales en ejecutar la zafra utilizando tan solo el conjunto tractivo j en toda la empresa azucarera.

J : Conjunto de bloques cañeros.

El objetivo (2.44) expresa la necesidad de minimizar los gastos intrínsecos totales en realizar la zafra azucarera.

La restricción (2.45) establece la necesidad de seleccionar las N opciones de conjuntos tractivos preestablecidas por el decidor.

La restricción (2.46) establece la necesidad de asegurar que para todos y cada uno de los bloques cañeros sea utilizado uno y solo uno de los conjuntos tractivos seleccionados por el decidor.

La última restricción establece el carácter discreto de la variable $\theta_{k,j}$. En combinación con las dos restricciones anteriores obliga a que esta variable adopte tan solo valores 0 ó 1.

2.2.4 Estructura jerárquica participativa

Se corresponden con el 2do caso, el de mayor complejidad, asociado al modelo (2.18).

La solución de (2.18) es equivalente a:

$$\text{Min} \{ Z(Z_1(u_1^*, x_1), \dots, Z_n(u_n^*, x_n)) / h(u^*, x) \geq 0; x_s \in X_s^\alpha; \forall s \in S \}, \quad (2.47)$$

donde:

$$u^* = \arg \{ \text{Min} [Z(Q_1(u_1), \dots, Q_n(u_n)) / h(u) \geq 0] \} \quad (2.48)$$

$$Q_s(u_s) = \text{Min} \{ Z_s(u_s, x_s) / g_s(u, x_s) \geq 0 \}; \quad \forall s \in S, u / h(u) \geq 0 \quad (2.49)$$

$$\left. \begin{aligned} X_s^\alpha = \{ x_s / Z_s^{\min} \leq Z_s(u_s^*, x_s) \leq Z_s^{\min} + \alpha \} \\ Z_s^{\min} = \text{Min}[Z_s(u_s^*, x_s) / g_s(u_s^*, x_s) \geq 0] \end{aligned} \right\} \quad (2.50)$$

La tarea de toma de decisiones con la forma (2.18) puede ser solucionada a partir de la búsqueda de solución a (2.47), para valores de u^* hallados mediante la solución del modelo aproximatorio de optimización (2.48). En la determinación de las funciones $Q_s(u_s)$, que forman parte de este modelo, se aproximan los valores óptimos de las funciones $Z_s(u_s, x_s)$ en el espacio de existencia de cada elemento s del sistema. La tarea (2.48) recibe en lo adelante la denominación de *tarea coordinadora*. En esta aproximación predomina la influencia de u . Es decir, las funciones $Q_s(u_s)$ reflejan la influencia del sistema estudiado sobre el de mayor envergadura, del cual él es parte componente. Los espacios de búsqueda de solución se reducen a los conjuntos X_s^α de soluciones próximas al óptimo local de cada elemento s del sistema. La estructura organizativa más adecuada se denomina *estructura jerárquica* y se caracteriza por la toma centralizada de decisiones en variables agregadas, las que permiten realizar una previa conciliación de los espacios de existencia locales y la búsqueda de la solución de mejor compromiso, en las variables de decisión de los sistemas del nivel inferior que mejor satisfacen los intereses de todo el sistema. La calidad de funcionamiento de esta estructura depende de la calidad de elaboración de los modelos de aproximación (2.48), de la generación de espacios X_s^α suficientemente completos, para valores α dados, y de la utilización de métodos adecuados para seleccionar la mejor combinación de opciones entre los elementos del nivel inferior mediante la búsqueda de solución al modelo (2.47).

El autor de este trabajo denomina *estructura jerárquica participativa* a esta forma de organización de los sistemas.

En esta estructura (figura 2.8), el sistema del nivel superior elabora acciones directivas, generalizadoras del funcionamiento de todo el sistema, para cada sistema del nivel inferior; cada uno de estos últimos halla alternativas de cumplimiento de la acción recibida ordenadas de acuerdo con un criterio local de eficiencia y entrega estas opciones, en calidad de propuestas, al sistema del nivel superior. En una tercera etapa, el sistema del nivel superior selecciona una combinación de propuestas de los sistemas del nivel inferior que satisface, de la mejor manera (optimiza), un criterio de eficiencia generalizador para todo el sistema [11, 12]. Este tipo de estructura resulta muy apropiada para los sistemas de carácter organizativo. La optimalidad de las decisiones adoptadas mediante la solución del sistema (2.36)-(2.39) se demuestra en el trabajo [121] y en [11, 12] y se deducen los algoritmos de cálculo del error de una solución aproximada.

Durante la solución de tareas en los sistemas organizativos resulta común la práctica de su descomposición en subtareas correspondientes a las diferentes áreas de la entidad y la búsqueda de solución a la tarea original entre las propuestas recibidas de las áreas, lo que obedece al esquema expuesto de la estructura jerárquica participativa.

En la estructura jerárquica las decisiones son preparadas conjuntamente por el centro (sistema de toma de decisiones de todo el objeto) y por los sistemas de toma de decisiones del nivel inferior (ocupados en la toma de decisiones de cada elemento componente del objeto complejo), con la particularidad de que el centro soluciona tareas en variables agregadas, mientras que cada sistema del nivel inferior actúa sobre el elemento correspondiente, con total independencia, persiguiendo un objetivo local y asegurando el cumplimiento de la decisión agregada del centro [12, 159].

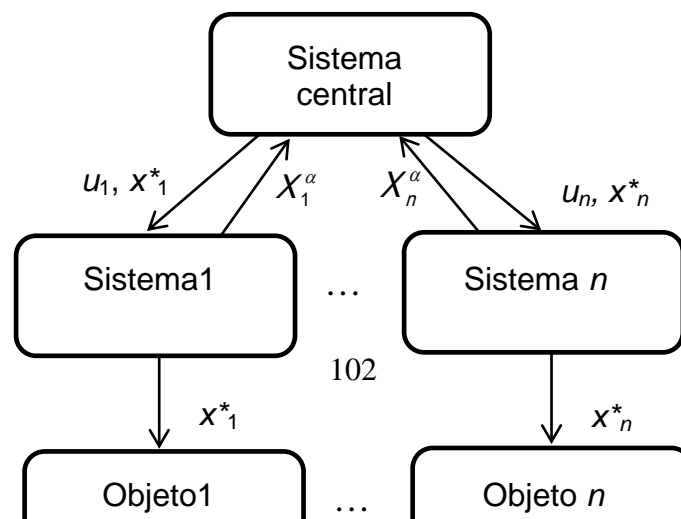


Fig. 2.8 Estructura jerárquica participativa

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

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

- A partir de la acción directiva w , procedente del primer nivel, en el segundo nivel se genera, con ayuda del modelo matemático (2.20), el espacio U^α de posibles opciones del sistema estudiado.
- Se selecciona, por el sistema de mayor envergadura (primer nivel), la opción que satisface el mejor compromiso entre los indicadores de eficiencia a ese nivel, considerando el conjunto de sistemas que se encuentran en el segundo nivel.
- Entrega de la acción directiva u a los sistemas del tercer nivel.
- Generación de los espacios X_s^α , $\forall s \in S$ por los sistemas de tercer nivel al sistema del segundo nivel.
- Selección por el sistema mayor (del segundo nivel) de aquella combinación de opciones que mejor satisface las preferencias a ese nivel.

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

En presencia de tan solo dos niveles, la estructura jerárquica participativa constituye la unión de tres procesos:

1. Toma de decisiones por el nivel superior de las directivas para todo el objeto, en coordinación con los elementos del sistema del cual es parte componente. Esta relación

entre el nivel superior y los sistemas del nivel inferior se corresponde con la estructura centralizada.

2. Generación de opciones de decisión por cada elemento del sistema, lo que se corresponde con la estructura descentralizada para cada sistema del nivel inferior.
3. Selección de combinaciones de opciones entre los diferentes elementos del sistema.

Aplicación 8: Conciliación de gráficos de producción de grupos de talleres que trabajan en paralelo

Esta investigación forma parte del doctorado del autor y se describe adecuadamente en [11, 12].

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

$$A(t) = \{A_1(t), \dots, A_m(t), \dots, A_{m_0}(t)\} \quad (2.51)$$

Cada elemento de S tiene que cumplir un plan establecido por la empresa a partir del empleo de un modelo del tipo (2.28)-(2.30) expuesto en la aplicación 3, de cada uno de los productos m del conjunto de productos M a satisfacer por el grupo de talleres (valores de los vectores u_s del nivel jerárquico superior, expresados como cantidades de producción de cada uno de los productos a ejecutar en cada taller en el período planificado).

Se busca solución a la tarea de obtención de combinaciones α -óptimas de secuencias de trabajo de todos los talleres, es decir, de aquellas secuencias de trabajo que se diferencian de la óptima por el criterio de optimalidad seleccionado en no más de un parámetro α . Se supone que para cada taller aislado existe un método de generación de secuencias α -óptimas en la realización de la tarea a él asignada, tomando en consideración las restricciones internas de ese taller. Sea el conjunto de secuencias α -óptimas de cada taller:

$$K_s = (1, 2, \dots, k, \dots, k_s), (2.52)$$

ordenados por los valores de pérdidas en el taller:

$$Z_1^s < Z_2^s < \dots < Z_k^s < \dots < Z_{k_s}^s (2.53)$$

Dado el producto de conjuntos:

$$E = K_1 \times \dots \times K_s \times \dots \times K_{s_0} (2.54)$$

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

$$Z = \sum_{s \in S} Z_k^s + \varepsilon(e^k) \quad ; \quad \forall e^k \in E (2.55)$$

Los elementos de la serie de pérdidas asociadas a las diferentes opciones de gráficos pueden estar constituidos por magnitudes vectoriales. En ese caso (2.55) expresa un vector de funciones.

Esta tarea se enfrenta por primera vez por el autor de este trabajo [11]. Posteriormente, ha sido trabajado intensamente por muchos autores [56, 116, 242]. En las aplicaciones 9, 13, 14 y 15 se proponen esquemas de solución a tareas de ingeniería de alta complejidad, utilizando el esquema de descomposición propio de esta estructura.

La aplicación 8 está necesariamente precedida por la solución de una tarea coordinadora de planificación volumétrica, por la que se establecen los volúmenes óptimos de producción de todos y cada uno de los productos a ser fabricados por todos y cada uno de los elementos del sistema, de acuerdo a los intereses del sistema mayor, considerando las posibilidades de los sistemas del nivel inferior.

De tal forma, la organización de estructuras jerárquicas participativas presupone la realización de investigaciones vinculadas al modelado y desarrollo de los sistemas automatizados de preparación y toma de decisiones asociados a las tareas coordinadora, de generación y de selección de opciones correspondientes. El orden de realización de estas investigaciones puede ser cualquiera, en dependencia de las prioridades del usuario. Así, la tarea coordinadora puede ser solucionada por los procedimientos clásicos no automatizados establecidos los que, aunque no aportan soluciones óptimas para todo el sistema (entendido como un elemento del sistema de mayor envergadura), sí aseguran generalmente la precompatibilización de los espacios de existencia de las tareas de generación y selección de opciones de los elementos de su nivel inferior.

Surge así la posibilidad de desarrollar una variante alternativa de la estructura jerárquica participativa, por la que los elementos del nivel inferior generan sus opciones de solución y el nivel superior se limita a seleccionar la mejor combinación entre ellas, por un modelo detallado propio de todo el sistema, asegurando el cumplimiento de los valores establecidos de las variables de coordinación. La tarea coordinadora es solucionada mediante procedimientos clásicos propios de cada área concreta de la Ingeniería (empíricos, desde el punto de vista de la teoría del análisis de sistemas de ingeniería que se expone en el presente capítulo). En la figura 2.9 se ilustra el procedimiento correspondiente de conciliación de decisiones. Esta variante de estructura se asemeja a la disperso – concilada, aunque con la diferencia que en este caso existe una tarea central de conciliación. En la próxima aplicación se ejemplifica esta alternativa de estructura jerárquica participativa.

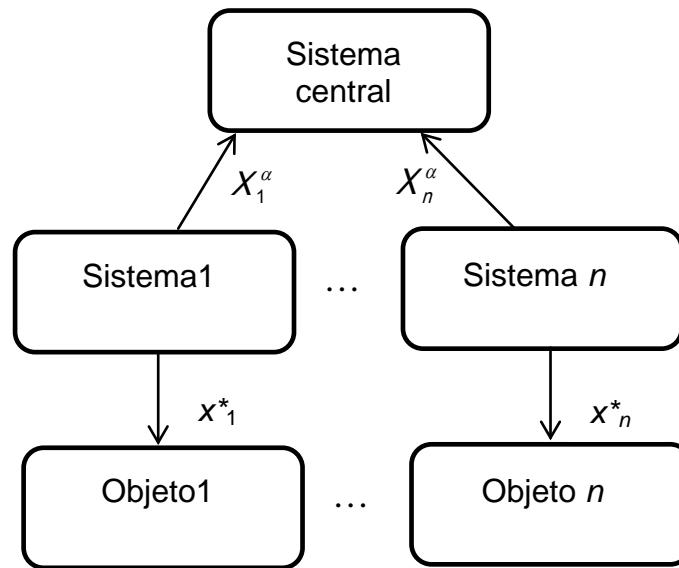


Fig. 2.9 Variante alternativa de la estructura jerárquica participativa

Aplicación9: El Sistema de Destino del Metal

El tema estudiado representa un considerable interés económico en las empresas siderúrgicas de producción de perfiles: se trata de dar el mejor uso posible a los semiproductos de la industria. Este interés está determinado por la siguiente circunstancia: mientras mejor uso se le dé al acero disponible, inferiores serán los requisitos a las propiedades mecánicas del metal necesarias para satisfacer determinada demanda, lo que equivale a minimizar los costos de la producción de ese metal[11]. Por supuesto, una restricción indispensable es la exigencia de una alta probabilidad de superar determinados límites normados de las diferentes propiedades del producto terminado.

La utilización de los semiproductos en la industria siderúrgica, está estrechamente relacionada con las tareas del control de la calidad, de la dirección operativa de la producción y de la conducción de los procesos tecnológicos. Es decir, se subordina, por un lado, al sistema de dirección de la producción y, por el otro, al sistema de fabricación (parte componente del sistema de dirección de los recursos técnicos). En efecto, el sistema de control de la calidad no puede permitir que no se aseguren las propiedades del acero vendido y, al mismo tiempo, debe velar por la efectividad económica de la empresa. Asimismo, el

servicio de dirección de la producción puede verse en la necesidad de dar una inadecuada utilización, desde el punto de vista económico, al acero disponible para poder asegurar la materia prima necesaria para las partidas de producción de los laminadores finales. Por otra parte, la conducción del proceso de fundición de acero puede facilitar o dificultar la correspondencia del acero disponible con el demandado por los talleres finales. La conducción del proceso en los talleres finales ayuda (o perjudica) a que las propiedades reales del acero se correspondan con el destino asignado.

De tal forma, la utilización racional del acero se asegura tanto por el SAD empresarial, como por los el sistema de dirección de los recursos técnicos y, por tanto, por los sistemas de operación de los procesos fabricación. En loadelante se presentan las tareas del SAD relacionadas con la utilización del acero, en las empresas siderúrgicas. En el trabajo [15] se estudian, esta tarea en su relación con los procesos de calentamiento y deformación del acero.

A partir de la carpeta de pedidos de los clientes, el Sistema de Dirección de la Producción elabora un plan de marcas. No obstante, las propiedades mecánicas del acero dependen no propiamente de la marca de acero fabricada sino de la composición química real obtenida. El subsistema de dirección de la producción encargado de la determinación del destino de las hornadas selecciona cuales hornadas van a satisfacer determinados pedidos y cuales permanecen almacenadas en espera de su destino definitivo. Estas decisiones se rectifican en cada ocasión que se requiere seleccionar hornadas por diferentes destinos. Algunas hornadas son seleccionadas para su laminación posterior, según la opción de destino y otras son almacenadas. Concluido el proceso de laminación según el destino asignado (Taller en el que se debe laminar, perfil del producto final y grado de calidad asignado) se obtiene la información sobre las propiedades mecánicas reales de ensayos mecánicos realizados a las probetas, el procesamiento de los cuales determina si se acepta o rechaza el destino previamente asignado, luego de lo cual se actualiza la información de los pedidos de la carpeta no satisfechos aún y el proceso se repite (ver figura 2.10).

El análisis externo de la tarea objeto de estudio se establece como sigue:

Variables de coordinación:

- Volúmenes de producción de perfiles con sus grados normados de calidad, para el periodo de tiempo asociado al umbral operativo de planificación (turno, día, semana), correspondientes a los pedidos a satisfacer, con toda la información asociada.

Indicadores de Eficiencia

- Costo asociado a la determinación de las hornadas asignadas por cada destino, la que se asocia a la magnitud del exceso de propiedades con respecto a las normadas, entregadas a los clientes.

Variables de decisión:

- Destino asignado a cada hornada (taller donde se ha de procesar la hornada, perfil (sección transversal) y grado de calidad que deberá ser asegurado al cliente.

Datos de entrada:

- Toda la información referida a la composición química de las hornadas en proceso, parámetros de las ecuaciones que describen las propiedades para los talleres de laminación de perfiles, información asociada a las normas que describen las exigencias de los indicadores de calidad, etc.

Formulación matemática de la tarea analizada

Se requiere minimizar el exceso de todas y cada una de las r propiedades normadas entregadas, por el peso de las hornadas

$$Z_k = \sum_i \sum_j \{ A_h[R_{ijk}(x)] - R_{jk}^n \} P_i \Theta_{ij}; \quad k = 1, \dots, r \quad (2.56)$$

Asegurando el cumplimiento de: (2.57)

$$A_h[R_{ijk}(x)] - R_{jk}^n \geq 0; \quad j = 1, \dots, m; \quad k = 1, \dots, r; \quad i = 1, \dots, n$$

$$\sum_i \Theta_{ij} P_i \geq Q_j; \quad j = 1, \dots, m \quad (2.58)$$

$$\sum_j \Theta_{ij} \leq 1; \quad i = 1, \dots, n \quad (2.59)$$

Donde:

$R_{ijk}(x)$: Valor estimado de la propiedad k , según composición química x de la hornada i , por el destino j .

$A_h[R_{ijk}(x)]$: Valor asegurado con una probabilidad mayor o igual a h de la propiedad k , según composición química x de la hornada i , por el destino j .

R_{jk}^n : Valor normado de la propiedad k , para el destino j .

P_i : Peso de la hornada i

θ_{ij} : Variable de decisión, la que adopta valor 1 en caso de asignarse el destino j a la hornada i y valor 0 en caso contrario.

Q_j : Peso total de metal a entregar por el destino j por la empresa a sus clientes en cada momento en que debe decidir destinos de hornadas, en el turno de trabajo.

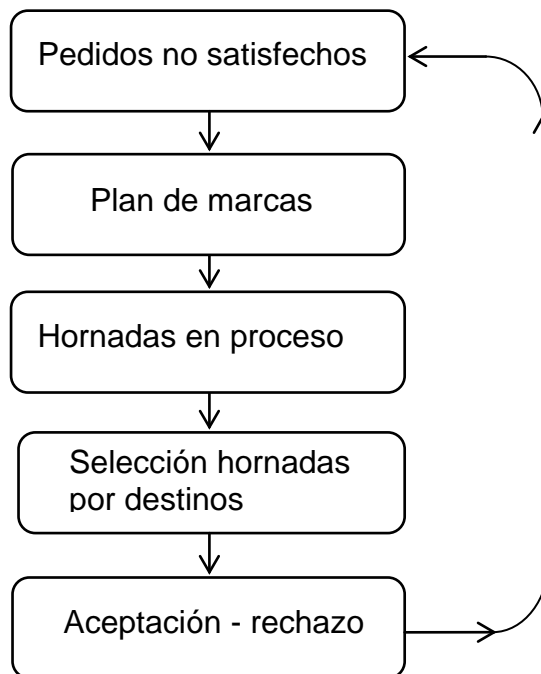


Fig. 2.10 Esquema general del proceso de preparación y toma de decisiones asociado al destino de las hornadas

Las restricciones (2.57) obligan al cumplimiento del destino asignado con una probabilidad mayor o igual a h para todas las propiedades, todos los destinos, de todas las hornadas asignadas

Las restricciones (2.58) obligan al cumplimiento de las entregas de los compromisos Q_j asumidos por la empresa por cada destino j .

Las funciones – objetivos Z_k indican la intención de entregar el mínimo exceso de todas y cada una de las propiedades normadas, asegurada con una probabilidad mayor igual a h , por todos y cada uno de los destinos para toda la producción realizada.

La tarea planteada se descompone de forma natural en las siguientes subtareas:

- Generación de opciones de destino por cada hornada recién producida

- Selección de la mejor combinación de opciones de destino en cada momento que se requiera entregar determinadas cantidades de metal Q_j por los diferentes destinos.

En la generación de opciones se toma en consideración la circunstancia que al cumplirse el límite de fluencia se cumplen generalmente las restantes propiedades, por lo que se puede solucionar esta tarea asegurando tan solo esta propiedad y eliminando, en caso necesario aquellas opciones que no cumplan alguna de las restantes propiedades.

Queda planteada la tarea de la generación de opciones de destino por el siguiente modelo:

$$\text{Minimizar} \quad Z = \sum_j \{ A_h[R_j(x)] - R_j^n \} \theta_j \quad (2.60)$$

Asegurando el cumplimiento de:

$$A_h[R_j(x)] - R_j^n \geq h \theta_j ; j = 1, \dots, m; \quad (2.61)$$

$$\sum_j \theta_j = 1 ; \quad (2.62)$$

En el modelo (2.60) – (2.62) $R_j(x)$ se refiere tan solo al límite de fluencia de la hornada recién producida, estimado según composición química x , R_j^n al valor normado de esta propiedad, θ_j a la decisión de asignar o no el destino j a la hornada recién producida.

El modelo anterior se soluciona de forma muy sencilla por el método de búsqueda exhaustiva, de la siguiente forma: se calcula $A_h[R_{ij}(x)] - R_j^n$ por los diferentes destinos, se toman en consideración tan solo aquellos destinos que tienen exceso de la propiedad y se verifica el cumplimiento de las propiedades restantes. En caso que alguna de ellas no se cumplan se eliminan entre las opciones, las que son ordenadas de acuerdo al valor del exceso calculado. En la selección de opciones de destino el modelo original queda simplificado, de la forma siguiente:

Minimizar:

$$Z = \sum_i \sum_j \{ A_h[R_{ij}(x)] - R_j^n \} P_i \theta_{ij}; \quad (2.63)$$

Asegurando el cumplimiento de:

$$\sum_i \theta_{ij} P_i \geq Q_j; j = 1, \dots, m \quad (2.64)$$

$$\sum_j \theta_{ij} \leq 1 ; i = 1, \dots, n \quad (2.65)$$

Puede requerirse destinar hornadas para su venta como semiproducto, lo que se realiza por su marca de acero. En este caso, las hornadas a exportar se seleccionan entre las que no

fueron destinadas a los talleres de producción de perfiles y que al mismo tiempo satisfacen los requerimientos de la marca en cuestión. En cualquier caso el personal encargado de la toma de decisiones puede seleccionar cualquiera de las opciones generadas en correspondencia con el modelo (2.63) – (2.65), tomando en consideración factores que no aparecen en los modelos mostrados.

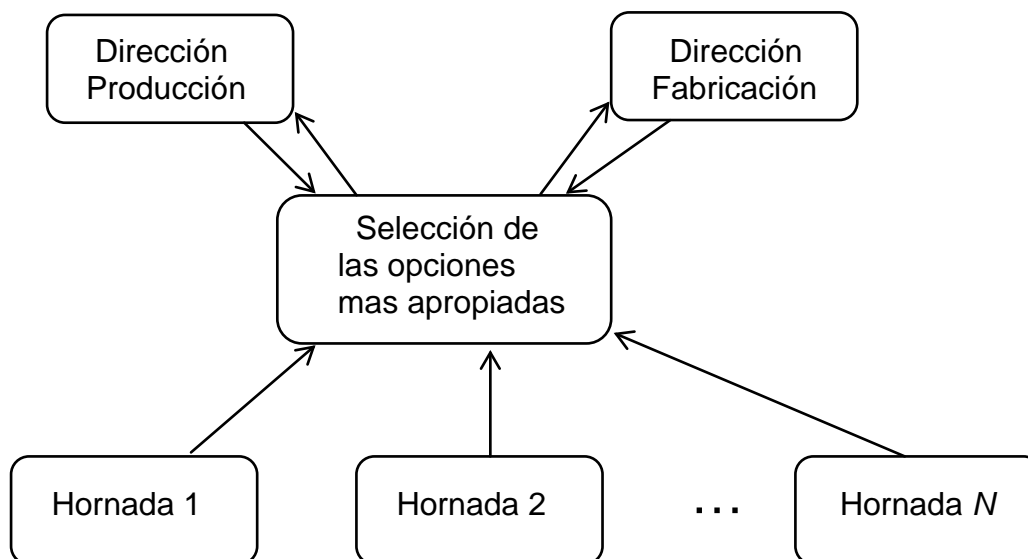


Fig. 2.11 Esquema general de descomposición de la tarea de destino del metal

Esta relación de selección por el nivel superior de las opciones entregadas por los sistemas del nivel inferior puede ser considerada como una estructura independiente de preparación y toma de decisiones la que se estudia en el próximo capítulo en el ejemplo de la tarea generación y selección de opciones de destino de hornadas en la industria siderúrgica.

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

Por esta razón, los principios para el diseño de sistemas de ingeniería se subordinan a las leyes generales de la Teoría de sistemas[167, 172, 189,231]. En particular, la tarea de conciliación del funcionamiento de estos sistemas obedece a las leyes generales de la conciliación de los sistemas. Así mismo, la definición de las tareas a ser solucionadas responde a las leyes generales de descomposición de la tarea de toma de decisiones de los objetos complejos.

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

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

2.3 Principios de descomposición de la tarea de toma de decisiones en objetos complejos

En la literatura dedicada al tema de la gestión empresarial se encuentra una inmensa cantidad de obras que abordan la esencia de este problema. Sin embargo, muy pocas entre ellas [172] analizan el vínculo entre los aspectos espacial, funcional, multicriterial y del tiempo en el establecimiento de jerarquías de tareas de toma de decisiones. Con el fin de definir el contenido de estas tareas en complejos organizativos y tecnológicos y las relaciones mutuas existentes, fueron enunciados los principios cuya aplicación práctica a los objetos reales, de carácter organizativo, conducen a estructuras de tareas semejantes a las que se han venido conformando en los sistemas organizativos como resultado de su evolución histórica.

En correspondencia con estos principios [10, 11, 12], la tarea de toma de decisiones se descompone espacialmente: el sistema de toma de decisiones de todo el objeto dirige los de cada uno de los elementos que lo conforman. A cada nivel de descomposición espacial corresponde una descomposición por funciones, y en cada nivel de descomposición funcional tiene lugar una descomposición en el tiempo. Como resultado se obtiene una jerarquía interrelacionada de tareas de toma de decisiones, así como la estructura misma del sistema.

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

- La descomposición espacial de la tarea de toma de decisiones determina la existencia de un sistema de toma de decisiones de la empresa en su conjunto y, subordinado a este, un sistema de toma de decisiones local para los talleres que participan en la producción material.
- La descomposición de la tarea de toma de decisiones del sistema empresarial por funciones permite distribuir la tarea racionalmente 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 toma de decisiones de toda empresa se descompone en los siguientes sistemas funcionales:
 - Sistemas de toma de decisiones de los recursos: materiales, técnicos, humanos y financieros,
 - Sistemas de toma de decisiones de la producción y de las ventas.
- La armonización del funcionamiento de los sistemas mencionados, así como su vinculación con otros sistemas puede ser considerada como una función de toma de decisiones adicional. Al sistema encargado de cumplir esta función se le puede denominar, por ejemplo, sistema de toma de decisiones técnico-económica de la empresa, sistema de coordinación, etcétera.

- La descomposición en el tiempo de cada una de estas funciones conduce a la determinación de las tareas que han de ser solucionadas. En la figura 2.12 se muestra la jerarquía de tareas de toma de decisiones de la producción de las empresas industriales obtenida como resultado de la aplicación de los principios mencionados, partiendo de una perspectiva anual. Del sistema de planeamiento anual se reciben las cifras pronósticos de producción para el año en curso, desglosadas por trimestres. El comportamiento real de los indicadores económicos y del mercado puede, y normalmente lo hace, condicionar la modificación de estas cifras durante el año, las que son desglosadas por trimestres y meses.
- El nivel de toma de decisiones empresarial debe asegurar el balance de los flujos materiales entre los elementos de su descomposición espacial, en el tiempo. El hecho de que la demanda se precise, por lo general, en cada mes (y en ocasiones se rectifica varias veces durante el mes), impone la necesidad de elaborar mensualmente las secuencias de trabajo de los talleres y de rectificar, de forma periódica, estas secuencias durante el mes. Las secuencias deben ser compatibilizadas entre sí, ya que solo de esta forma se puede asegurar su viabilidad y el logro de un nivel adecuado de eficiencia general del sistema.

Las secuencias concretas que garantizan el cumplimiento de la tarea mensual de cada taller son emitidas, en calidad de propuestas, por los correspondientes sistemas locales de toma de decisiones. La selección de una combinación de secuencias se realiza en el nivel superior, por el sistema correspondiente. En la solución de las tareas señaladas, además de la consideración de los enlaces materiales, ocupa un lugar importante la consideración de los parámetros generados por el sistema de toma de decisiones de los recursos técnicos: máquinas o agregados en los que se debe fabricar determinado producto, duración de las operaciones tecnológicas, etcétera.

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

En el nivel inferior de la jerarquía (taller), se realiza la coordinación interna del trabajo de las áreas y los agregados. Es decir, tiene lugar la toma de decisiones de las operaciones del taller. A este nivel se preparan las propuestas operativas al sistema de despacho centralizado de la empresa. La toma de decisiones de las operaciones está estrechamente relacionada con la conducción de los procesos tecnológicos, pues las decisiones operativas de carácter productivo constituyen acciones directivas a los sistemas de toma de decisiones de los procesos tecnológicos. De tal forma, el sistema automatizado de operación y control de cada agregado del taller se encuentra bajo subordinación funcional del sistema de toma de decisiones corriente del taller en cuestión.

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

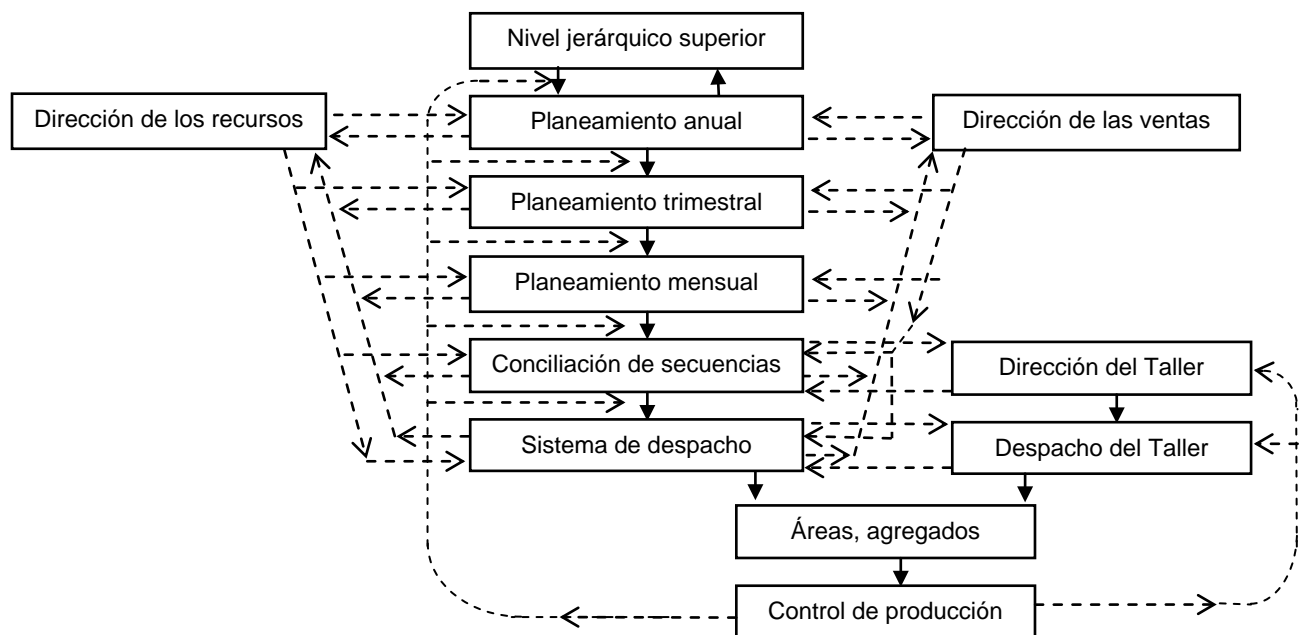


Fig. 2.12 Jerarquía de tareas de dirección de la producción industrial

La planeación de la producción a cada nivel de descomposición en el tiempo tiene que considerar las restricciones que imponen todos los sistemas funcionales relacionados con la

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

La descomposición asociada al diseño de la tecnología resulta generalmente más sencilla que la relativa a la toma de decisiones empresarial. En efecto, los diferentes elementos componentes de talleres, agregados y equipos se especializan en el cumplimiento de determinadas funciones, por lo que la descomposición espacial y funcional generalmente coinciden [248]. Por otra parte, la síntesis de tecnologías tiene lugar para períodos indeterminados, mientras permanezcan las condiciones para las que se realiza este diseño, por lo cual la descomposición en el tiempo carece de sentido. No obstante, esta información es utilizada por el sistema de toma de decisiones de la producción, el que debe seleccionar la tecnología más apropiada para fabricar cada artículo en los agregados tecnológicos que correspondan.

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

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

Aplicación10: Integración del diseño, la generación de tecnologías, la fabricación y la planeación de la producción de piezas

Esta aplicación se realizó en el marco una Tesis de doctorado tutorada por el autor (ver Aval 13).

El problema estudiado en la presente aplicación ha sido objeto de investigación, no siempre con éxito, en numerosos trabajos. Entre ellos se encuentran[30, 59, 170, 235, 246].

Las tareas de integración de los sistemas CAD/CAPP/CAM/CAP (para el diseño, la generación de tecnologías, la fabricación y la planeación de producción) obedecen a los mismos principios que los restantes sistemas. Por ello, se analiza, en una primera fase, la tarea de toma de decisiones de mayor envergadura, a la que se subordina, en calidad de subtarea, el diseño de la pieza, herramienta, e instalación de que se trate. En una segunda etapa, se realiza el análisis de la tarea de diseño. La tarea de planeación del proceso de fabricación se subordina, sin dudas, al diseño del producto a fabricar. Esta subordinación obedece necesariamente a los principios de organización de la estructura centralizada, ya que se requiere fabricar exactamente lo que se diseñó. El sistema CAPP es el encargado de generar las diferentes opciones de fabricación del producto para los agregados productivos del taller en cuestión, por lo que suministra *propuestas* al sistema de toma de decisiones de producción del taller. La propuesta seleccionada *para cada fase dada de fabricación de cada producto en cada agregado tecnológico* debe ser implementada *en el momento establecido* por el sistema de toma de decisiones de la producción del taller. El cumplimiento de las tareas productivas puede y debe ser realizado mediante la transferencia de la información directiva desde el CAPP hasta el agregado tecnológico de que se trate.

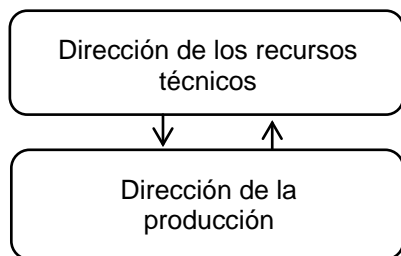


Fig. 2.13 Flujo de la información directiva

De la descomposición en el tiempo de la tarea de toma de decisiones de la producción (ilustrada en la figura 2.12) se deduce la existencia de transferencia de información directiva entre el sistema de toma de decisiones de los recursos técnicos y el de la

elaboración de secuencias de producción, según se muestra en la figura 2.13. De la figura se desprende que semejante interacción se establece también entre los sistemas de aseguramiento de los recursos laborales, humanos y financieros con el sistema de dirección de la producción, al ritmo del proceso productivo, en este caso. El sistema de toma de decisiones de los recursos técnicos genera opciones de tecnologías, las que son utilizadas por el sistema de toma de decisiones de producción en la etapa de generación de secuencias productivas. Una vez seleccionada la opción adecuada de tecnología, el sistema de fabricación utiliza la información correspondiente para fabricar las piezas (maquinadas, cortadas en chapas). Así, el sistema de toma de decisiones de los recursos técnicos incluye el diseño de la pieza (sistema CAD), la generación de opciones de tecnologías de fabricación (sistema CAPP) y la transferencia de la información al sistema CAM para la fabricación, por la opción de tecnología seleccionada por el sistema de toma de decisiones de la producción (sistema CAP). El sistema puede ser complementado con sistemas CAE para la simulación del comportamiento del complejo productivo.

En la figura 2.14 se muestra la estructura básica de la integración CAD/CAPP/CAM/CAP, incluyendo la relación de intercambio de información directiva con el sistema CAP en los ejemplos de la fabricación de piezas maquinadas en máquinas herramienta y de piezas planas de configuración irregular cortadas en chapas. En la figura se entiende como CNC el control numérico computarizado. Esta relación consiste en la entrega, por el sistema CAPP, de opciones de fabricación en diferentes máquinas de cada una de las piezas programadas y la selección, por el sistema CAP, de la opción más apropiada para cada pieza, tomando en consideración las complejidades operativas surgidas en el taller, incluídos los aseguramientos de todo tipo y la influencia de perturbaciones del entorno. Una vez definida la opción de fabricación más adecuada, el sistema CAPP suministra la información necesaria al sistema CAM para ejecutarla.

La información directiva a tomar en consideración para ambas tecnologías de fabricación está constituida por los planos de las piezas, restricciones constructivas, los requisitos relacionados con los volúmenes de producción y disponibilidad de materia prima asociada al lote de producción.

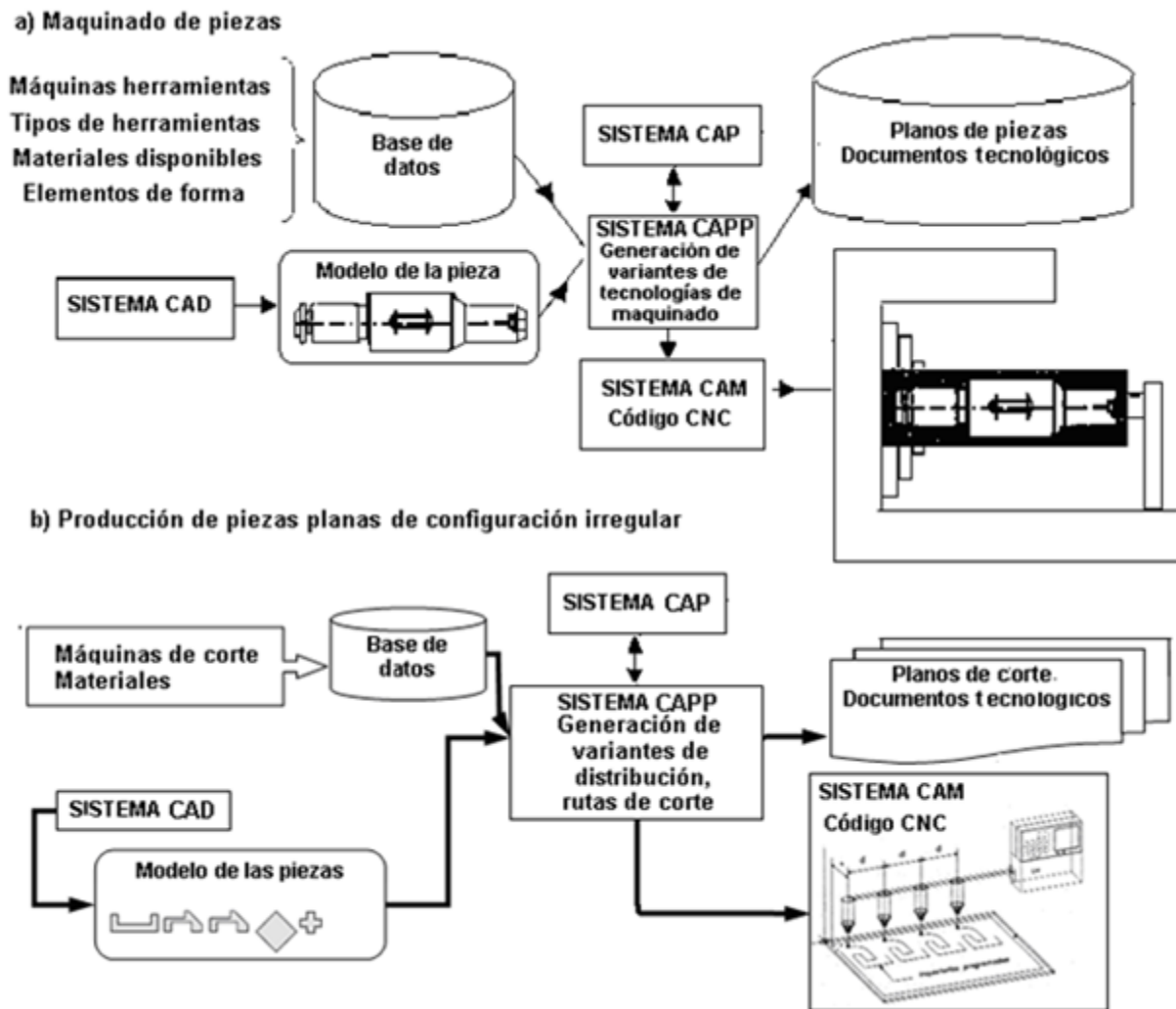


Fig. 2.14 Integración de sistemas CAP, CAD, CAPP, CAM para la fabricación de piezas.

En las aplicaciones 14 y 17 se presentan esquemas de solución a los problemas de fabricación de piezas maquinadas en tornos y de piezas planas en máquinas de corte, respectivamente. Del estudio de ambas aplicaciones es posible extraer conclusiones válidas para la integración CAD/CAPP/CAM no sólo para el diseño y la fabricación de piezas, sino también para la integración del diseño y la fabricación de producciones de construcción de maquinarias, en general.

2.4 Análisis de los sistemas de toma de decisiones por tareas

Las tareas de preparación de decisiones derivadas de la aplicación de los principios de descomposición enunciados anteriormente se someten a análisis externo e interno (figura 2.15). La necesidad en la realización de estas etapas de análisis se fundamenta en los

principios del enfoque cibernético de Norbert Wiener [237], completados con resultados de investigación de este autor, expuestos en el acápite 2.1.

El análisis externo consta de las siguientes etapas:

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

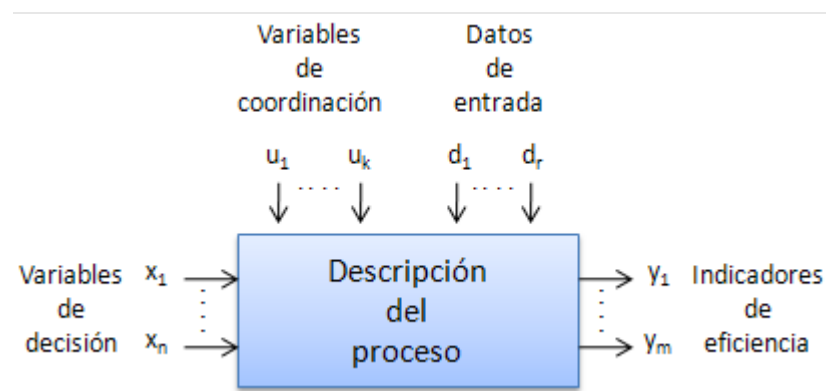


Fig. 2.15 Clasificación de la información involucrada en los procesos de preparación y toma de decisiones

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

- Indicadores de resistencia mecánica.
- Ganancia esperada.
- Otros indicadores calculables.

Ejemplos de indicadores no cuantificables son:

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

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

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

indicadores cuantificables a optimizar, el conjunto de variables intermedias a restringir y el conjunto de indicadores de carácter subjetivo a evaluar. Así, en correspondencia con la formulación (2.2), se plantea el modelo conceptual de preparación y toma de decisiones.

$$\min z_1(x_1, \dots, x_n; y_1, \dots, y_m; g_1, \dots, g_r)$$

$$\min z_2(x_1, \dots, x_n; y_1, \dots, y_m; g_1, \dots, g_r)$$

.

.

(2.66)

.

$$\min z_m(x_1, \dots, x_n; y_1, \dots, y_m; g_1, \dots, g_r)$$

Asegurando el cumplimiento de:

$$\left. \begin{aligned} g_i^{\inf} &\leq g_i(x_1, \dots, x_n; y_1, \dots, y_m; g_1, \dots, g_r) \leq g_i^{\sup}; \quad i = (1, \dots, r) \\ (2.67) \quad x_i^{\inf} &\leq x_i \leq x_i^{\sup}; \quad i = (1, \dots, n). \end{aligned} \right\}$$

Donde:

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

1 si el indicador $y_j(u, x)$ debe ser minimizado

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

-1 si el indicador $y_j(u, x)$ debe ser maximizado

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

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

- **Descomposición de la tarea estudiada en elementos componentes.** Se realiza a partir de la estructura matemática del modelo conceptual elaborado de acuerdo a una de las estructuras de descomposición estudiadas en el acápite 2.2. Esta fase simplifica

el modelado detallado de la tarea estudiada al descomponerse este proceso en el modelado de varias subtareas interrelacionadas y prepara al analista para el estudio posterior de los mecanismos de composición de soluciones (o de conciliación de decisiones) que se realiza en las fases posteriores de análisis y síntesis del sistema.

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

El análisis interno consta de las siguientes fases:

- **Modelado matemático.** Se determinan aquellas relaciones que permiten explicar las salidas (indicadores de eficiencia), a partir de las entradas del proceso (variables de coordinación, de decisión y datos de entrada). En esta fase quedan precisados los datos de entrada de la tarea, los que están constituidos por los parámetros constantes y por toda clase de información de entrada no asociada directamente a la tarea estudiada.
- **Organización racional de los procedimientos de cálculo.** Se precisa la composición de las variables de decisión y el orden de los cálculos que conducen a procedimientos con la menor cantidad posible de ciclos, quedando definidos los algoritmos de cálculo del proceso. Aquí se emplean diferentes métodos, desde los trabajos fundacionales de D.F. Rudd y Ch. C. Watson [204], los que aportaron los principios básicos para la solución de este problema, hasta los métodos más modernos, como el de los grafos dicromáticos [157].
- **Identificación de todos y cada uno de los componentes del modelo matemático conceptual de preparación y toma de decisiones por las diferentes tareas derivadas de la descomposición.** Se realiza la descripción detallada del procedimiento de cálculo básico a ser insertado en el procedimiento de generación de opciones, el cual puede tener carácter implícito, que permite calcular las salidas $y_j(x)$,

$g_i(x)$ y la determinación de los procedimientos gráficos y de simulación complementarios que aportan la información requerida por el decisor para precisar el comportamiento, una a una, de las opciones de solución generadas a partir del cálculo básico implementado en el procedimiento de generación de opciones. El resultado final del análisis interno es el punto de partida del proceso de síntesis.

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

La metodología de análisis expuesta no resta validez a otras en el campo de la Informática, las que se presentan en los trabajos de gran número de autores [34], las que le sirven de complemento.

Aplicación 11: Análisis externo de la tarea de diseño de troqueles simples y progresivos de corte y punzonado

Esta investigación fue realizada en el marco de una Tesis de doctorado tutorada por el autor de este trabajo [226].

Estudio del sistema de mayor envergadura

La fabricación de piezas por corte y punzonado, al igual que por las restantes tecnologías de estampado en frío, se subordina a la tarea general de diseño de tecnologías de fabricación de piezas, las que pueden ser fabricadas por una secuencia dada de tecnologías o bien por una específica [119, 216, 236].

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 de troqueles simples y progresivos. Como elementos determinantes de la generación de esta tecnología se encuentran, necesariamente, la distribución de las piezas en el semiproducto y el diseño del troquel más

adecuado para fabricar la pieza en cuestión. La tarea de diseño de un troquel tiene que conciliarse con la tarea de distribución de las piezas, lo que determina el ancho del semiproducto requerido. Quedan, además, definidos otros parámetros de la tecnología, tales como la productividad de la instalación de conformado, el número de carreras útiles utilizadas, la fuerza de trabajo a emplear (en dependencia del grado de automatización que se decida), la vida útil de la herramienta, etcétera.

De esta manera, la tarea de diseño de troqueles simples y progresivos se subordina a la tarea general de fabricación de piezas, la que incluye la determinación de las secuencias óptimas de fabricación, la asignación, en una primera etapa, de tareas concretas de generación de tecnologías a sistemas particulares concebidos con este objetivo (de maquinado, fundición, estampado en frío y en caliente, laminación, extrusión y otras). En el proceso de generación de tecnologías concretas los sistemas del nivel inferior entregan opciones de tecnologías, en una segunda etapa, 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 2.16 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, la configuración y especificaciones técnicas de la pieza a fabricar son procesadas por un sistema encargado de determinar la secuencia de operaciones tecnológicas más adecuadas. Los sistemas de generación de las diferentes tecnologías particulares y del diseño del herramental asociado dan respuesta a las correspondientes fases de fabricación. En el caso del conformado en frío por corte y punzonado se destacan como tareas clave, indisolublemente vinculadas, las tareas de distribución de la pieza en el semiproducto y del diseño del troquel [119, 216].

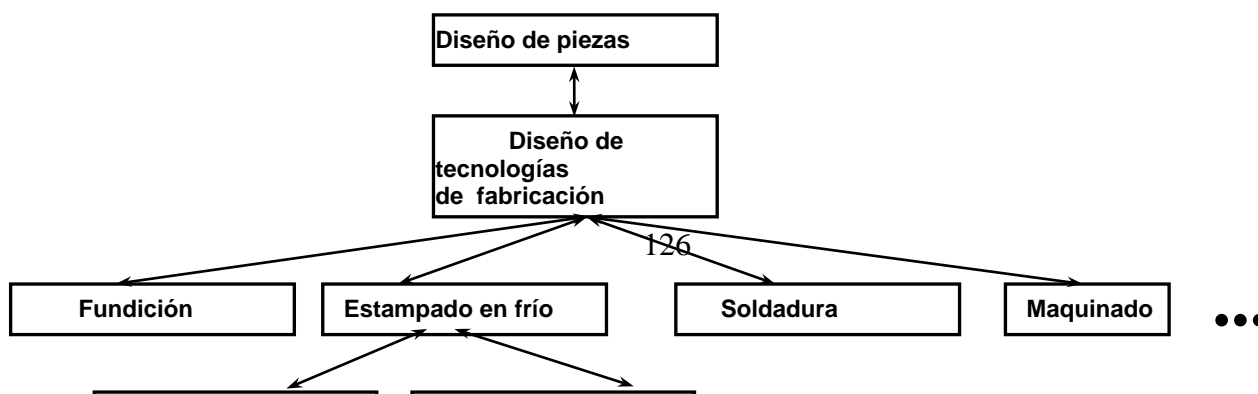


Fig. 2.16 Jerarquía de los procesos tecnológicos.

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

Del estudio anterior 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 las decisiones asociadas a ambas tareas.

El análisis se inicia por la tareade distribución de piezas en la chapa.

Indicadores de eficiencia

Aprovechamiento de la chapa*Apch*

Variables de decisión

- | | | |
|---|---|--------------|
| 1 | Desplazamiento entre piezas en el eje X | <i>DespX</i> |
| 2 | Desplazamiento entre piezas en el eje Y | <i>DespY</i> |

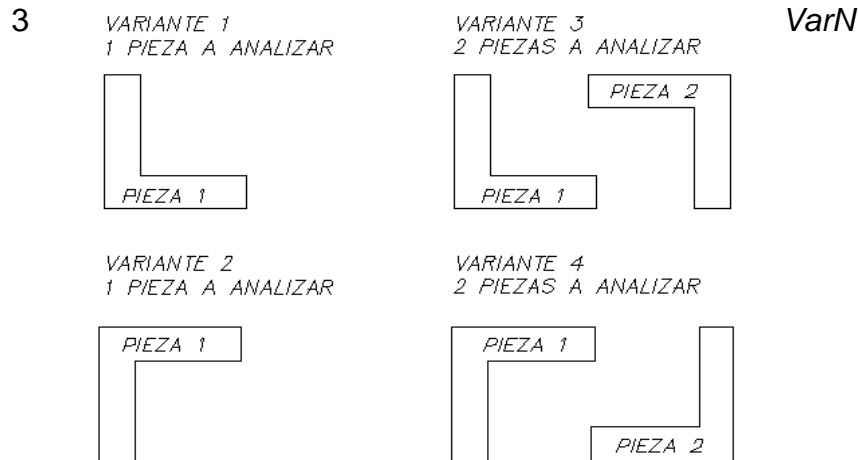


Fig.2.17.Variantes y posiciones de las piezas a analizar.

En la solución de la tarea de distribución de piezas en la chapa se han utilizado un algoritmo empírico basado en el método de exploración de la Programación No lineal para cada una de los posibles esquemas de distribución mutua entre las piezas, ilustrados en la figura 2.17

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

La descomposición de la tarea original en dos subtarefas intervinculadas es consecuencia de la imposibilidad de la solución simultanea de la distribución de piezas en el semiproducto y del diseño del troquel. En efecto, la descripción recién realizada del procedimiento para la distribución de piezas en la plancha resulta suficiente para percibir no solo su complejidad, sino también su especificidad, lo que hace imposible su sustitución en un algoritmo integral de distribución y diseño.

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 de aquella que asegura el mejor compromiso razonable entre los indicadores de eficiencia de todo el proceso. En otras palabras, en la solución de ambas tareas se utiliza una estructura de conciliación de decisiones disperso-conciliada.

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

Análisis externo de la tarea de diseño del troquel

Los troqueles de corte y punzonado de chapas constituyen herramientas muy utilizadas en la industria mecánica para la producción de piezas planas de las más disímiles configuraciones. Del estudio del sistema de mayor envergadura se destacan como variables de coordinación, las determinadas por la configuración de la pieza terminada, las especificaciones técnicas de la pieza y el tamaño del lote.

A partir de encuestas efectuadas 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:

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

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

- | | | |
|-----|--|---------------|
| 1. | Tipo de troquel | <i>TTroq</i> |
| | [Simple / placa guía / armazón de columnas] | |
| 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 centradores | <i>ElCen</i> |
| 8. | Tipo de matriz y filo. | <i>MaPar</i> |
| 9. | Elementos de posicionamiento | |
| | Regla guía | <i>ReGui</i> |
| | Presionador lateral | <i>PreLa</i> |
| 10. | Material de la matriz | <i>MatMa</i> |
| 11. | Material del punzón | <i>MatPu</i> |
| 12. | Bases | |
| | Tipo (fundida o laminada) | <i>BasTip</i> |
| | Posición de las columnas | <i>PoCol</i> |
| | Forma de la columna | <i>TiCol</i> |

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

El análisis interno incluye la metodología de cálculo de ingeniería propia de esta especialidad y los procedimientos gráficos y de simulación que permiten completar la evaluación del decisor de las diferentes opciones de solución generadas por el sistema una vez sintetizado.

Conclusiones

1. Las estructuras adecuadas de descomposición de las tareas de toma de decisiones de ingeniería dependen directamente de la estructura de los modelos matemáticos que los describen y permiten buscar opciones de solución próximas a las óptimas. Estas estructuras son semejantes a las estructuras organizativas establecidas por el ser humano en su evolución histórica.
2. Los principios de descomposición de las tareas de toma de decisiones en el espacio, por funciones y en el tiempo son aplicables a la solución de numerosas tareas prácticas y permiten elaborar pirámides de tareas interrelacionadas.
3. El análisis externo de las tareas de toma de decisiones permite elaborar los modelos matemáticos de estas tareas acoplados perfectamente al entorno donde deberán funcionar. Su descomposición en modelos interrelacionados asociados a los respectivos elementos constituyentes facilita la ejecución posterior del análisis interno y la síntesis del sistema.
4. El análisis interno está destinado a la identificación de los diferentes sistemas de modelos de optimización multicriterial, de simulación, informativos y de representación gráfica resultantes de la descomposición. Como resultado, se obtiene la composición de modelos detallados que formarán parte del sistema final de preparación y toma de decisiones que se desarrolla en la etapa posterior de síntesis del sistema.
5. Las numerosas aplicaciones realizadas de la metodología de análisis de sistemas propuesta en tareas propias de diferentes áreas de la ingeniería avalan su validez al menos para un gran número de potenciales aplicaciones prácticas.

CAPÍTULO 3

SÍNTESIS DE LOS SISTEMAS DE INGENIERÍA

Concluido el análisis del sistema de preparación y toma de decisiones se enfrenta el problema de sintetizarlo, es decir, desarrollar las herramientas computacionales que sean capaces de diseñar el sistema analizado. El proceso de síntesis tampoco se puede dejar a la simple imaginación del desarrollador del sistema, sino que necesariamente obedece a determinados procedimientos de síntesis y a los métodos matemáticos que permitan ejecutarlos efectiva y eficientemente. En lo adelante, se presentan ideas y métodos básicos que facilitan realizar la síntesis de los sistemas de ingeniería. A ello hay que añadir el inmenso acervo de métodos y procedimientos desarrollados por la humanidad.

Con fines de síntesis de sistemas con estructura jerárquica participativa se formuló por el autor la tarea de selección de propuestas, se estudiaron sus propiedades y elaboró el método de optimización discreta asociado [10]. La formulación de esta tarea aporta un modelo del problema de conciliación de decisiones entre subtareas derivadas de la descomposición de tareas complejas de optimización discreta. No obstante, tanto el modelo como el método de solución desarrollados consideran la posibilidad de representación de los criterios como funciones separables por objetos más una componente sistémica, con la particularidad de que la magnitud de esta componente influye sensiblemente en la convergencia del algoritmo desarrollado, el que permitió enfrentar con éxito un grupo de tareas de alta complejidad, reflejadas en tres de las investigaciones de aplicación presentadas con el fin ilustrar la aplicabilidad de los resultados básicos a las diferentes áreas de la ingeniería.

Con vistas a superar las limitaciones mencionadas fue formulada la *tarea generalizada de selección de propuestas* [12, 17], la que presupone indicadores de eficiencia no necesariamente separables. Para la solución de esta última se requiere de procedimientos que permitan hacer evolucionar códigos de solución. Esta realidad motivó formular los rasgos esenciales del método de Integración de Variables, el que aparece publicado por

primera vez en [18] y se caracteriza, en general, por hacer evolucionar poblaciones de códigos de soluciones, independientemente de los operadores que se utilicen con este fin. Se han desarrollado algunos algoritmos del método, los que resultan competitivos en relación con otros conocidos, en particular con los Algoritmos Genéticos, en la solución de tareas complejas. En la bibliografía especializada aparecen varios otros algoritmos que pudieran ser entendidos como casos particulares de este método.

Ya en [10] se proponía un esquema general de solución al problema de toma de decisiones, para sistemas organizados en estructuras jerárquicas participativas, compuesto por dos fases bien delimitadas: la fase de preparación de decisiones o de generación de opciones de decisión, y la fase de toma de decisiones o de selección de las opciones de solución previamente generadas. Sin embargo, solo ahora esta propuesta tiene un soporte material a partir de la posibilidad de solucionar la segunda fase de este esquema para un gran número de casos, incluyendo los que han sido analizados por el autor.

3.1 Procedimientos y herramientas propios de la síntesis de los sistemas

En correspondencia con lo estudiado en los capítulos 1 y 2, durante la síntesis de los sistemas de ingeniería, se requiere desarrollar, a los diferentes niveles de la estructura del sistema analizado, procedimientos y herramientas para:

- La modelación, identificación de modelos y organización racional de los cálculos de ingeniería, lo que se realiza en la fase del análisis interno
- La preparación de decisiones, es decir, generación de opciones de solución, su filtrado y reevaluación, por procedimientos gráficos y de simulación.
- La toma de decisiones: selección de opciones al nivel de todo el sistema
- La implementación amigable de los procedimientos anteriores, mediante técnicas de Ingeniería de sistemas.

El filtrado y la reevaluación de las decisiones se realiza con ayuda de procedimientos gráficos y de simulación, así como la evaluación del personal (u otros sistemas) vinculados al proceso de toma de decisiones.

En la figura 3.1 se ilustra los procedimientos y herramientas principales que intervienen en los procesos complejos de síntesis de los sistemas automatizados para la preparación y toma de decisiones de ingeniería, los que se corresponden con extensas áreas del conocimiento, sobre las que se exponen en el capítulo 1 su estado actual de desarrollo. En lo adelante se asumen los resultados de la bibliografía en las áreas de los procedimientos y herramientas CAD, CAE y de evaluación subjetiva del personal en los sistemas hombre – máquina y se presentan los enfoques propuestos por el autor para la generación y selección de opciones de solución en las estructuras de conciliación estudiadas.

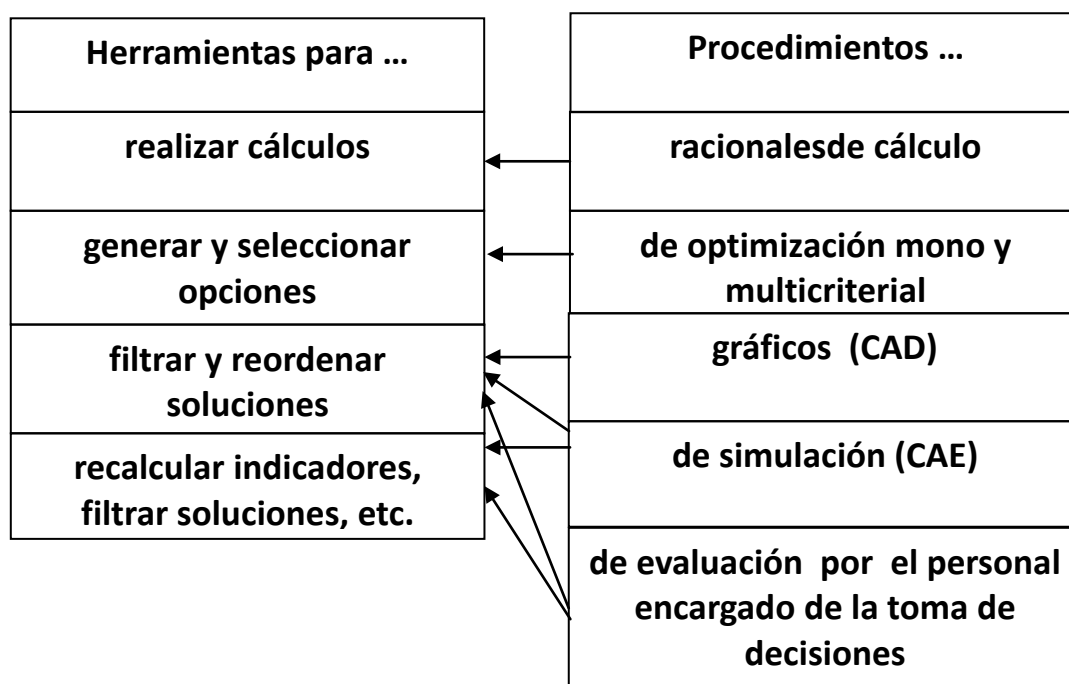


Fig. 3.1 Herramientas y procedimientos utilizados en los sistemas de preparación y toma de decisiones de ingeniería

3.2. Preparación de decisiones

En el capítulo 1 se exponen las ideas principales del método Aproximatorio – Combinatorio de V. R. Jachaturov [121]. En correspondencia con ese método para solucionar el modelo (2.1) se requiere generar conjuntos de soluciones α -óptimas del modelo (2.2), filtrar y reevaluar por diferentes medios las opciones generadas. Así, la generación de opciones de decisión α -

óptimas en presencia de múltiples objetivos se entiende como el contenido de la función de preparación de decisiones en los sistemas de ingeniería, a partir de la definición siguiente.

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

$$(3.1) \quad x_i \in D^\alpha \Leftrightarrow z_j(x_i) - z_j^{id}(x_i) \leq \alpha_j$$

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

Los valores de los parámetros α_j determinan las soluciones α_j - óptimas de la tarea (2.2), minimizando tan solo el criterio z_j , 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, inyendo los derivados de los procesos de simulación complementarios al modelo básico (2.2), de la evaluación de las imágenes gráficas obtenidas con ayuda de sistema tipo CAD y del procesamiento subjetivo de las opciones de decisión asumidas por el decisor.

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

En ausencia de indicadores no cuantificables de eficiencia o, lo que resulta equivalente, en el caso que no se requiera conciliar las decisiones del sistema dado con las de otros sistemas que se encuentran al mismo nivel jerárquico, el sistema de preferencias del decisor se satisface, evidentemente, por alguna solución del conjunto N de soluciones eficientes, mediante alguno de los procedimientos iterativos de optimización multiobjetivo que utilizan el programa de Tchebycheff, lexicográfico o aumentado de Tchebycheff [95, 218].

En presencia de indicadores no cuantificables, el problema consiste en generar soluciones en un entorno al mejor compromiso entre los indicadores cuantificables, tal y como se ilustra en la figura 3.2.

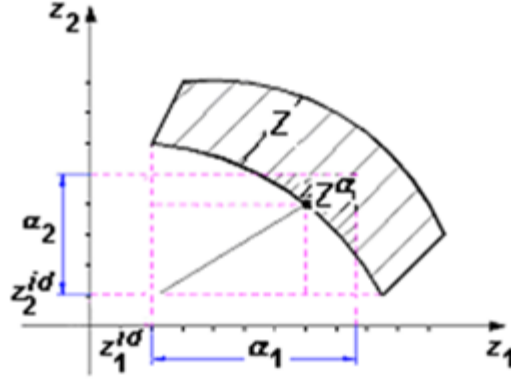


Fig. 3.2. Ilustración del espacio Z^α de búsqueda de la mejor solución de compromiso.

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

$$\gamma = \max \{w_j \alpha_j / j \in (1, \dots, r)\}, \quad (3.2)$$

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

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

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

Donde:

β^{min} : Valor de β en la solución óptima al Programa de Tchebycheff.

Por otra parte, el espacio de soluciones asociado a Z^α es el espacio $D^\alpha = \bigcap_{i=1}^r D^{\alpha_i}$, por lo que el espacio de búsqueda de la mejor solución de compromiso entre los indicadores de eficiencia de la tarea de optimización multiobjetivo está constituido por la intersección entre los espacios de soluciones α_j óptimas por todos y cada uno de los criterios de optimalidad. Esta afirmación se ilustra convenientemente en la figura 3.2 y fue demostrada con todo rigor por V. R. Jachaturov[11, 121].

Búsqueda del mejor compromiso entre indicadores cuantificables de eficiencia

El problema de búsqueda del mejor compromiso entre los indicadores cuantificables de eficiencia requiere del muestreo de la región de soluciones eficientes de la tarea de optimización con múltiples criterios asociada por cualquiera de los métodos iterativos [95, 131, 203, 218]. Algunos de estos métodos presuponen la existencia de un analista encargado de presentar un conjunto de opciones diferentes a un decisor, el que elige la que prefiere, pudiendo previamente mostrar indiferencia entre algunas de ellas. La búsqueda se limita a la región de soluciones eficientes.

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

Sin negar la validez de los métodos iterativos señalados en la literatura, el autor de este trabajo ha experimentado con éxito el siguiente procedimiento, basado en la idea del método del vector de criterios de aspiración de Wierzbicki [238]:

- Generación de la solución eficiente \bar{z}_i , correspondiente a valores iguales de los coeficientes de peso w_i , $\forall i \in (1, \dots, m)$. La solución encontrada será denominada *solución realista*.
- Determinación de valores deseables z_i^d de cada indicador cuantificable de eficiencia a partir del conocimiento de sus valores ideales z_i^{id} y de la solución realista \bar{z}_i , $\forall i \in (1, \dots, m)$.

- Si la diferencia $z_i^d - z_i^{id}$ es superior a un valor predeterminado, se sustituye $z_i^{id} = z_i^d$ y se retorna al inicio del procedimiento. En caso contrario, el decisor mejora uno a uno los valores de los indicadores mediante el incremento del peso w_j correspondiente. En estas condiciones se sustituyen los restantes pesos por el algoritmo: $w_i = w_i \times cte$, $cte = (1 - val) / (1 - oldval)$, donde val es el nuevo valor asignado a w_j y $oldval$ es su valor anterior.

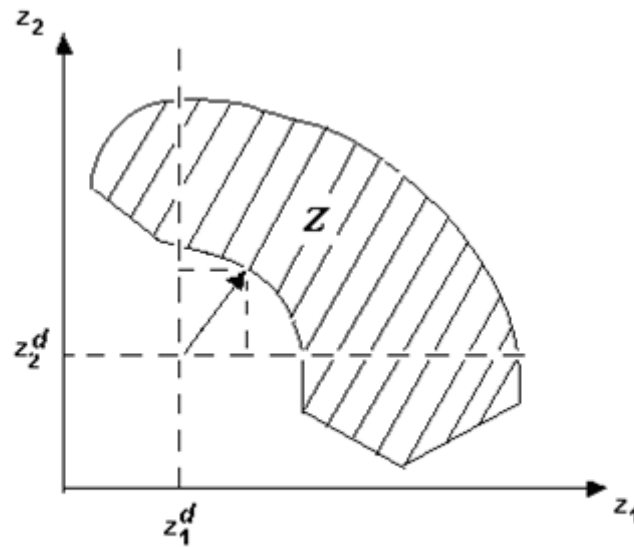


Fig. 3.3 Muestreo de la Región de Soluciones Eficientes en la proximidad de la solución deseada.

En muchas tareas prácticas el decisor puede, a partir del conocimiento previo que tiene del problema estudiado, determinar valores $z_i^d > z_i^{id}$ desde la primera iteración, lo que puede reducir significativamente el muestreo requerido en la búsqueda de la solución de compromiso.

Aplicación 12: Diseño óptimo multiobjetivo de paredes refractarias y aislantes

Se requiere determinar los materiales y el espesor de una pared refractaria y aislante de n capas compuesta de ladrillos, asegurando el mejor compromiso posible entre los indicadores de eficiencia: Espesor total (z_1), costo material (z_2), densidad del flujo calórico (z_3), temperatura externa (z_4) [12].

En la figura 3.4 se ilustra el análisis externo de esta tarea.

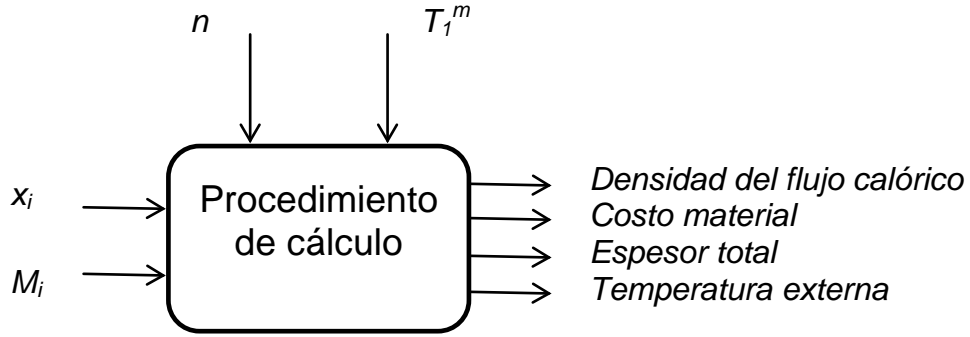


Fig. 3.4 Ilustración del análisis externo de la tarea de diseño de una pared refractaria o aislante

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

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

Formalización matemática

$$\text{Minimizar: } Z = \max \left\{ w_1 \frac{|z_1 - z_1^d|}{|z_1^d|}, w_2 \frac{|z_2 - z_2^d|}{|z_2^d|}, w_3 \frac{|z_3 - z_3^d|}{|z_3^d|}, w_4 \frac{|z_4 - z_4^d|}{|z_4^d|} \right\} \quad (3.3)$$

Donde:

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

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

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

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

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

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

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

Se debe de asegurar el cumplimiento de las siguientes restricciones:

$$T_i \leq T_i^{max}(M_i), \quad i=2, \dots, n \quad (3.4)$$

$$0 \leq x_i \leq x_i^{max}, \quad i=1, \dots, n \quad (3.5)$$

$$x_i \in (d_i^1, \dots, d_i^{k_i}), \quad i=1, \dots, n \quad (3.6)$$

Donde:

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

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

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

Las restricciones (3.4) establecen que no puede ser superado el valor máximo de temperatura de la capa i sin afectación de las propiedades físicas del material M_i .

Las restricciones (3.5) determinan que el espesor de las capas debe encontrarse entre los valores límites permitidos.

Las restricciones (3.6) obliga al espesor de cada capa a adoptar uno de los d_i posibles valores, de acuerdo con las variantes permitidas de disposición de los ladrillos.

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

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

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

En [11, 12] se expone, paso a paso, un algoritmo de solución a este problema, con otra función objetivo, en el que se combinan diferentes métodos.

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

$$\beta = f(z, w) \quad (3.7)$$

En calidad de función (3.7) puede ser utilizada con éxito la distancia ponderada de Tchebycheff, desde la solución ideal hasta la región de existencia de solución o una aproximación a esta distancia.

En (3.7) pueden aparecer solocriterios (indicadores de eficiencia) cuantificables, mientras que los indicadores de carácter subjetivo pueden ser tomados en consideración en el proceso de selección de la solución definitiva entre un conjunto de opciones, solo mediante su evaluación individual. Esta evaluación se realiza con el auxilio de procedimientos de simulación más detallados (y precisos) que el utilizado en el procedimiento de preparación de decisiones, y por medio de la observación de imágenes gráficas de las soluciones individuales.

En la generación de opciones de solución se pueden en principio utilizar todos los métodos de la Programación Matemática, en especial los métodos iterativos de la Programación Geométrica y discreta, así como las metaheurísticas modernas.

El análisis de las imágenes gráficas y la realización de procesos de simulación especiales deben permitir al usuario evaluar los indicadores no cuantificables. En esta etapa se hace un análisis subjetivo de la adecuación de las soluciones preparadas a las necesidades del usuario y se realizan, si es preciso, las modificaciones necesarias. Es posible que el usuario decida que la importancia relativa concedida a los indicadores de eficiencia cuantificables debe ser modificada, en cuyo caso se repite todo el procedimiento.

3.3.Preparación y toma de decisiones en los sistemas de ingeniería organizados en estructuras centralizadas

En los sistemas con estructura centralizada directa, cuya estructura matemática se corresponde al modelo conceptual (2.12), resulta con frecuencia suficiente, en la búsqueda de soluciones eficientes, la utilización de los métodos de la Programación Matemática orientados a modelos con estructura matemática específica, tales como la programación lineal, cuadrática y geométrica, así como los métodos discretos asociados a ellos en la generación de soluciones, en dependencia del carácter continuo o discreto del modelo. La generación de conjuntos de opciones de solución a las tareas con estructura centralizada directa se hace necesaria en los casos cuando la complejidad del modelo requiera de la utilización de modelos complementarios al básico para el filtrado y revaluación de soluciones.

Para tomar en consideración la dependencia existente de los parámetros del modelo con respecto a los valores de las variables, el autor ha utilizado con éxito el esquema algorítmico mostrado en la figura 7. La rectificación de los parámetros del modelo se efectúa por los métodos iterativos de búsqueda de raíces a procedimientos de cálculo. En el caso particular de la aplicación 5 se trata de los parámetros: c_{ijk} , p_{ij} y T_j .

En los sistemas con estructura centralizada, cuya estructura matemática se corresponde con el modelo conceptual (2.19) – (2.21) se propone en el capítulo 2 el siguiente procedimiento:

- Solución de los modelos de aproximación (2.19) con el fin de hallar valores próximos al óptimo de $u = (u_1, u_2, \dots, u_n)$ correspondientes a los establecidos por el nivel central a las variables de coordinación de los sistemas de toma de decisiones de todos y cada uno de los elementos del sistema.
- Cálculo de los valores de $x_s^{opt}(u_s)$, para $u_s = u_s^{opt}$.

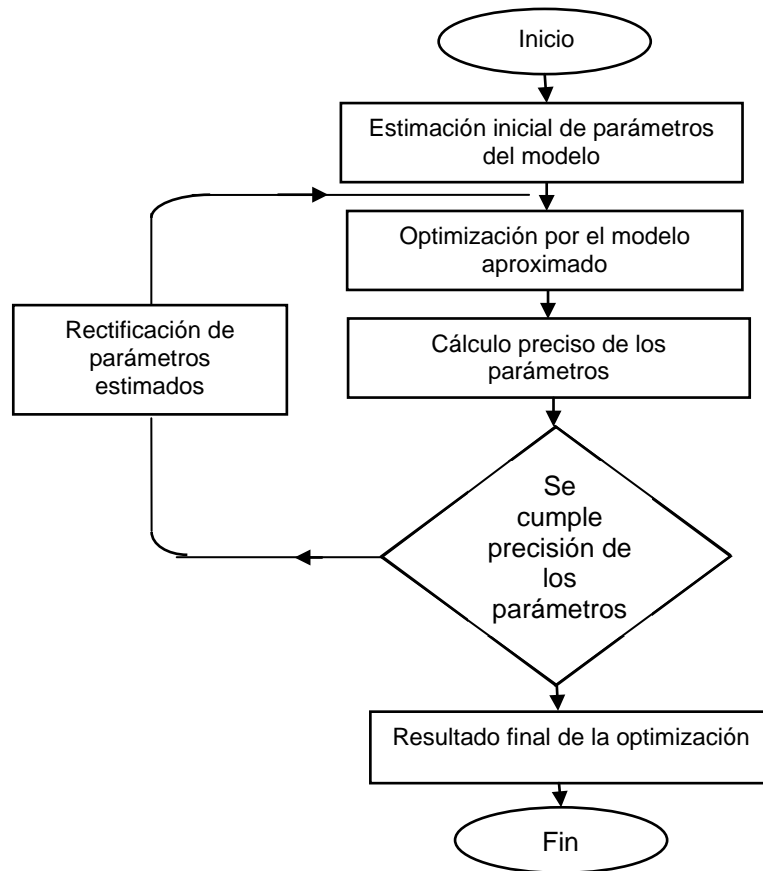


Fig. 3.5 Esquema de optimización por aproximaciones sucesivas de procesos descritos por modelos de aproximación

Para la implementación del procedimiento se requiere realizaren la etapa de elaboración del sistema de preparación y toma de decisiones, fuera de línea:

- La búsqueda de solución a (2.20), para cada elemento s del sistema, para valores discretizados admisibles de las variables de coordinación u (o todos sus valores admisibles, en el caso de u discreta). Este paso del procedimiento se realiza con ayuda de las técnicas de optimización propuestas para la estructura centralizada directa.
- La determinación de las funciones de aproximación $Q_s(u_s)$ y $x_s^{opt}(u_s)$ con ayuda de las técnicas de elaboración de estas funciones estudiadas en 1.11. Las funciones

$x_s^{opt}(u_s)$ constituyen reglas de conducta de los sistemas del nivel inferior.

3.4 Preparación y toma de decisiones en los sistemas de ingeniería organizados en estructuras disperso conciliadas

En los sistemas cuya estructura matemática se corresponde con el modelo (2.25) en el capítulo 2 se propone, para modelos en variables continuas, el siguiente procedimiento general:

- Solución al modelo aproximatorio (2.26) con el fin de hallar valores próximos al óptimo de $u = (u_1, u_2, \dots, u_k)$.
- Cálculo de los valores de $x_s^{opt}(u)$, para $u = u^{opt}$.

Para la realización del procedimiento anterior se requiere solucionar, fuera de línea, en la etapa de organización del sistema, las siguientes tareas:

- La búsqueda de solución a (2.25), para cada elemento s del sistema, para valores discretizados admisibles de las variables de coordinación u , o todos sus valores admisibles, en el caso de un número finito de valores de u discreta.
- La determinación de las funciones de aproximación $Q_s(u)$ y $x_s = x_s^{opt}(u)$.

De acuerdo con la experiencia del autor, tanto en la generación de soluciones previa a la elaboración de las reglas de conducta como en la solución de la tarea original se utilizan los métodos de la programación no lineal, lo que se confirma con la solución a la aplicación 3 y parcialmente a la aplicación 4 expuestas en el capítulo 2. Esta experiencia no niega la posibilidad de requerirse la aplicación de las metaheurísticas modernas en la solución de tareas en variables continuas de alta complejidad que forman parte de estructuras de este tipo.

En el caso de las tareas en variables discretas, por algunas de las tareas, correspondientes a elementos de la estructura se aplica directamente el método aproximatorio combinatoria: se generan poblaciones de soluciones por una parte de los elementos del sistema, las que son posteriormente revaluadas y reordenadas mediante la solución de las tareas propias de otros elementos del sistema. Así, por ejemplo, durante la solución de la aplicación 4 se generan opciones de solución por bloques de igual distancia al centro de recepción, entre las que se seleccionan las opciones de conjuntos tractivos que mejor satisfacen el sistema de

preferencias de decisor con la ayuda del modelo matemático(2.44) – (2.46). En la aplicación 17 se soluciona una tarea en variables discretas de alta complejidad correspondiente a esta estructura mediante el esquema expuesto utilizando un algoritmo del método de Integración de Variables.

3.5 Preparación y toma de decisiones en los sistemas de ingeniería organizados en estructuras jerárquicas participativas

En correspondencia con lo estudiado en 2.2.4 la tarea de preparación y toma de decisiones en los sistemas jerárquicos participativos se realiza en 3 etapas:

1. Solución a la tareacoordinadora $Min[Z(Q_1(u_1), ..., Q_n(u_n)) / h(u) \geq 0]$. El modelo solucionado en esta etapa constituye una aproximación a las correspondientes tareas del nivel superior, representadas por las funciones $Q_i(u_i)$ y permite realizar una precompatibilización de los espacios de existencia de solución a la toma de decisiones detalladas generadas en la etapa de conciliación de las soluciones detalladas por los sistemas encargados de la generación de opciones del nivel superior. Los métodos de solución utilizados en esta etapa se corresponden por completo con los utilizados en las estructuras centralizadas directas, estudiados en 2.22 y 3.3. De tal forma, la organización de estructuras centralizadas directas constituye parte componente durante la organización de estructuras jerárquicas participativas.
2. Generación, por cada sistema del nivel inferior de los espacios de posibles opciones de solución $X_s^\alpha = \{x_s / Z_s^{min} \leq Z_s(u_s^*, x_s) \leq Z_s^{min} + \alpha\}$, correspondientes a las soluciones α -óptimas de los modelos que describen en detalle las tareas del nivel inferior. Aunque el enfoque para la generación de opciones en esta etapa se corresponde totalmente con lo estudiado en 3.2, se pueden diferenciar esquemas específicos de solución para sistemas en variables discretas y para sistemas en variables continuas. En la generación de opciones se utilizan principalmente métodos heurísticos de evolución de poblaciones de solución, lo que presupone valores del parámetro α desconocidos previamente.

3. Toma de decisiones en el nivel superior, consistente en la selección de la combinación óptima de opciones entre los espacios de existencia X_s^α generados en la etapa anterior. En esta se pueden también diferenciar esquemas específicos de solución para sistemas en variables discretas y para sistemas en variables continuas. En esta etapa se utilizan también métodos heurísticos de evolución de poblaciones de solución.

Hasta el momento ha sido estudiado debidamente el esquema de solución anterior tan solo para sistemas discretos, por lo que el estudio posterior del tema se refiere tan solo a los sistemas jerárquicos discretos. Por otra parte, en 3.2 se estudia los principios generales para la generación de opciones de solución para sistemas discretos, por lo que en lo adelante, se estudian los enfoques de solución para la toma de decisiones en sistemas jerárquicos discretos.

Según se deduce del estudio realizado anteriormente, la toma de decisiones en los sistemas jerárquicos discretos consiste en la selección, por el nivel de toma de decisiones de todo el sistema, de aquella combinación de soluciones locales de los subsistemas del nivel inferior, dadas por los conjuntos X_s^α , $\forall s \in S$, de forma tal de dar solución a (2.36). En dependencia del carácter de los componentes de $Z(u^*, x)$, pueden presentarse dos casos diferentes:

1. Todos los objetivos del sistema pueden expresarse como la suma de sus componentes por subsistemas más una componente sistémica

$$z_j(x) = z_j(u^*, x) = \sum_s z_j(x_s) + \varepsilon_j(x), \quad \forall j \in J.$$
2. Al menos uno de los objetivos no podrá ser expresado como una función separable por subsistemas más una componente sistémica.

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

3.5.1 Caso de objetivos separables

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

$$\beta_1^s < \beta_2^s < \dots < \beta_i^s < \dots; \quad \beta_i^s \in R \quad (3.8)$$

El elemento i de (3.8) se corresponde con el vector solución $x_i^s = (x_{i1}^s, \dots, x_{im}^s)$ generado por el sistema asociado a la tareas $\in S$. Cada solución es evaluada por el conjunto de funciones $z_j, \forall j \in J = (1, \dots, r)$, con la particularidad que:

$$\beta_i^s = \max_{j \in J} \left\{ w_j \left| z_j(x_i^s) - z_{s,j}^{id} \right| \right\}, \quad w_j \in (0, 1), \sum_{j \in J} w_j = 1 \quad (3.9)$$

Donde:

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

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

La serie (3.8) es caracterizada por el conjunto de los índices $I_s = (1, 2, \dots, i, \dots)$ de sus elementos.

Las combinaciones posibles de índices se determinan por los elementos:

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

del producto de conjuntos :

$$E = I_1 \times I_2 \times \dots \times I_n \quad (3.10)$$

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

$$\varepsilon_j(e^k) \geq 0 \quad (3.11)$$

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

$$\min \{\beta\} \quad (3.12)$$

Donde:

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

$$= \sum_{s \in S} \beta_k^s + \max_{j \in J} \{w_j \mid \varepsilon_j(e^k)\}; \quad z_j^{id} = \sum_{s \in S} z_{sj}^{id} \quad (3.13)$$

De esta manera, la solución del programa de Tchebycheff durante la selección de la mejor combinación de opciones de los elementos del nivel inferior de un sistema complejo (o de las subtarefas derivadas de la descomposición de una tarea de optimización discreta compleja), se reduce a la búsqueda de una combinación tal de opciones por los diferentes subsistemas que minimice la función (3.13). El primer término de (3.13) está constituido por la suma de las distancias de Tchebycheff desde las soluciones ideales locales hasta las opciones de solución que forman parte de cada combinación e^k estudiada. Esas distancias tienen el sentido físico de pérdidas locales de los distintos subsistemas. El segundo término, constituido por el valor

$$\Delta\beta = \max_{j \in J} \{w_j \mid \varepsilon_j(e^k)\}, \quad (3.14)$$

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

3.5.2 Método de Selección de Propuestas

Para su presentación se formula previamente una tarea de optimización de carácter muy general y estudian sus propiedades

Tarea de selección de propuestas

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

$$Z_1^s < Z_2^s < \dots < Z_i^s < \dots; \quad Z_i^s \in \mathbb{R} \quad (3.15)$$

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

$$e^k = (k_1, k_2, \dots, k_s, \dots, k_n) \text{ del producto de conjuntos } E = I_1 \times I_2 \times \dots \times I_n$$

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

$$\varepsilon(e^k) \geq 0 \quad (3.16)$$

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

$$Z(e^k) = \sum_{s \in S} Z_k^s + \varepsilon(e^k) ; \quad \forall e^k \in E \quad (3.17)$$

A partir de la formulación realizada fueron estudiadas las propiedades de esta tarea y elaborado el método exacto de solución [10]. Con posterioridad fueron halladas funciones de aproximación para estimar la convergencia del método como función de los parámetros de la tarea a solucionar [17]. En [11,17] se desarrolla el tema de la composición de opciones de solución de tareas complejas con utilización del método y algoritmo asociados.

Definiciones básicas:

Propuestas de s: son los elementos del conjunto I_s

Valoraciones locales o pérdidas locales: son los elementos de la serie (3.15), que se simbolizan como Z_k^s

Función de pérdidas sistémicas: es la función $\varepsilon(e^k)$.

Función de pérdidas totales: es la función $Z(e^k)$.

Relaciones entre los elementos del conjunto E:

$$e^r \geq e^m \Leftrightarrow r_s \geq m_s, \forall s \in S$$

$$e^r = e^m \Leftrightarrow r_s = m_s, \forall s \in S$$

$$e^r \leq e^m \Leftrightarrow r_s \leq m_s, \forall s \in S$$

El conjunto representado por el elemento e^m se denomina *conjunto sucesor* de E_k por el elemento $m_s = k_s, s \neq r$ y $m_r = k_r + 1$. El conjunto E_k se denomina *conjunto antecesor* de e^r por el elemento e^r de S . Por definición $E'_k \subset E_k \subset E$

Definición : Sea la tarea de optimización $Z^{opt} = \min\{Z(x) / x \in D\}$

el espacio de soluciones $D^\alpha \subset D$ se denomina espacio de soluciones α -óptimo y la solución $x_i \in D$ solución α -óptima si $x^i \in D^\alpha \Leftrightarrow Z(x^i) - Z^{opt} \leq \alpha$

Teorema 1. La condición suficiente para que ningún elemento del conjunto $E_k \subset E$ representado por el elemento e^k sea solución de la tarea (3.17), es la existencia de un elemento $e^r \notin E_k$ para el cual se cumpla la condición

$$\sum_{s \in S} Z_k^s > \sum_{s \in S} Z_r^s + \varepsilon(e^r) \quad (3.18)$$

Teorema 2. Sea para el elemento $e^m \in E$ conocido un valor acotado de $\varepsilon(e^m)$ y para cada $s \in S$ se puede hallar un índice finito i_s para el cual

$$Z_i^s - Z_1^s > \varepsilon(e^m) + \sum_{s \in S} (Z_m^r - Z_1^r); \quad (3.19)$$

entonces, para cualquier componente de la solución óptima de la tarea e^{opt} se cumple:

$$i_s^{opt} < i_s \quad (3.20)$$

Consecuencia 1. Al evaluar las pérdidas sistémicas correspondientes a una combinación determinada, puede ser excluida la consideración de todas aquellas combinaciones, cuyas componentes por el elemento s superen el valor i_s , siempre que este índice satisfaga la expresión (3.20).

Consecuencia 2. Si existe al menos una solución de la tarea de selección de propuestas en lugar de las series infinitas (3.15), es suficiente la consideración de series finitas dadas por los conjuntos de índices $I_s = (1, 2, \dots, i_s)$, tales que $i_s^{opt} < i_s$.

Teorema 3. Sea el subconjunto E^* formado por las combinaciones posibles de índices:

$$i / i \in \bar{I}_s = (1, 2, \dots, i_s), \quad Z_i^s - Z_1^s \leq \alpha \quad \forall s \in S, \quad \alpha \in \mathbb{R}^+$$

entonces, si e^{opt} es la solución de la tarea en el conjunto E^* y el mínimo global en el conjunto E $e^m \neq e^{opt}$ tiene lugar:

$$Z(e^m) - Z(e^{opt}) \leq \varepsilon(e^m) + \sum_{s \in S} (Z_m^r - Z_1^r) - \max_s (Z_i^s - Z_1^s) \quad (3.21)$$

El teorema 1 permite eliminar conjuntos completos en el proceso de la búsqueda de la solución óptima, pudiéndose no considerarse los conjuntos representados por los elementos del conjunto E donde se cumple la condición (3.18).

El teorema 2 facilita el restringir el conjunto de propuestas I_s en la medida que se van obteniendo las pérdidas sistémicas para las diferentes soluciones del método de Selección de Propuestas. Además, es posible concluir que para todo sistema existe un valor α , el cual es común para todos sus elementos y cada uno de ellos, de modo que la solución óptima para todo el sistema se encuentra entre las soluciones α -óptimas de sus componentes.

El teorema 3 permite evaluar la proximidad de las soluciones que se obtienen en el proceso de ramificación con respecto a la óptima.

Para la generación de opciones de solución que se diferencia de la óptima en no más que un parámetro α a la condición de suficiencia (3.18) se le añade el valor de este parámetro, el que se calcula mediante

$$\alpha = \varepsilon(e^m) + \sum_r (Z_m^r - Z_1^r)$$

El proceso de ramificación se organiza de la siguiente forma:

Se construye un árbol cuyo tronco contiene todo el conjunto E , siendo su representante el elemento $e^1 = (1, 1, \dots, 1)$.

La cota inferior del tronco es:

$$V(e^1) = \sum_s Z_1^s$$

El conjunto E tiene n subconjuntos sucesores por los correspondientes elementos $s \in S$, por lo que:

$$E - e^1 = \bigcup_s E_s'$$

El primer nivel de ramificación incluye n nodos, correspondientes a los subconjuntos sucesores. Si la valoración del nodo r es superior al valor $Z(e^1)$, entonces este nodo y el conjunto de elementos a él asociado no se contemplan en lo adelante. Se calcula el valor de la función (3.17) para el elemento representante del subconjunto asociado al nodo con valoración inferior mínima y si éste es menor que $Z(e^1)$ se adopta el nuevo valor *record*.

El nuevo valor se compara con las cotas inferiores de los nodos en espera, eliminándose los nodos que satisfacen la condición (3.18).

El nodo con cota inferior mínima se somete a ramificación en los subconjuntos sucesores del conjunto a él asociado, se rectifica el valor *record* y se verifica la posibilidad de eliminar parte de los nodos de espera.

Este procedimiento se repite mientras quedan nodos en espera y la solución óptima es aquella correspondiente a la combinación representante del nodo ramificado con valor mínimo de la función (3.17).

En la figura 3.6 se ilustra el proceso de ramificación para cuatro elementos del sistema. Una vez realizada la ramificación del nodo original en sus cuatro conjuntos sucesores se verifica que el nodo E_3 debe ser ramificado por ser mínimo el valor de su cota con respecto a las de los restantes nodos recién ramificados. Como resultado de la evaluación de la solución representante del nodo E_3 se eliminan los nodos E_2 y E_9 por superar las sumas de las respectivas pérdidas locales el valor de las pérdidas totales del elemento representante de E_3 .

A continuación debe continuar el proceso de ramificación y eliminación de nodos mientras queden nodos en espera. Dado el carácter interceptado de los conjuntos resultantes de la descomposición, al generarse cada nodo se requiere verificar que él no ha sido previamente generado, es decir, no se encuentra en el conjunto de nodos en espera, pues en caso contrario este conjunto crecería exponencialmente a costa de nodos repetidos. Así, si en la ramificación ilustrada en la figura 3.6 se requiriera ramificar el nodo E_4 , se obtendrían los nodos representados por los elementos $(2, 1, 2, 1)$; $(1, 2, 2, 1)$; $(1, 1, 3, 1)$; $(1, 1, 2, 2)$. Al verificar la existencia o no de nodos en espera con elementos representantes coincidentes, se debe obviar la generación del nodo representado por $(1, 2, 2, 1)$, pues este coincidiría con E_8 .

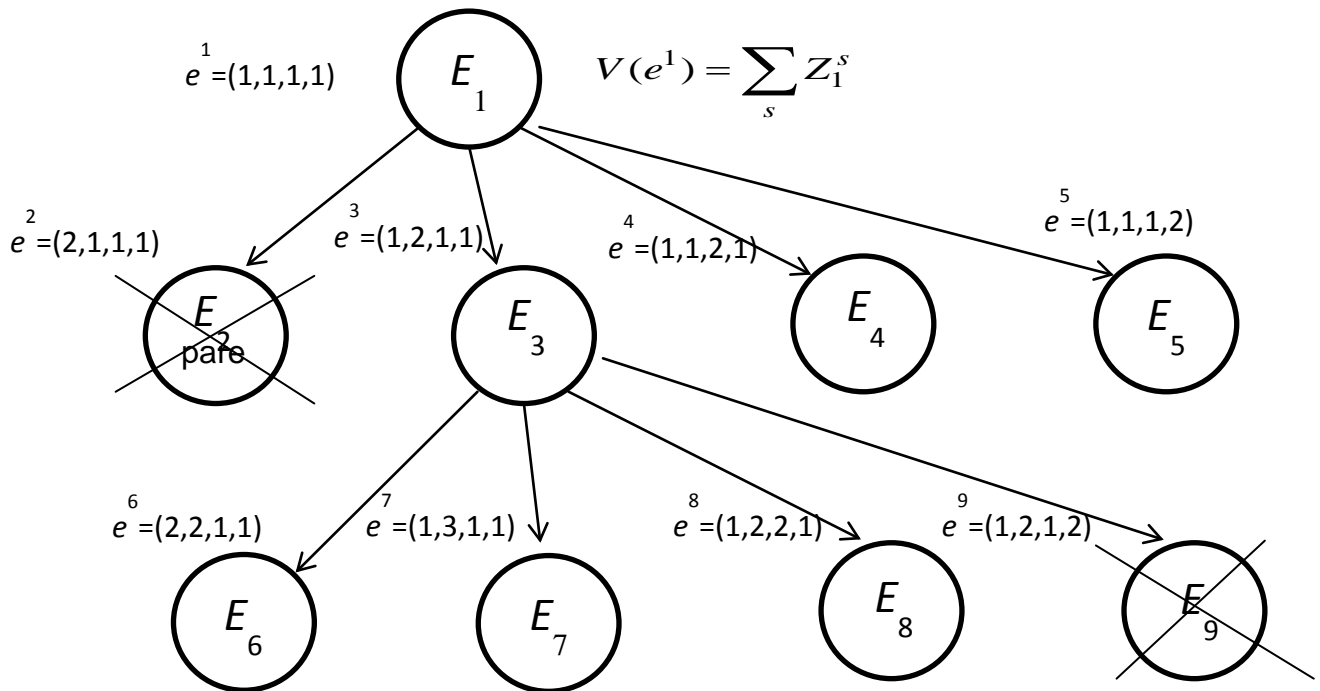


Fig 3.6 Ilustración del proceso de ramificación de conjuntos de soluciones por el algoritmo de selección óptima

Como diferencia esencial de este método, en correspondencia con el cual la partición del conjunto original de variantes se realiza en subconjuntos interceptados, con respecto al método de ramificaciones y acotaciones, en el que la partición del conjunto original de variantes se realiza en subconjuntos no interceptados, se destaca que la cantidad de nodos en los niveles sucesivos de la ramificación crece más lentamente que el exponente de m ,

siendom el consecutivo del nivel de ramificación, lo que condiciona una mayor velocidad de convergencia del método de Selección de Propuestas[17].

Aplicación 13: Diseño óptimo multiobjetivo de redes de conductos de climatización.

Sistema de mayor envergadura

Un sistema CAD para el diseño de redes de conductos de climatización se subordina a un sistema mayor, destinado al diseño de edificaciones civiles con todos sus elementos componentes, al que deberán prestar servicio las redes de climatización diseñadas (figura21). De tal forma, el CAD objeto de estudio recibe, en calidad de información directiva, los planos de la edificación, en los que se especifican todos los detalles constructivos de los locales que se pretenden climatizar [58, 59].

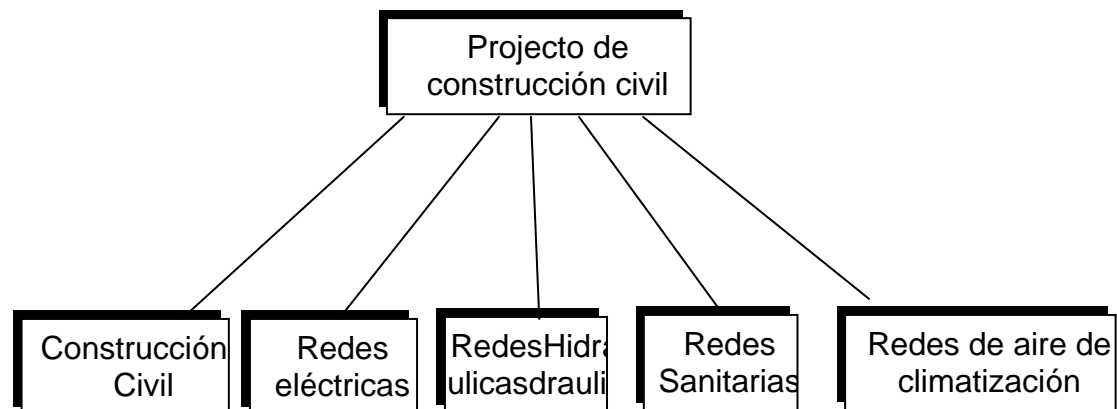


Fig. 3.7 Sistema de mayor envergadura.

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

La tarea de diseño de la red de conductos consiste en la construcción de la red de distribución de aire de los ramales que facilitan el fluido a los locales, con todos sus elementos constructivos, accesorios y salidas de aire, asegurando un criterio general de eficiencia. Surge una estructura jerárquica cuya tarea central consiste en el diseño de toda la red. Para cada ramal se requiere solucionar tareas de diseño hasta los locales asignados. En la figura 22 se ilustra la estructura de la red de conductos.

Análisis externo del sistema

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

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

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

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

Del estudio de la tarea de diseño de redes de climatización se definen, en calidad de *variables*

de decisión, las siguientes:

- Cantidad de ramales en la red: jt .
- Cantidad de locales en el ramal j : i_j .
- Número del ramal al que pertenece el local i : φ_i .
- Trayectoria que seguirá la red dentro del local i en el ramal j : $Tray_{ij}(CantSal_{i,j}); i \in I_j = \{i / j = \varphi_i\}; j = 1, \dots, jt$.
- Perfil en el tramo h del local i en el ramal j de la red: $Perf_{h,i,j}; \forall h = 1, \dots, ht(Tray_{i,j}); i \in I_j; j = 1, \dots, jt$.
- Material del conducto en el tramo h en el local i en el ramal j de la red: $Mat_{h,i,j}; \forall h = 1, \dots, ht(Tray_{i,j}); i \in I_j; j = 1, \dots, jt$.
- Tipo de dispositivos de salida de aire (difusores) para ser utilizados en el local i del ramal j de la red: $SalLoc_{i,j}; \forall i \in I_j; j = 1, \dots, jt$.
- Cambio ascendente de dirección de la trayectoria en el tramo h en el local i en el ramal j de la red: $DesSup_{h,i,j}; \forall h = 1, \dots, ht(Tray_{i,j}); i \in I_j; j = 1, \dots, jt$ (variable booleana que adopta valor 0 en ausencia de cambio ascendente y 1 en presencia de este cambio).
- Cambio descendente de dirección de la trayectoria en el tramo h en el local i en el ramal j de la red: $DesInf_{h,i,j}; \forall h = 1, \dots, ht(Tray_{i,j}); i \in I_j; j = 1, \dots, jt$ (variable booleana que adopta valor 0 en ausencia de cambio descendente y 1 en presencia de este cambio).
- Tipos de accesorios en el tramo h en el local i en el ramal j de la red: $Acc_{m,h,i,j}; \forall m = 1, 2; h = 1, \dots, ht(Tray_{i,j}); i \in I_j; j = 1, \dots, jt$.
- Derivaciones y transformaciones de la trayectoria en el tramo h en el local i en el ramal j de la red: $DerTra_{h,i,j}; \forall h = 1, \dots, ht(Tray_{i,j}); i \in I_j; j = 1, \dots, jt$.
- Tipo de codo para el codo k previsto en el tramo h , del local i en el ramal j de la red: $TipoCodo_{k,h,i,j}; \forall k = 1, \dots, CantCod_h(Tray_{i,j}); h = 1, \dots, ht(Tray_{i,j}); i \in I_j; j = 1, \dots, jt$.

Entre los datos de entrada más importantes se destacan:

- Disponibilidad de dispositivos de salida y entrada de aire y sus costos.
- Disponibilidad de accesorios y sus costos.
- Disponibilidad de derivaciones y transformaciones, así como sus costos.

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

Análisis interno

Se desglosa en las siguientes cinco etapas:

- Cálculo de las variables intermedias
- Cálculo del costo del proyecto
- Cálculo de las pérdidas de carga
- Cálculo del nivel sonoro
- Evaluación de restricciones

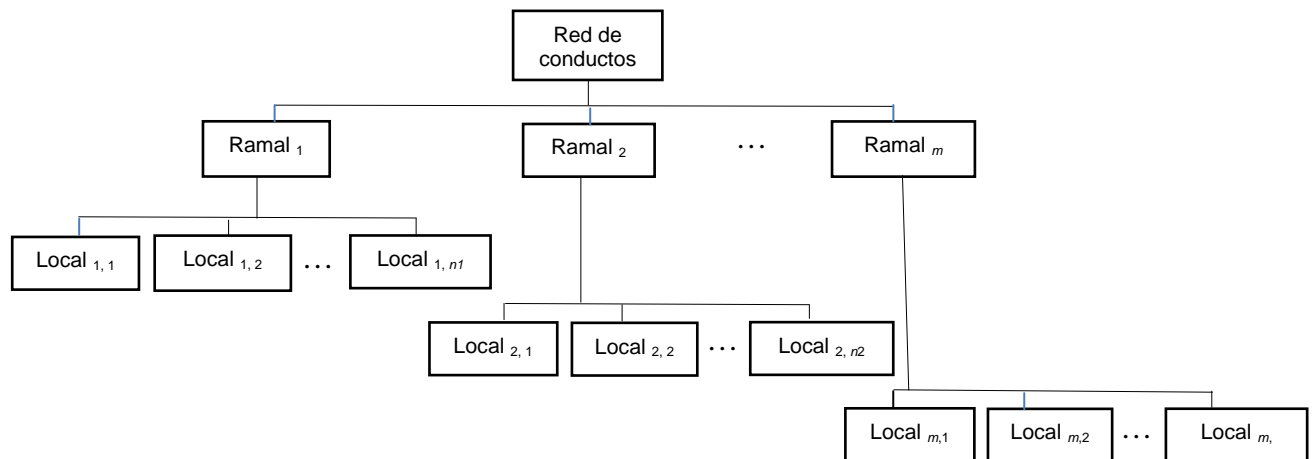


Fig. 3.8 Estructura General de la tarea de diseño de redes de conductos de climatización

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

Formulación matemática general de los procesos asociados

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

La preparación de decisiones requiere, ante todo, la definición del modelo matemático general de la tarea de diseño de la red de conductos de climatización. A partir del análisis interno [53] se puede deducir, para el conjunto de ramales que forman parte de la red que se va a optimizar, la siguiente estructura de modelo matemático general en correspondencia con el programa de Tchebycheff:

$$\text{Minimizar} \quad \beta(x) = \max_r \left\{ w_r \left[\sum_j z_{r,j}(x_j) + \varepsilon_{0,r}(x) \right] / x \in D \right\} \quad (3.22)$$

Donde:

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

Los valores z_r^d son todos constantes e iguales a 1, por lo que no aparecen en (87).

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

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

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

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

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

$(\varepsilon_{0,1} = \frac{\Delta C(x)}{C^d}, \varepsilon_{0,2} = \frac{\Delta P(x)}{P^d}, \varepsilon_{0,3} = \frac{\Delta R(x)}{R^d}) \in \mathcal{H}^3$: Vector del incremento de valores de los indicadores de eficiencia de la red provocado por las intersecciones de entrada a los ramales, la necesidad de introducción de elementos amortiguadores de ruido, etc., requeridos para hacer compatibles entre sí los diferentes ramales de la red.

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

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

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

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

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

$$\text{Minimizar: } \beta_j(x) = \max_r \left\{ w_{r,j} \left[\sum_i z_{r,j,i}(x_{j,i}) + \varepsilon_{r,j}(x_j) \right] / x_j \in D_j \right\} \quad (3.23)$$

Donde:

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

cuantificables de eficiencia del diseño del local i del ramal j de la red. Los valores $z_{r,j}^d$ son todos constantes e iguales a 1, por lo que no aparecen en (3.23).

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

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

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

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

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

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

Las variables $x_{l,j}$ se corresponden, respectivamente con $Tray_{i,j}$, $Perf_{h,i,j}$, $Mat_{h,i,j}$, $SalLoc_{h,i,j}$, $Acc_{m,h,i,j}$, $DerTra_{h,i,j}$, $TipoCodo_{h,i,j}(Tray_{i,j})$ adoptan valores enteros asociados a diferentes soluciones de trayectorias generadas mediante un algoritmo empírico, basado en normas de diseño y la experiencia. Para cada valor de $Tray_{i,j}$ en dependencia de las dimensiones del local $DisXLoc_{i,j}$, $DisYLoc_{i,j}$ y $DisZLoc_{i,j}$, se determinan, algorítmicamente, las cantidades de tramos $h, \forall h = 1, \dots, ht(Tray_{i,j})$, sus longitudes $LongTra_h(Tray_{i,j})$, la

cantidad de codos $CantCod_h(Tray_{i,j})$, cantidad de salidas de aire en el tramo $CantSal_h(Tray_{i,j})$ y la longitud de cada sección de tramo del conducto $Long_{k,h}(Tray_{i,j})$.

En el análisis interno [58] se exponen los métodos de cálculo de C , P , y R . Por los procedimientos de cálculo de estos indicadores de eficiencia se puede afirmar que la función objetivo y las restricciones de la tarea formulada se determinan mediante procedimientos de cálculo de gran complejidad, por lo que tienen carácter no lineal. Del análisis externo se deduce que para un ramal que contenga 10 locales, incluido el pasillo, un promedio de 10 tramos por local, se tiene un total de alrededor de 650 variables discretas. Para una red que posea 10 ramales el número de variables alcanza unas 6500 variables. La solución directa de la tarea formulada resulta en extremo compleja, por lo que se requiere de su descomposición en una serie de subtareas.

La estructura de los modelos (3.23) y (3.22) se corresponde totalmente con la tarea de selección de propuestas bajo criterios múltiples expuesta anteriormente, por lo que en su solución se puede aplicar el algoritmo clásico del método de Selección de Propuestas con las adecuaciones estudiadas. La estructura señalada permite la búsqueda de solución a cada una de estas tareas entre las soluciones α -óptimas.

En calidad de subtareas de la tarea (3.22) se entienden las jt subtareas de optimización (3.23) correspondientes a cada ramal de la red. Como subtareas de la tarea (3.23) se entienden las lj tareas de optimización del diseño de cada una de las redes de los locales pertenecientes al correspondiente ramal, expresadas como la minimización de las distancias de Tchebycheff:

$$\beta_{i,j} = \max_r \{ w_{r,i,j} z_{r,i,j} \} \quad (3.24)$$

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

Por ello en la solución de la tarea de optimización (3.23) es necesario utilizar un procedimiento de doble descomposición, de la red en ramales y del ramal en locales.

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

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

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

De forma análoga se codifican los posibles valores de las restantes variables de decisión, $SalLoc_{h,i,j}$, $Acc_{m,h,i,j}$, $DerTra_{h,i,j}$, $TipoCodo_{h,i,j}$. Así, se crea el código general para las soluciones de diseño, con una extensión de 34 bits, el que contiene la información sobre el valor concreto que adopta cada variable de decisión en la solución en estudio. Como se observa en el ejemplo mostrado más abajo, en un mismo tramo de conducto pueden coexistir hasta tres tipos de salidas de aire ($SalLoc1$, $SalLoc2$, $SalLoc3$) y hasta dos accesorios ($Acc1$, $Acc2$).

[*Perfil*] [*Material*] [*SalLoc1*] [*SalLoc2*] [*SalLoc3*] [*Acc1*] [*Acc2*] [*DerTra*] [*Codos*]
 [1] [3] [5] [5] [5] [4] [4] [4] [3] = 58

Por ejemplo:

1 010 00010 10010 XXXXX 0100 1100 00100 000

Perfil (Perf): Prismático.

Material (Mat): Zn galvanizado.

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

Salida prismática hacia arriba.

No tiene tercera salida.

Accesorios (Acc): Corta fuego.

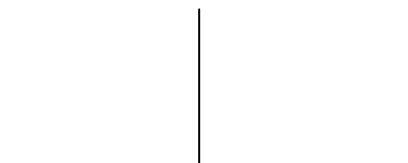
Silenciador.

Derivaciones y Transformaciones del perfil (DerTra): Transformación centrada.

Codos (TipoCodo): Sin especificación.

- *Construcción del conjunto general de soluciones.*

3



12

Fig. 3.9 Esquema de la construcción de una derivación a 90° en un conducto.

Para cada intersección de tramos del conducto se crea un conjunto general de soluciones candidatas a α -óptimas. Por ejemplo, en el esquema de la derivación que se muestra en la figura 24, donde concurren los tramos: 1 (tramo que llega a la intersección), 2 (tramo que sale de la intersección dispuesto colinealmente al primero), 3 (tramo que sale de la intersección dispuesto perpendicularmente al primero), se forma inicialmente un conjunto con las cuatro combinaciones posibles de los perfiles de los tramos 1, 2 y 3 $\{(1\ 1\ 1), (0\ 0\ 0), (1\ 0\ 1), (0\ 1\ 0)\}$ (Fig. 3.10), cada combinación de perfiles se vincula con los diferentes valores de materiales para dar lugar a un nuevo conjunto de combinaciones, y así sucesivamente se van vinculando, por su orden, todos los valores posibles de las restantes variables de decisión hasta completar el formato del código de cada solución.

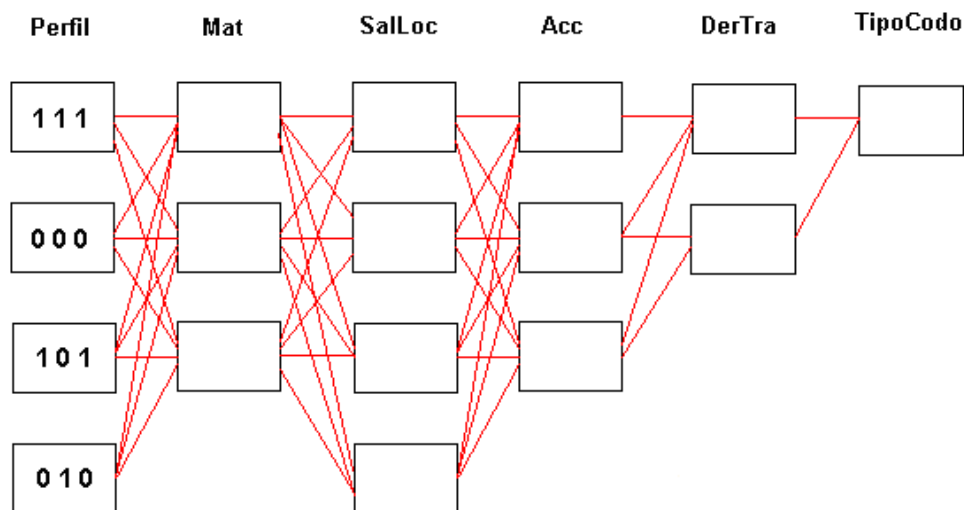


Fig. 3.10 Esquema de formación del conjunto de soluciones α -óptimas por búsqueda exhaustiva.

Metodología para el diseño óptimo multiobjetivo

En correspondencia con el algoritmo del método de Selección de Propuestas, adecuado a las particularidades de la tarea estudiada, y definido el valor $Tray_j$ para el conjunto j tramales

hasta la entrada a los locales i pertenecientes al ramal $j = \varphi_i$, el esquema de preparación de decisiones adoptado se cumple en los pasos siguientes:

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

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

Paso 3. Para el local pasillo, y la trayectoria $Tray_{i,j}$ construida previamente con el uso de las herramientas de edición gráfica del sistema [52], se determinan todas las combinaciones posibles de valores de las variables $Perf_{h,i,j}$, $Mat_{h,i,j}$, $SalLoc_{h,i,j}$, $Acc_{m,h,i,j}$, $DerTra_{h,i,j}$, $TipoCodo_{h,i,j} \forall m = 1, 2, h = 1, \dots, ht(Tray_{i,j})$ halladas por búsqueda exhaustiva. Se calculan los indicadores de eficiencia y la función de valor multiobjetivo β_j para cada combinación de valores y se seleccionan las soluciones α -óptimas del local pasillo. Con la particularidad de que el recorrido por la trayectoria $Tray_{0,j}$, durante la búsqueda exhaustiva se efectúa en sentido contrario al flujo de aire, a diferencia de como transcurre en el paso 1 de esta metodología.

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

Paso 5. Para las mejores soluciones escogidas por el usuario en cada local incluyendo el pasillo, se efectúa el cálculo de la función de valor multiobjetivo (3.22) para evaluar las diferentes combinaciones de uniones entre el local pasillo y el resto de los locales y se obtienen, aplicando el método de Selección de Propuestas, las soluciones α -óptimas para el ramal, en correspondencia con la metodología de preparación de decisiones descrita anteriormente.

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

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

Paso 8. Una vez seleccionadas las soluciones α -óptimas por cada ramal perteneciente a la red, se efectúa el cálculo de los indicadores de eficiencia según la función (3.22) para evaluar las diferentes combinaciones de uniones entre los ramales y se obtienen, aplicando el método de Selección de Propuestas, las soluciones α -óptimas de la red en correspondencia con la metodología de toma de decisiones descrita anteriormente.

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

Aplicación 14: Generación de tecnologías óptimas bajo criterios múltiples de maquinado en tornos con control numérico computarizado (CNC)

Sistema de mayor envergadura

La generación de tecnologías concretas de fabricación de piezas, en particular la de maquinado en tornos, se subordina a la tarea general de fabricación de piezas, la que incluye la determinación de las secuencias óptimas de fabricación y 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 opciones de tecnologías, en una segunda etapa, 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 (figura 3.11).

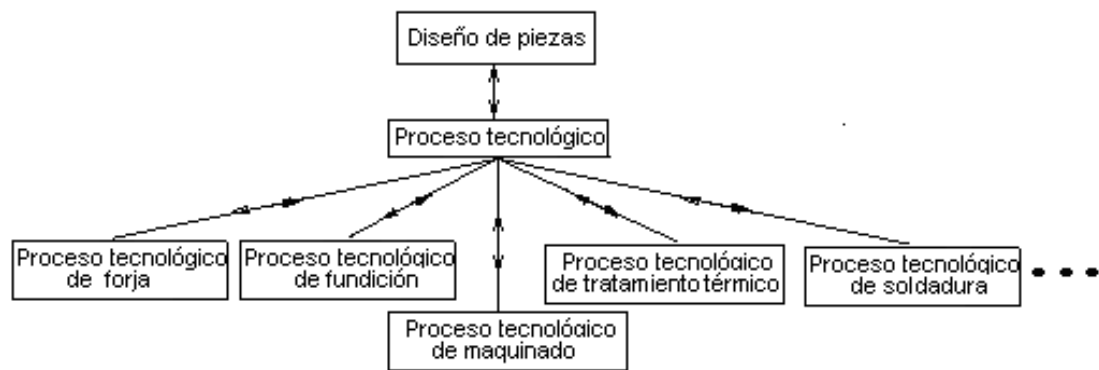


Fig. 3.11 Jerarquía de los procesos tecnológicos.

Como resultado, las tareas de generación de tecnologías concretas reciben del nivel superior los planos de la pieza terminada y del semiproducto inicial, así como las especificaciones técnicas de ambos, por lo que las variables de coordinación de las tareas de generación de tecnologías están constituidas por esta información [11, 30, 39].

Descomposición de la tarea de maquinado en tornos por elementos componentes

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

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

diferentes indicadores de eficiencia que resultan de interés al especialista. Es decir, se requiere determinar el *conjunto de pasadas* y el *régimen de maquinado* más adecuados para cada pasada, considerando un criterio de eficiencia para la fabricación de toda la pieza.

Análisis externo de la tarea de maquinado de piezas

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

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

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

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

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

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

- Máquina herramienta a utilizar γ .
- Colocación de la pieza ν .
- Tipo de plaquita a utilizar, entre las disponibles, en cada elemento de forma e : π^e . Cada tipo de plaquita se caracteriza por los parámetros siguientes:

Material λ , geometría χ , forma η , sujeción ζ , dimensión δ , espesor ε , anchura del chaflán α , ángulo del chaflán β .

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

- Tipo de mango a utilizar, entre los disponibles en cada elemento de forma e : m^e . Cada tipo de mango se caracteriza por el parámetro φ , que determina el ángulo de posición de la herramienta de corte.
- Cantidad de pasadas l_f^e del elemento de forma e ; $\forall e = 1, \dots, ef$.
- Régimen de corte por cada pasada l del elemento de forma e :
 - Velocidad de corte $V_c^{e,l}$ por cada pasada l del elemento de forma e .
 - Avance $S^{e,l}$ por cada pasada l del elemento de forma e .
 - Profundidad de corte $t^{e,l}$ por cada pasada l del elemento de forma e .

Los datos de entrada están constituidos por:

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

En calidad de variables intermedias de interés se destacan:

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

maquinado de un elemento de forma se determinan durante la creación del modelo único de la pieza.

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

A partir de metodologías de cálculo existente en la bibliografía especializada [39,170, 246, 250] se calcula:

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

Donde:

T_m : Tiempo de manipulación de material.

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

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

T_p : Tiempo principal de corte de la pieza.

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

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

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

Donde:

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

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

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

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

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

T : Tiempo de vida útil de la plaquita.

La expresión anterior es equivalente a:

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

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

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

Donde:

$Q_0^{e,l}$: Volumen de material a remover en la pasada l del elemento de forma e .

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

$V_c^{e,l}$: Velocidad de corte.

$S^{e,l}$: Avance.

Para maquinar un elemento de forma se requiere del tiempo:

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

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

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

Energía necesaria para maquinar una pieza

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

$$Pot^{e,l} = (t^{e,l} V_c^{e,l} S^{e,l} K_{c0.04}^{e,l} / 60 \cdot 10^3) (0.4 / S^{e,l} \sin \varphi^{e,l})^{0.29}$$

Donde:

$Pot^{e,l}$: Potencia requerida por la operación

$c_{0.4}^{e,l}$: Fuerza específica para un espesor de viruta 0,4 mm.

La energía total en maquinar una pieza es:

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

Donde:

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

Costo para maquinar una pieza

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

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

Donde:

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

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

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

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

$$\text{Minimizar: } \beta = \max_r \left\{ w_r \left[\sum_{e=1}^{ef} z_{e,r}(x_e) + \varepsilon_r(x) / x \in D \right] \right\} \quad (3.25)$$

Donde:

$(Z_1(x) = \frac{C(x)}{C^d}, Z_2(x) = \frac{E(x)}{E^d}, Z_3(x_e) = \frac{T(x)}{T^d}) \in \mathcal{H}^3$: Vector de indicadores de eficiencia del régimen de maquinado.

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

$(Z_{e,1}(x_e) = \frac{C_e(x_e)}{C_e^d}, Z_{e,2}(x_e) = \frac{E_e(x_e)}{E_e^d}, Z_{e,3}(x_e) = \frac{T_e(x_e)}{T_e^d}) \in \mathcal{H}^3$: Vector de indicadores de eficiencia de maquinado del elemento de forma e de la pieza.

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

$Z_{e,i,1}(x_{e,i}) = \frac{C_{e,i}(x_{e,i})}{C_{e,i}^d}$, $Z_{e,i,2}(x_e) = \frac{E_{e,i}(x_{e,i})}{E_{e,i}^d}$, $Z_{e,i,3}(x_e) = \frac{T_{e,i}(x_{e,i})}{T_{e,i}^d} \in \mathcal{H}^3$: Vector de indicadores de eficiencia del régimen de maquinado en la pasada l del elemento de forma e .

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

$x = (\gamma, v, x_1, \dots, x_e, \dots, x_{ef})$: Vector de variables de decisión correspondiente a la tecnología de maquinado de la pieza.

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

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

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

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

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

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

El esquema de solución desarrollado se expone a continuación:

Paso 1. Del conjunto de plaquitas disponibles se discriminan aquellas que no pueden ser utilizadas por sus propiedades mecánicas (parámetro λ) o por su forma (parámetro η) para maquinar el elemento de forma e , $\forall e = 1, \dots, ef$.

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

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

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

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

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

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

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

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

Minimizar:

$$\beta^e = \max_r \left\{ w_r \left[\sum_{l=1}^{lef} z_{e,l,r}(x_{e,l}) + \varepsilon_r(x_e) \right] \right\} \quad (3.26)$$

Asegurando el cumplimiento de las restricciones:

$$t_{min}^{e,l} \leq t^{e,l} \leq t_{max}^{e,l} ; \quad \forall l \in (1, lf_e) \quad (3.27)$$

$$s_{min}^{e,l} \leq s^{e,l} \leq s_{max}^{e,l} ; \quad \forall l \in (1, lf_e-1) \quad (3.28)$$

$$v_{min}^{e,l} \leq v^{e,l} \leq v_{max}^{e,l} ; \quad \forall l \in (1, lf_e) \quad (3.29)$$

$$n_{min}^{e,l} \leq n^{e,l} \leq n_{max}^{e,l} ; \forall l \in (1, lf_e) \quad (3.30)$$

$$0 \leq Pot^{e,l} \leq Pot_{max}^{e,l} ; \forall l \in (1, lf_e) \quad (3.31)$$

$$0 \leq s^{e,lf_e} \leq \sqrt{8\rho Ra} 10^{-3} \quad (3.32)$$

$$(D_1 - D_2) / 2 = \sum_{e=1}^{lf_e} t^e \quad (3.33)$$

La restricción (3.33) asegura la dimensión del elemento de forma de diseño procesado, teniendo en cuenta la sobremedida especificada.

Para $lf_e = 1$ el modelo (3.26)–(3.33), describe el caso del *modelo de una sola pasada*. Se puede apreciar que el *modelo de múltiples pasadas* se construye con las mismas expresiones funcionales que el de una sola pasada, solo que con mayor número de variables.

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

$$v_{c}^{e,l} = v_{c0}$$

$$t_{c}^{e,l} = t_0$$

$$s_{c}^{e,l} = s_0$$

Por cada pasada l , en cada elemento de forma e , $v_{c}^{e,l}$, $t_{c}^{e,l}$, $s_{c}^{e,l}$ son los valores inicialmente recomendados.

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

Paso 10. Se soluciona el programa de Tchebycheff (3.25) mediante el algoritmo de selección de propuestas. En cualquier caso se presupone la optimización de los regímenes de corte para todos los elementos de forma de maquinado por cada código de herramienta con su ángulo determinado por el algoritmo mencionado.

3.5.2 Caso de objetivos no separables

Tiene lugar cuando al menos uno de los objetivos no puede ser expresado como una función separable por subsistemas más una componente sistémica, o bien cuando por razones de convergencia (comparativamente altos valores de $\varepsilon(x)$) no resulta conveniente tal expresión. En este caso la formulación del problema de toma de decisiones se reduce a la siguiente.

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

$$I_s = (1, 2, \dots, i, \dots), \quad \forall s \in S \quad (3.34)$$

La serie (3.34) representa diferentes opciones de solución a las subtareas $s \in S$.

Las combinaciones posibles de elementos de los conjuntos (3.34) se determinan por los elementos $e^k = (k_1, k_2, \dots, k_s, \dots, k_n)$ del producto de conjuntos $E = I_1 \times I_2 \times \dots \times I_n$

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

$$\text{Min} \{ \beta \} \quad (3.35)$$

Donde:

$$\beta = \max_{j \in J} \left\{ w_j \left| z_j(e^k) - z_j^{id} \right| \right\} \quad (3.36)$$

Asegurando el cumplimiento de un conjunto de restricciones:

$$g_j(e^k) \geq b_j; \quad \forall j=1, \dots, m \quad (3.37)$$

Esta tarea recibe el nombre de *Tarea generalizada de selección de propuestas* y para su solución fue desarrollado por el autor de este trabajo el método de *Integración de Variables*, el que presupone la evolución de poblaciones de códigos de solución mediante diferentes operadores, en el marco del cual se han desarrollado varios algoritmos.

3.6 Método de Integración de Variables

El método de Integración de Variables se vincula a la evolución de la cantidad requerida de códigos con ayuda de cualquier conjunto de operadores para actualizar los miembros de una población [12, 18]. Los rasgos generales del este método son los siguiente (figura 3.10).

- Las posibles variantes de solución son codificadas en uno o más códigos variables.
- Se genera, según un procedimiento característico para cada realización particular del método, un juego de n soluciones próximas al óptimo. En particular, en calidad de procedimientos pueden usarse diferentes métodos iterativos de la Programación Geométrica y Discreta aplicados a los códigos de solución, con entornos de búsqueda seleccionados al azar, determinísticamente o de forma combinada. Cada procedimiento particular de generación de poblaciones se corresponde con una variante concreta de aplicación del método. Un caso particular de procedimiento está constituido por una sucesión dada de operadores genéticos aplicada a una población inicial, lo que lleva a los Algoritmos Genéticos.
- Aunque la selección del criterio de parada obedece, en el caso general, a las particularidades de cada aplicación concreta, en la mayoría de los casos debe ser eficaz la condición de lograr una cantidad dada de iteraciones sin modificaciones de la población (o lo que es equivalente, sin variar el valor de la función de calidad del peor elemento de la población).

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

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

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

Es necesario aclarar que aunque el autor propuso por primera vez explícitamente el concepto del método de Integración de Variables y sus particularidades distintivas, este concepto ha sido aplicado de hecho en numerosos trabajos aparecidos recientemente en la literatura especializada. Así, en el artículo de Michalewicz [147] se explican algunos algoritmos evolutivos aplicados a los problemas de optimización no lineales con restricciones, los que aportan nuevos operadores al método de Integración de Variables. Particularmente, en este grupo pueden ser incluidos los métodos aparecidos en la Sección 3.1 de ese artículo. Por otro lado, los Algoritmos Genéticos (AG) estructurados y otros AG complejos constituyen casos particulares del uso de conjuntos de códigos para describir opciones de la solución [169]. El método de Selección de Propuestas, expuesto en 3.4.1 y en los trabajos [10, 17] constituye otro ejemplo del uso de códigos variables múltiples para describir las posibles soluciones $e^k = (k_1, k_2, \dots, k_n)$.

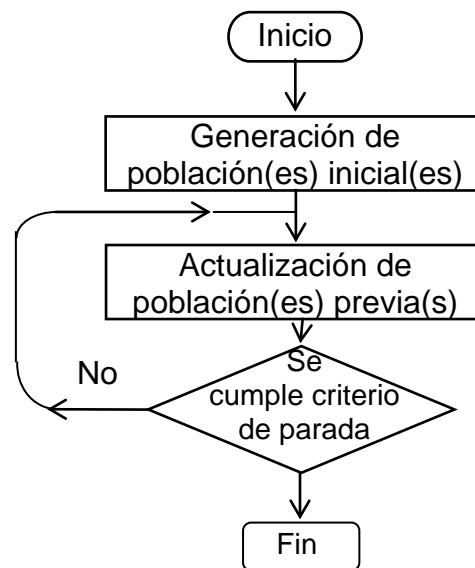


Fig. 3.12 Esquema general del método de Integración de Variables

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

- Dependiendo de la naturaleza de las funciones objetivos pueden ser generados cromosomas muy malos combinando bloques de códigos buenos, lo que hace fracasar la hipótesis de los *building block* [78, 152].
- No hay garantía de obtener la solución óptima global usando AG, aunque ellos tienen la tendencia a hacerlo. Esta tendencia se reduce cuando hay una pérdida de diversidad genética de la población, lo que puede conducir a poblaciones de baja calidad [18, 152, 235].
- Los Algoritmos Genéticos encuentran dificultades en la búsqueda de solución a problemas de la Programación Geométrica con restricciones [152].
- Una restricción importante para usar los AG consiste en la lentitud del proceso de búsqueda de este método comparado con otros [122, 152].

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

3.6.1 Búsqueda por localización aleatoria del extremo de una función de un código variable

En la figura 3.12 se ilustra la aplicación práctica del método de Integración de Variables al caso concreto de búsqueda de mínimos locales de una función de un código variable de posibles soluciones a la tarea dada de optimización discreta con variación aleatoria de los intervalos de la búsqueda, para la actualización de las sucesivas poblaciones de soluciones [18].

Como se puede observar en la figura 3.13, en cada iteración se realiza la búsqueda del mínimo de una función de códigos variables (los que constituyen los valores, en el sistema decimal de numeración, de la variable-código de la solución buscada). Los valores iniciales del código variable se generan aleatoriamente dentro del intervalo de posibles valores del código variable de solución. La búsqueda de soluciones se realiza por el método de localización de la programación no lineal. La función de calidad Z puede interpretarse de la misma forma que en los Algoritmos Genéticos, como *fitness*, y podría incluir el resultado

del cálculo de una función de penalidad por el incumplimiento de las restricciones. Como un caso particular de funciones de penalidad puede utilizarse el rechazo de soluciones no factibles. En cada paso de localización se incluye en la población la mejor solución encontrada, mientras el tamaño de la población sea menor que el establecido (CSol) o se actualiza la población en caso de que esta haya alcanzado el tamaño establecido. Como actualización se entiende la comparación del valor de la función objetivo de las dos soluciones generadas en el paso dado, con el de la peor solución de la población, y si este valor es inferior al de la peor solución de la población, entonces se sustituye esta última solución por la correspondiente al código recién generado. Una vez que es alcanzada la precisión δ prevista se reinicia el proceso de generación de valores aleatorios de x .

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

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

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

Donde:

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

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

En dependencia de las particularidades de la investigación de aplicación estudiada pueden ser utilizados diferentes esquemas de codificación. Así, en la aplicación 17, que se estudiará en adelante, se utiliza el número consecutivo de las piezas individuales o de los conglomerados de piezas a distribuir en una chapa.

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

For $i = 1$ to m

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

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

Next i

Donde:

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

$[a]$: Parte entera de a .

En la figura 3.14 se ilustra gráficamente el trabajo del algoritmo durante la ejecución de un paso de búsqueda

Aplicación 15: Diseño óptimo bajo criterios múltiples de redes hidráulicas cerradas

Las redes hidráulicas se encuentran muy difundidas en las ingenierías. Sus soluciones de diseño requieren ser realizadas sobre la base de la elevada integración de la información durante el proceso de análisis y estudio de la tarea, de la aplicación de los métodos modernos de preparación y toma decisiones, así como de la organización racional de los procedimientos de cálculo [111-115].

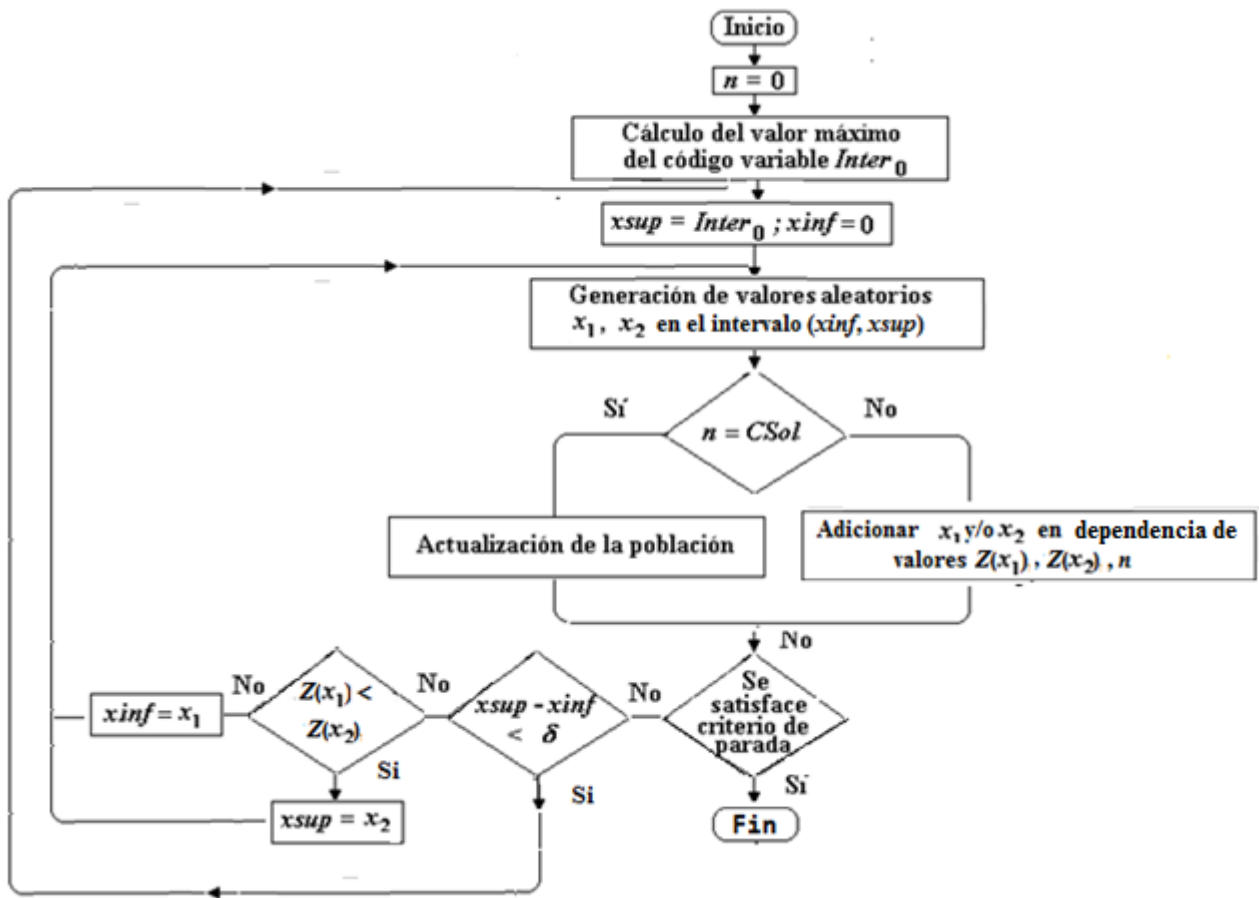


Fig. 3.13 Esquema general del algoritmo de localización aleatoria del extremo de una función de un código variable

Análisis externo de la tarea de diseño de redes hidráulicas

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

- Ubicación espacial de los nodos de la red.
- Tipo de nodo (suministro, consumo, mixto).
- Destino de servicio de la red (tipo de fluido: aceite, agua, petróleo, y otros).
- Tipo de red (industrial, urbana, etc.).
- Presión mínima adecuada en cada nodo.
- Demanda necesaria en cada nodo.
- Menor y mayor perímetro permisible en los circuitos de la red cerrada.
- Obtención uniforme de los circuitos de la red cerrada según perímetros.

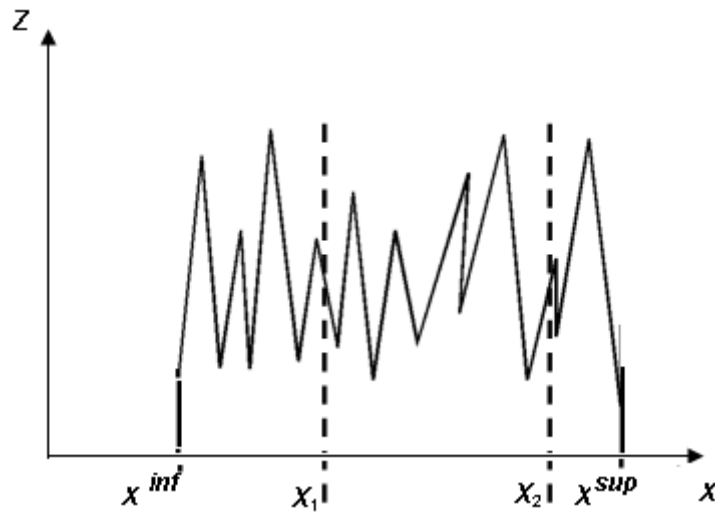


Fig. 3.14 Ilustración de la ejecución de un paso de localización.

Se establecen como indicadores de eficiencia:

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

Son variables de decisión del sistema las siguientes:

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

Resultan de interés para el decisor las variables intermedias siguientes:

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

Entre los datos de entrada se encuentran los siguientes:

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

- Valores mínimo y máximos de velocidad y presión (según destino de servicio de la red).

Análisis interno de la tarea de diseño de redes hidráulicas

Cálculo de la función de calidad del sistema

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

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

$$Z = \max \left\{ w \frac{E - E^{id}}{E^{id}}, (1 - w) \frac{C - C^{id}}{C^{id}} \right\} \quad (3.38)$$

Donde:

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

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

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

$$P_i^{inf} \leq P_i \leq P_i^{sup}, \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (3.39)$$

$$Vel_j^{inf} \leq Vel_j \leq Vel_j^{sup}, \quad \forall j = 1, \dots, n \quad (3.40)$$

Donde:

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

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

Las restricciones anteriores se toman en consideración mediante el cálculo del valor de una función de penalización Pen según el método de J. N. Kelley [11].

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

$$Pen = \sum_{i=1}^m 10^{25} \theta_i (P_i^{inf} - P_i) + \sum_{i=1}^m 10^{25} \mu_i (P_i - P_i^{sup}) + \sum_{j=1}^n 10^{25} \delta_j (Vel_j^{inf} - Vel_j) + \sum_{j=1}^n 10^{25} \varphi_j (Vel_j - Vel_j^{sup}) \quad (3.41)$$

Donde:

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

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

Indicador de eficiencia generalizado

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

$$Z' = Z + Pen \quad (3.42)$$

Donde:

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

Metodología para satisfacer el sistema de preferencias de un potencial decisor

1. Determinación del trazado de la red de mayor cantidad de circuitos.
2. Determinación de la red mínima priorizada.
3. Generación de opciones de trayectoria de redes cerradas al modificar la obtenida en el paso 1 y que contienen la obtenida en el paso 2.

4. Generación de soluciones de diseño hidráulico que resultan próximas al criterio de eficiencia del decisor.
5. Selección de aquella solución que satisface de la mejor manera el criterio completo de preferencias del decisor.
6. Elaboración de toda la información técnica requerida: planos, informes y tablas de datos técnicos.

El coeficiente 10^{25} en la expresión (3.41) se establece con el objetivo de obligar al cumplimiento estricto de las restricciones. Para restricciones seleccionadas este valor puede ser reducido a valores muy inferiores (1000 – 10000) en el caso que se pueda admitir ligeros incumplimientos de ellas. En la práctica este “suavizamiento” de restricciones equivale a tomar en consideración su carácter difuso. La selección de una u otra entre las opciones generadas se realiza, en estas condiciones, a partir de la conveniencia o no de aceptar ciertos incumplimientos, en adición a los restantes factores subjetivos a tomar en consideración.

Generación de variantes de trayectorias de redes

Durante el proceso de digitalización y confección del plano base se debe asegurar la correcta organización de la información que pueda ser de utilidad durante el proceso de diseño, la cual será ubicada en sus respectivas capas a fin de lograrla adecuada clasificación para su uso posterior [111].

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

La creación de la red hidráulica se realiza a partir de la incorporación sobre el plano digitalizado de los objetos que intervienen en el proceso de diseño. Estos elementos son entidades de dibujo creadas mediante opciones del sistema CAD que se relacionan entre sí a partir del diagrama entidad relación, el cual garantiza el intercambio y búsqueda de información durante la automatización de los procedimientos y métodos de cálculo en las etapas del proyecto.

La confección de la trayectoria de la red de mayor cantidad de aristas debe ser definida por el proyectista, teniendo en cuenta los factores subjetivos que permitan integrar la tarea de diseño al sistema de mayor envergadura. La definición de la red priorizada debe tener en

cuenta la conexión de todos los nodos de demanda y suministro, así como la conveniencia a los requerimientos del sistema de mayor envergadura. En la figura 3.15 se muestra la red priorizada propuesta por el sistema, la que puede ser modificada por el proyectista de acuerdo con criterios y análisis de carácter subjetivo [11, 112].

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

A partir de la red de mayor cantidad de aristas se analiza la posibilidad de eliminar aquellos tramos que no pertenezcan a la red priorizada, manteniendo la condición de red mallada, es decir, que la red resultante deberá continuar siendo cerrada (figura 3.16).

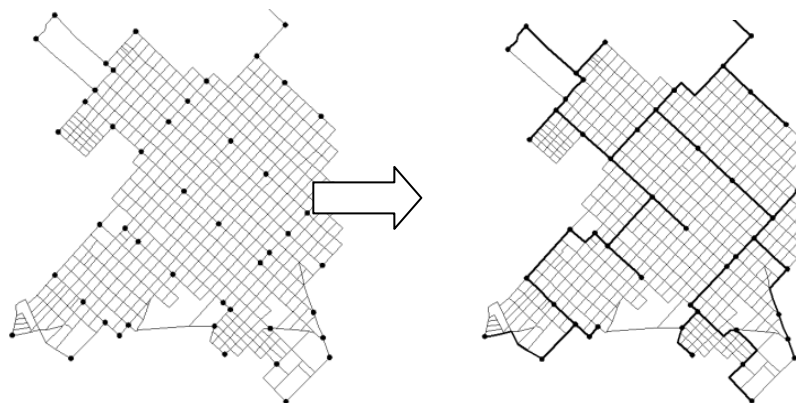


Fig. 3.15 Ejemplo de solución del árbol de extensión mínima.

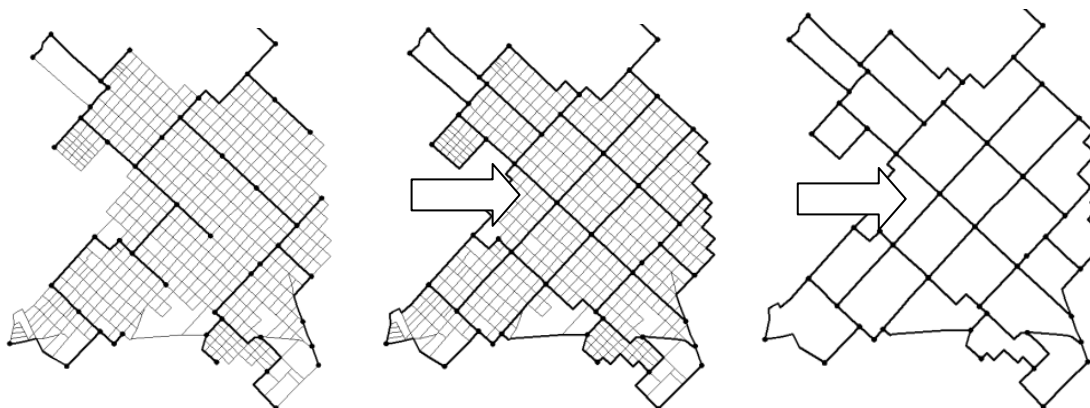


Fig. 3.16 Ejemplo de variante de trayectoria mallada.

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

Generación de población de soluciones de diseño hidráulico

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

Escogida la trayectoria a partir de múltiples criterios y definida la combinación de diámetros de cada tramo de la red se aplica el método de Integración de Variables con el algoritmo de búsqueda por localización aleatoria del extremo de una función de código variable. Se genera así una población de soluciones de diseño hidráulico a partir de criterios técnicos al minimizar las pérdidas energéticas obtenidas como resultado de solucionar el sistema de ecuaciones que establecen el equilibrio hidráulico de la red y criterios económicos al minimizar los costos asociados a materiales, operaciones, etc. La prioridad de los indicadores de eficiencia: pérdidas de energía y costo, es definida por el proyectista.

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

Además de mostrar la simulación hidráulica, se confeccionan ficheros de salida que podrán ser cargados en otros sistemas computacionales, mostrando gráficamente todo lo concebido

en AutoCAD, incluyendo los parámetros técnicos de cada objeto [98]. De esta forma se valida el cálculo hidráulico realizado en el sistema.

Aplicación 16: Comparación AG–Búsqueda por Localización Aleatoria del Extremo de una Función de un Código Variable en el ejemplo del diseño óptimo multiobjetivo de troqueles de corte y punzonado simples y progresivos

Del análisis presentado en la aplicación 11 del epígrafe 2.4 quedó esclarecida la composición de variables que intervienen en el diseño óptimo de troqueles de corte y punzonado simples y progresivos. En lo adelante se exponen elementos del trabajo realizado de síntesis del sistema utilizando AG y Búsqueda por Localización Aleatoria del Extremo de una Función de un Código Variable, así como la comparación de ambos algoritmos.

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

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

Donde:

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

ρ : Escalar pequeño.

Diseño óptimo multiobjetivo utilizando AG

En calidad de algoritmo de solución se emplea un algoritmo genético [11, 18, 216].

Para solucionar esta tarea se determinó:

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

- Procedimiento de cruzamiento y mutación de las poblaciones.
- Criterio (s) de parada.

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

En la solución de la tarea de diseño óptimo multiobjetivo de troqueles de corte y punzonado simples y progresivos se utilizó el algoritmo de búsqueda por localización aleatoria del extremo de una función de un código variable (BLAF).

Según la tarea formulada, para la producción de una pieza dada existe un total de 131 072 posibles diseños de troqueles, los que corresponden a los diferentes códigos de solución descritos en [12, 216]. Por esta razón, se emplea un código variable con valor máximo igual a 131 072.

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

Criterio de parada

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

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

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

Cada valor de x generado por el algoritmo de BLAF se convierte al código binario, y para este código se calculan todos los indicadores y_i , el valor de la función de utilidad multiobjetivo Z y el valor de $fitness1/Z$ y, si se requiere, se generan imágenes gráficas en 3 D y 2 D.

Experimentos numéricos

- Con el propósito de realizar los experimentos necesarios que permitieron comparar ambos métodos se desarrolló el sistema TROQUEL 2003, en el cual se aplican los

AG y el algoritmo propuesto en este epígrafe. En la figura 3.17 se muestra el esquema funcional obtenido como resultado de la síntesis del sistema, el que genera opciones de diseño de troqueles próximos al óptimo global de la función de la utilidad multiobjetivo por ambos métodos.

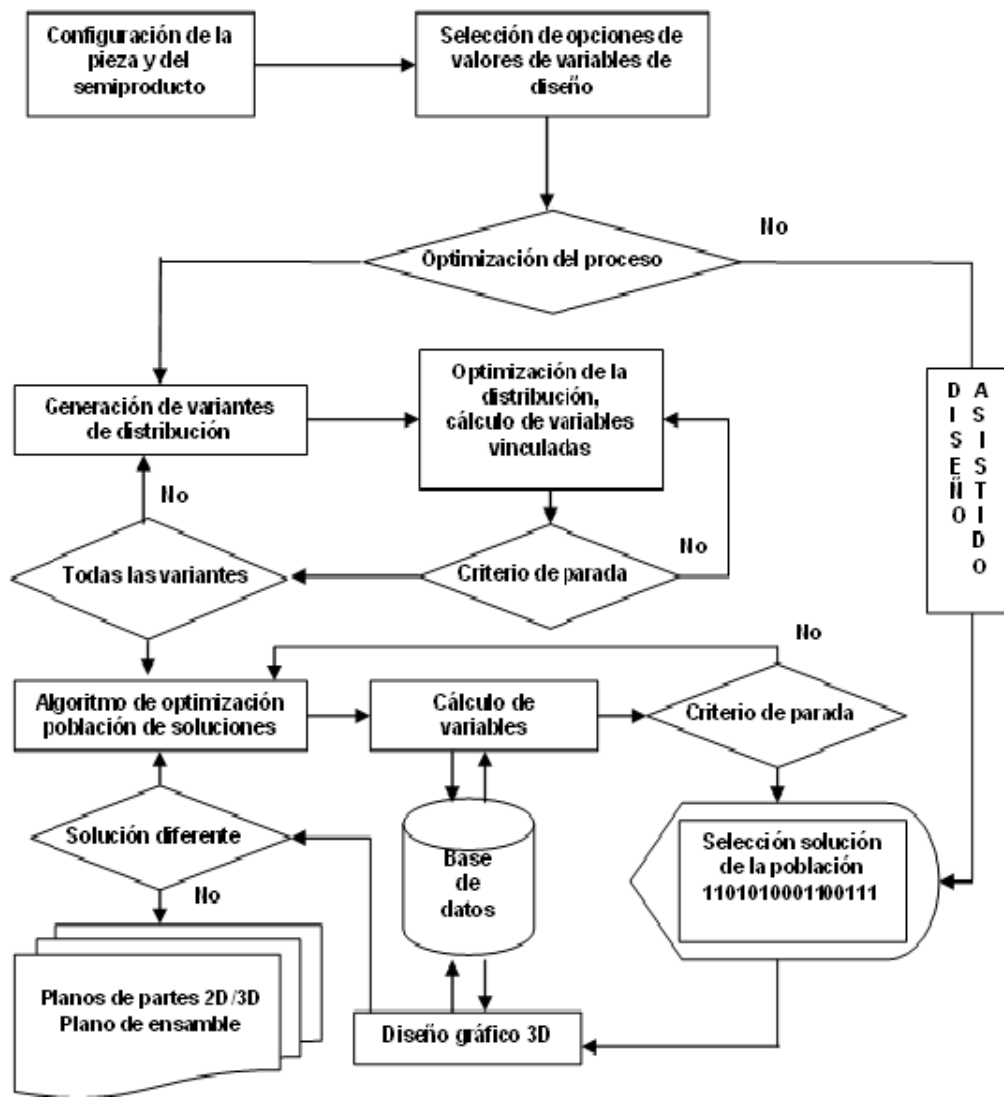


Fig. 3.17 Estructura funcional de sistema CAD de diseño de troqueles

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

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

valor medio, según la expresión:
$$DG = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - \bar{x}}{\bar{x}} \right|$$

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3.1 comparación del desempeño de los AG y el BLAF

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

Como se puede observar, el número cálculos de la función objetivo resultó ser del mismo orden que los AG, alcanzando similares valores promedio de la función objetivo, tanto para la mejor solución de las poblaciones como para sus valores medios, aunque la diversidad genética resultó ser mucho mejor (el triple) para el caso del BLAF, lo que en la práctica significa que el decisor puede elegir entre soluciones mas diferentes con similar nivel de eficiencia. Para un mismo número de cálculos de la función objetivo, la velocidad de convergencia por el métodoBLAF es realmente superior, pues la cantidad y complejidad

de las operaciones realizadas por cada cálculo de función objetivo por este método son inferiores a los de los AG.

3.6.2 Búsqueda por Exploración Aleatoria del Extremo de una Función de Códigos Variables

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

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

En la figura 3.18 se ilustra el procedimiento de generación de combinaciones de códigos para el caso particular de dos códigos variables. Para cada combinación generada y decodificada de soluciones se calcula la función objetivo, se determina la combinación de códigos generados al que se asocia el menor valor de esta función y se elimina el subintervalo de búsqueda de cada código variable que no contiene la componente de la solución con este menor valor.

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

Aplicación 17: Distribución y corte de piezas de configuración irregular en superficies planas.

La integración de los sistemas CAD/CAPP asociados a las tareas de distribución y corte de piezas en superficies planas obedece a los principios de descomposición de tareas de

dirección de objetos complejos que se presentan y se ejemplifican detalladamente para las tareas de producción de piezas en la aplicación 10 del capítulo 2 y se ilustra en la figura 2.14.

Análisis externo del sistema CAPP para la fabricación de piezas

Del estudio de la integración CAD/CAPP referido, se deduce que las variables de coordinación del CAPP provienen del CAP y del CAD. Están constituidas por los planos de las piezas y las chapas, así como por las restricciones constructivas, los requisitos relacionados con los volúmenes de producción y por disponibilidad de materia prima asociada al lote de producción.

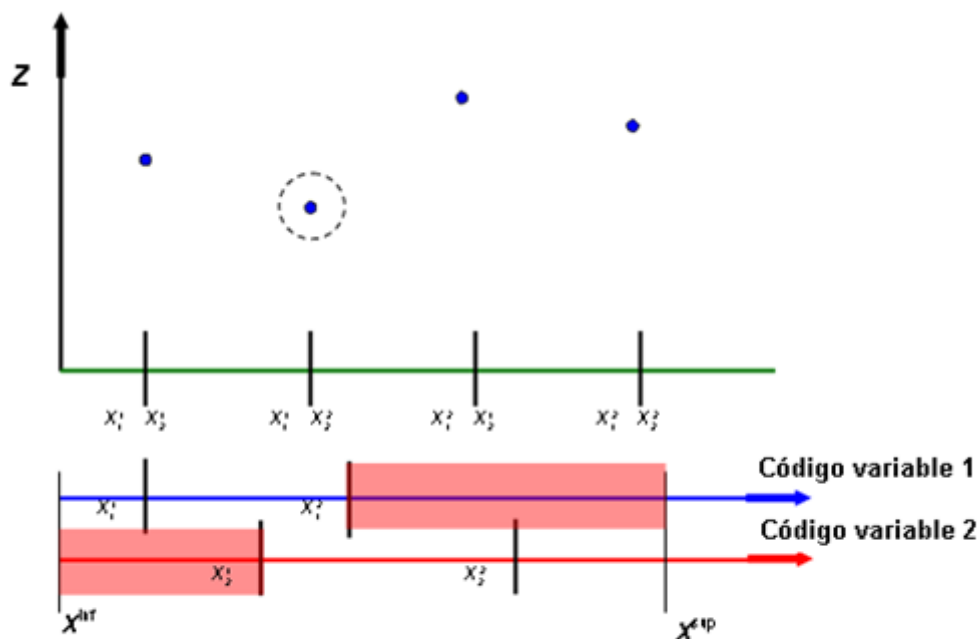


Fig. 3.18 Ilustración del proceso de búsqueda por el algoritmo de exploración.

Así, entre las variables de coordinación se encuentran:

- Configuración geométrica y especificaciones técnicas de las piezas que deben ser producidas en el período.
- Materia prima (chapas) a utilizar para garantizar los volúmenes de producción, incluyendo la recortería proveniente de procesos precedentes $DCCh_j$, $\forall j = 1, \dots, ju$.
- Lotes de piezas a producir en la unidad de tiempo Lp_n .

- Grado de prioridad de la pieza en el lote $Gp_{i,n}$.
- Tecnología de corte a emplear Tc .
- Disponibilidad de máquinas de corte de acuerdo a la tecnología $Dm_{t,m}$.

A partir de entrevistas efectuadas a numerosos especialistas vinculados a la producción y del estudio de la literatura especializada [4, 61-73, 97, 98, 120, 122, 243], en los procesos de distribución y corte de piezas en superficies, predominan, en calidad de indicadores de eficiencia para la generación de opciones de solución, los siguientes:

1. Máximo aprovechamiento del material utilizado en el proceso Ap .
2. Mínima trayectoria del útil de corte, determinada por el recorrido del para cada chapa, de cada lote en cada máquina del taller y para cada opción de distribución, asegurando el cumplimiento de las restricciones impuestas por la tecnología de corte empleada Dhc .
3. Máxima satisfacción del fabricante por la solución propuesta, incluyendo la introducción de posibles ajustes.
4. Máxima satisfacción de las restricciones impuestas por las variables de coordinación.

La máxima productividad del corte, el mínimo consumo de recursos (gases, energía eléctrica, entre otros) y el mínimo tiempo de fabricación, se corresponden con el mínimo desplazamiento del útil de corte para iguales valores de parámetros de corte, por lo que no se han de considerar explícitamente como indicadores de eficiencia en este trabajo.

Para cada distribución de piezas en la chapa existe un recorrido mínimo del útil, que además, satisface las restricciones tecnológicas del proceso. La generación de opciones de corte, próximas al máximo aprovechamiento de material y, relacionadas con la información relativa al recorrido óptimo del útil de corte, constituye una información que posibilita discriminar cuál entre las distribuciones satisface en mayor medida el compromiso entre los indicadores de eficiencia y a su vez, permite el análisis de la eventual conveniencia de la configuración geométrica del material resultante, para su empleo como materia prima en posteriores procesos.

Del estudio realizado al proceso de distribución de piezas en chapas y establecimiento de la trayectoria de corte, fue considerada como *variable de decisión*:

- La ubicación por coordenadas de cada punto que describe el contorno de la pieza con relación a otras piezas $DespX$, $DespY$.

Entre las variables intermedias de cálculo más importantes se destacan:

- Área efectiva de la chapa A_{ch} .
- Códigos de piezas ubicadas $Codi$.
- Aprovechamiento del material Ap .
- Tiempo de recorrido del útil en función de los parámetros tecnológicos utilizados Tr .
- Consumo de recurso tecnológico Cct .
- Configuración del recorte, después de la distribución Crd .
- Presencia de Bucle en las esquinas pronunciadas $Pbes$.
- Perímetro de trayectoria de corte del útil: Ptc .

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

- Dimensiones normalizadas de las chapas $DNch_j$.
- Precios unitarios de las chapas según sus dimensiones $Pcch_{m,j}$.
- Configuración geométrica de la recortería $CGch_w$.
- Parámetros de corte según la tecnología $Pc_{t,m}$.
- Materiales disponibles para el corte y sus propiedades $Mdisp$, $Pmat$.
- Conjunto de datos tecnológicos determinados por la tecnología empleada, entre los que se encuentra la distancia pieza-pieza $Dispp$.
- Ubicación de piezas en cavidades $UCav$.
- Posibilidad de reversibilidad del material Rev .
- Compensación del útil de corte $Cherr$.
- Sentido del corte $Scor$
- Tipo de entrada y salida del útil de corte $Tent$, $Tsal$.
- Uso de puentes para el corte de piezas contiguas $Ppza$.
- Tipo de trayectoria (Corte libre o barrido en un eje) $Ttray$.
- Importancia concedida a los indicadores de eficiencia w .

Descomposición de la tarea de fabricación de piezas planas en sub-tareas componentes

Tal como se ha descrito del análisis de la tarea de fabricación en estudio se destacan las subtareas distribución de piezas en la chapa y determinación de la trayectoria de corte para las distribuciones propuestas a fabricar. En la primera se calculan los diferentes valores de

aprovechamiento de material en la chapa, lo cual constituye el primer indicador de eficiencia; en la segunda se generan las trayectorias por donde debe pasar el útil de corte, siguiendo el perfil de las piezas, lo cual determina al desplazamiento del útil de corte como el segundo indicador de eficiencia.

Sobre los valores de ambos indicadores inciden las variables relacionadas al posicionamiento mutuo de las piezas sobre la chapa. La primera sub-tarea tiene que ver con la determinación del posicionamiento mutuo de las piezas entre sí, determinadas por los valores de las variables de decisión $DespX$, $DespY$, mientras que la segunda sub-tarea define el orden en que pasará el útil de corte por cada contorno de las piezas, a través de los nodos que definen los cambios de frontera de las piezas distribuidas.

De tal forma, los vectores variables $DespX$, $DespY$, que determinan las coordenadas de todos los puntos del contorno de las piezas, constituyen variables de coordinación a los efectos de la tarea común, consistente en buscar un compromiso cuantificable entre los indicadores de eficiencia seleccionados.

Así, el modelo matemático conceptual de la tarea se puede expresar como:

$$\text{Minimizar } \{ Z(Z_1(u), Z_2(u, x_n))/h(u) \geq 0; g_s(u, x_s) \geq 0; \forall s \in S \} \quad (3.43)$$

Donde:

$Z_1(u) = 1 - A_{\text{material no aprovechable de la chapa}}$

$u = (DespX, DespY)$

$Z_2(u, x_n) = Dh_c$

$h(u) \geq 0$ restricciones geométricas en la ubicación mutua de las piezas

x_n : Nodos que definen los cambios contorno – contorno de las piezas distribuidas

$g_s(u, x_s) \geq 0$ restricciones a las posibles trayectorias de corte.

Según se puede observar, el modelo (3.43) constituye un caso particular del modelo:

$$\text{Min}\{Z(Z_1(u, x_1), \dots, Z_n(u, x_n))/h(u) \geq 0; g_s(u, x_s) \geq 0; \forall s \in S\}, \quad (3.44)$$

cuya estructura matemática se corresponde con la estructura organizativa, y de composición de soluciones, disperso-conciliada. Según se expone en [12] el modelo (3.44) describe aquellos procesos en los que la eficiencia y las condiciones de funcionamiento de todo el sistema y de sus elementos dependen del valor de todas y cada una de las variables de coordinación, las que no son separables por los elementos del sistema.

Según se muestra en el trabajo mencionado la solución de (3.44) se reduce a la solución de

$$\text{Min} \{ Z(Q_1(u), \dots, Q_n(u)) / h(u) \geq 0 \} \quad (3.45)$$

Donde:

$$Q_s(u) = \text{Min} \{ Z_s(u, x_s) / g_s(u, x_s) \geq 0 \}; \quad \forall s \in S, u / h(u) \geq 0 \quad (3.46)$$

$$x_s = x_s(u^{opt})$$

Si la estructura de la tarea de dirección tiene la forma o resulta próxima a (3.44), entonces puede ser solucionada mediante:

- La búsqueda de solución a (3.46), para cada elemento s del sistema, para valores discretizados admisibles de las variables de coordinación u (o todos sus valores admisibles, en el caso de un número finito de valores de u discreta, como en la tarea que nos ocupa).
- La determinación de las funciones de aproximación $Q_s(u)$ y $x_s = x_s^{opt}(u)$.
- La solución del modelo aproximado (3.45) con el fin de hallar valores próximos al óptimo de $u = (u_1, u_2, \dots, u_k)$.
- El cálculo de los valores de $x_s^{opt}(u)$, para $u = u^{opt}$.

La tarea (3.44) puede expresarse, en términos del programa de Tchebycheff [12], de una forma más precisa:

Minimizar

$$Z = \max \left\{ \left[w \frac{|z_1(u) - z_1^{id}|}{|z_1^{id}|}, (1-w) \frac{|z_2(u, x_s) - z_2^{id}|}{|z_2^{id}|} \right] / h(u) \geq 0, g(u, x_s) \geq 0 \right\} \quad (3.47)$$

Donde:

$z_1(u)$: Función objetivo que caracteriza la efectividad de la distribución de piezas en la chapa.

z_1^{id} : Valor ideal que puede alcanzar la función $z_1(u)$, sin tomar en consideración los posibles recorridos del útil de corte y su eficiencia.

$z_2(u, x_s)$: Función objetivo que caracteriza la efectividad del recorrido del útil de corte, la que depende necesariamente de las distribuciones posibles de las piezas en la chapa.

z_2^{id} : Valor ideal que puede alcanzar la función $z_2(u, x_s)$, la que en la práctica tan solo puede ser estimada por la dependencia del recorrido del útil de corte respecto a las posiciones de las piezas.

w. Denota el peso (o la importancia relativa) concedido por el usuario al indicador de eficiencia z_1 .

La estructura organizativa más adecuada del sistema se denomina *estructura disperso-conciliada* (ver acápite 2.2.3 figura 2.6) y se caracteriza por la solución independiente de las tareas de toma de decisiones, para diferentes valores de las variables de coordinación u , en el caso de las tareas discretas.

En calidad de funciones $Q_s(u)$, para $s=1, 2$, se considera la aproximación a los indicadores $Z_1(u), Z_2(u, x_n)$ derivados de la descomposición de la tarea (3.43), lo que permite buscar solución a la tarea (3.48) de minimización del recorrido del útil, entre las mejores soluciones de aprovechamiento previamente generadas en la búsqueda de solución a la tarea:

$$\text{Min } \{Z_2(u, x_n) / g_s(u, x_s) \geq 0\} \quad (3.48)$$

En este caso, las restricciones $g_s(u, x_s) \geq 0$ responden a la obligatoriedad de realizar trayectorias factibles entre los nodos de cambio contorno-contorno y las restricciones tecnológicas mencionadas anteriormente.

El modelo para la generación de las distribuciones próximas a la óptima se representa en este caso por:

$$\text{Min } \{Z_1(u) / h(u) \geq 0\} \quad (3.49)$$

Donde las restricciones $h(u) \geq 0$ representan las restricciones de espacio y tecnológicas sobre las chapas para distribuir las piezas.

Por otra parte, el modelo (3.48) puede ser considerado como una aproximación al modelo conceptual de fabricación (3.43) por lo que, de acuerdo a las propiedades del método aproximatorio-combinatorio [121] su solución puede ser encontrada entre aquellas soluciones de (3.48) que se diferencian de la óptima en no más de un parámetro α . En las tareas propias de ingeniería resulta suficiente la generación de un número predeterminado de opciones de solución a (3.49), y para cada una de las soluciones generadas se calcula el valor de (3.43) y se reordenan las opciones por el valor de la función de aproximación multiobjetivo seleccionada.

Al conjunto de soluciones generadas le corresponde un valor de α igual a la diferencia del valor de (3.49) de la solución con mayor valor, menos la de menor valor. El

métodoAproximatorio-Combinatorio aporta el procedimiento de cálculo de cualquier solución aproximada [7]lo que se corresponde con el esquema de solución (3.48).

Distribución de piezas de configuración irregular en superficie planas

La mayoría de los métodos utilizados para la distribución de piezas bidimensionales de configuración irregular consiste en el enfoque poligonal ilustrado en la figura 3.19. Las evaluaciones correspondientes a formas geométricas aproximadas a las reales permiten reducir la complejidad y la duración de las evaluaciones, pero tienen la desventaja que la localización real de la pieza original depende de la posición relativa del contorno de aproximación para su colocación final, el cual restringe la cantidad de posibles posiciones y no considera el área real del contorno irregular.

Así, Art presenta en 1966, por primera vez [9], la aplicación de la técnica del "not fit-poligon" en el área del corte de piezas en superficie planas. En el año 1976 esta técnica fue reintroducida por Adamowicz y Albano [4], simplificando las piezas de carácter irregular utilizando rectángulos y buscando el mínimo del área de unión.

En una propuesta realizada en el año 2001 [97] se presenta la aplicación del procedimiento de búsqueda aleatoria conocido como "Greedy Randomised Adaptive Search Procedure" (GRASP) a la tarea estudiada integrada con la técnica del "not fit-poligon". Esta tecnica es usada también por la otros muchos autores variando la aproximación de la superficie.

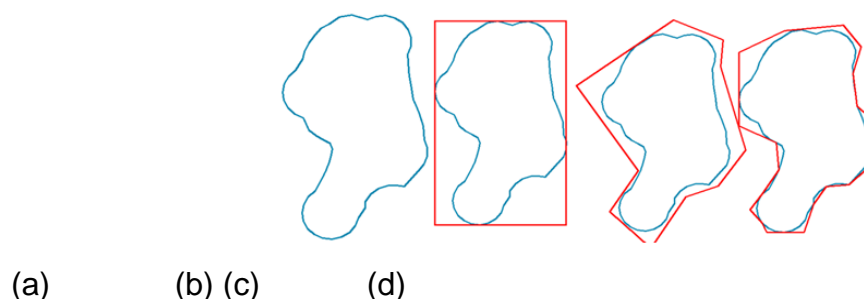


Fig. 3.19. Aproximación geométrica de un contorno irregular (a) contorno real (b) aproximación rectangular, (c) aproximación de 10 lados, (d) aproximación de 18 lados.

Sin embargo, ya en el año 2006 Yuping, Shouwi y Chunli [217] propusieron un método para buscar una aproximación a la solución óptima, utilizando una modificación del Recocido Simulado, tomando en cuenta el contorno real de las piezas de configuración irregular. A

pesar del avance que representa este enfoque, el tratamiento simple de la geometría de las piezas realizado, en adición a otros factores, no permitió una búsqueda suficientemente eficiente que facilitara la generación rápida de opciones, lo que estaba condicionado por la lentitud de la búsqueda de soluciones racionales.

En adelante se presenta un enfoque que integra un tratamiento gráfico eficiente de la geometría real de las piezas con la búsqueda de soluciones por el procedimiento expuesto anteriormente de la Exploración Aleatoria del Extremo de una Función de Códigos Variables con el propósito de generar opciones de distribución que alcancen una elevada utilización del material tomando en consideración el sistema completo de preferencias del eventual decisor, el que incluye indicadores de carácter cuantificable y no cuantificable y su conciliación con el proceso de corte.

El tratamiento de las superficies incluye:

- Definición de áreas cóncavas y convexas de las piezas.
- Amplitud de cada área cóncava o convexa Amp : Se determina por la máxima distancia entre los puntos extremos que pertenecen al área.
- Profundidad del área Pr : Se determina por la máxima distancia entre los puntos del área hasta la línea recta perpendicular que define los puntos extremos de la misma.
- Aproximación numérica del ángulo de acoplamiento de cada área ∂a : se determina por la magnitud angular entre las líneas rectas tangentes que van desde el punto extremo del área hasta los puntos anterior y posterior a él en el contorno discretizado de la pieza.

En la figura3.20 se ilustran las características numéricas mencionadas:

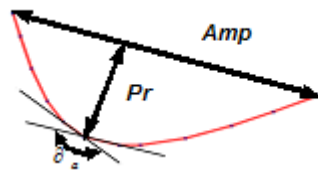


Fig. 3.20 Características numéricas de las áreas cóncavas y convexas

Se comparan las áreas cóncavas y convexas de las piezas seleccionadas. Si un par de áreas pueden ser acopladas de acuerdo a sus características numéricas son tomadas en cuenta, en otro caso no se comparan. En la figura3.21 se ilustra el proceso de comparación,

el que reduce sensiblemente el proceso de comparación de dos piezas entre sí por la no consideración de aquellos pares de concavidades y convexidades con acoples no factibles.

Así, el proceso de comparación entre 2 piezas consiste en una búsqueda exhaustiva entre 2 piezas diferentes factibles de ser acopladas por los indicadores de sus áreas cóncavas y convexas.

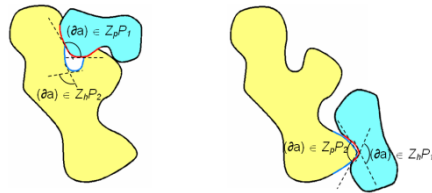


Fig. 3.21 Ilustración del proceso de comparación entre dos piezas

Formación de conglomerados entre piezas

Se crean y evalúan conglomerados entre piezas, restringidos por los límites de la superficie plana o por el hecho de no existencia de nuevas piezas por distribuir. Al acoplarse dos piezas se forma un conglomerado, el que es considerado una nueva pieza para su acoplamiento posterior con otra del conjunto de piezas candidatas a conformar su vecindad. En la figura 3.22 se ilustra el proceso de creación de tres conglomerados de piezas.

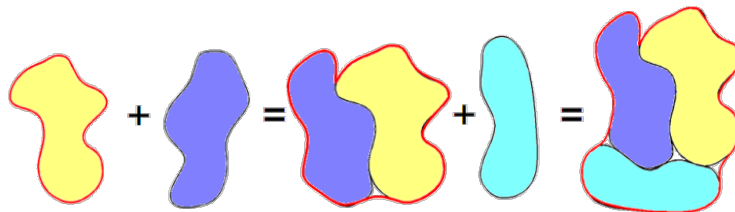


Fig. 3.22 Formación de conglomerados de piezas.

Máximo perímetro de coincidencia

Este indicador toma en consideración las diferentes regiones o lados de las piezas que coinciden en una unión. Se define como coincidente el perímetro coincidente de ambas piezas contra sus perímetros totales. Este indicador refleja la calidad del acople (ver figura 3.23) y se calcula como:

$$y_1 = L_{cab} / (P_a + P_b) \quad (3.50)$$

Donde:

L_{cab} : Longitud del sector coincidente entre los contornos A-B

P_a : Perímetro del contorno A.

P_b : Perímetro del contorno B.

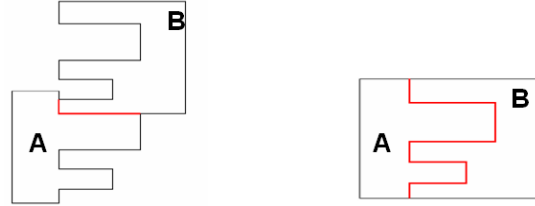


Fig.3.23 Variantes de posicionamiento del acoplamiento entre dos piezas.

(a) Baja calidad de acoplamiento

(b) Alta calidad de acoplamiento

Mínimo polígono contenedor

Toma en consideración el carácter geométrico deseable final, determinado por la configuración de la superficie plana original (rectangular o irregular) del acople, propiciando la selección de opciones que aporten la mejor relación de área con respecto a la configuración geométrica deseada y refleja la calidad del acople; se calcula de la forma siguiente:

$$y_2 = A_{ac} / A_{mr} \quad (3.51)$$

Donde:

A_{ac} : Área de la región conformada en el conglomerado.

A_{mr} : Área del polígono mínimo que contiene la región conformada en el conglomerado.

Para determinar las áreas A_{ac} y A_{mr} se utiliza el procedimiento algebraico del producto en cruz [39]. Dadas las coordenadas del contorno de un polígono P, expresadas como (x_1, y_1) , $(x_2, y_2) \dots (x_n, y_n)$ su área se calcula por la expresión:

$$A(P) = \frac{1}{2} \cdot \left[\left(\sum_{i=1}^{n-1} (x_i \cdot y_{i+1} - y_i \cdot x_{i+1}) \right) + (x_n \cdot y_1 - y_n \cdot x_1) \right] \quad (3.52)$$

La función bicriterial $f(u)$ de compromiso entre (y_1, y_2) para la construcción de conglomerados de piezas se establece como el mínimo de la distancia de Tchebycheff desde los valores ideales de los indicadores de eficiencia del acople $(y_1^{id}; y_2^{id})$ a sus valores reales, es decir,

$$f(u) = \min \{ [\lambda(1 - y_1), (1 - \lambda)(1 - y_2)] / h(u) > 0 \} \quad (3.53)$$

Donde:

$y_1(u)$ Función que caracteriza la efectividad del perímetro de coincidencia en el acople
: entre piezas ($y_1^{id} = 1$).

$y_2(u)$: Función que describe la efectividad del área de ajuste en el acople entre piezas
($y_2^{id} = 1$)

λ : Coeficiente de peso que determina la influencia de los indicadores (y_1, y_2) y en la selección de las opciones de acople entre piezas.

$h(u) \geq 0$: Restricciones geométricas para la distribución de las piezas: las piezas no se pueden intersectar ni ser sobrepasadas las dimensiones de la superficie plana, cuya configuración puede ser también irregular, etc; son verificadas por el software de representación gráfica (AutoCAD, programado desde AutoLISP)

La función objetivo (3.53) presupone la minimización de la máxima diferencia de cada uno de los indicadores utilizados con respecto a los realmente alcanzados en el proceso de búsqueda a sus valores ideales, lo que asegura la generación de variantes de solución en las proximidades de la región de soluciones eficientes. Al inicio de la búsqueda adquiere su máxima importancia el indicador y_1 , pues la calidad del acoplamiento de ambas piezas comparadas es tanto más importante cuanto menor sea el área del conglomerado formado por la superficie plana donde serán ubicadas. Según crecen los conglomerados su aproximación a figuras poligonales adquiere cada vez mayor importancia, pues se tienen que ir ajustando a la configuración real de las superficies planas. Por las razones expuestas se establece el valor de λ por la expresión:

$$\lambda = \frac{\text{Area del conglomerado}}{\text{Area de la chapa}} \quad (3.54)$$

Algoritmo de distribución

En cada paso del Algoritmo se algoritmo de distribución se aplica la exploración aleatoria de los extremos de una función de códigos variables, descrita con anterioridad para 2 códigos correspondientes a dos piezas diferentes. En calidad de códigos se utilizan el número de serie del conglomerado y como segundo código el número de serie de las piezas no ubicadas en cada uno de ellos. En el primer paso la evaluación de los acoples factibles se realiza entre todas las piezas a distribuir, por lo que se emplean los códigos del conjunto inicial de piezas; es decir, cada pieza en particular es considerada como un conglomerado. Al final del primer

paso se obtiene una población de los m pares de piezas más prometedoras para formar conglomerados de dos piezas. Los conglomerados obtenidos se consideran como nuevas piezas y se continúa el acoplamiento con las piezas que no forman parte de cada conglomerado evaluado. Al cumplirse el criterio de parada se obtiene una población de los conglomerados más prometedores. El proceso continúa mientras queden piezas por ubicar en los conglomerados o bien la superficie sobre la que se distribuyen las piezas no admite ninguna nueva pieza. En cada nueva población las soluciones son ordenadas por los valores de la función (3.53). Un conglomerado dado puede o no constituir uno nuevo en el próximo paso de adición de piezas si la función objetivo adquiere un valor que se encuentre o no entre los m mejores valores del paso dado. El proceso de generación de soluciones se ilustra en la figura 3.24

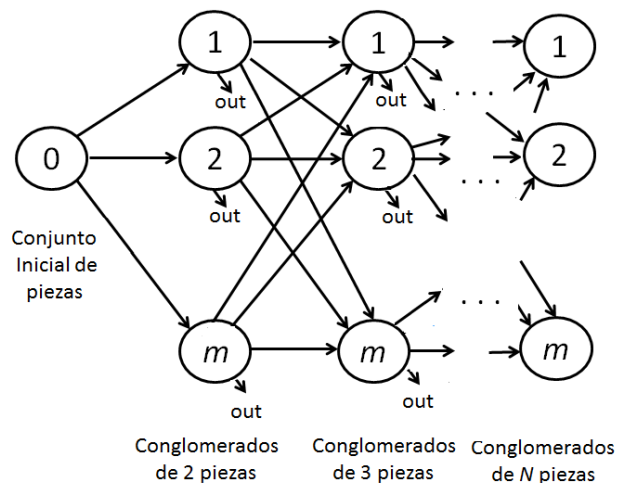


Fig.3.24 Proceso de formación de poblaciones de conglomerados

Si no es posible adicionar piezas faltantes en un conglomerado en la superficie previamente seleccionada por el usuario, entonces se selecciona otra superficie y el proceso se repite hasta tanto queden piezas por distribuir.

La idea general de algoritmo se inspira en la idea del método de la programación dinámica, con la diferencia que en el proceso de búsqueda se utiliza solo las soluciones más prometedoras del paso previo.

Generación de trayectorias de corte

La tarea de búsqueda de trayectoria de corte consiste en la minimización de la longitud total de la longitud de la trayectoria de la herramienta de corte asegurando un conjunto de

restricciones asociadas a las dimensiones de la superficie a cortar y a la tecnología de corte a utilizar, y obedece a algoritmos complejos de cálculo, es decir, tiene carácter algorítmico y se representan por la expresión general $g_s(u, x_s) \geq 0$ en (3.43). En particular, es necesario considerar la disposición geométrica de las piezas en la chapa (para el corte de metales en la industria mecánica) así como el conjunto de restricciones asociadas al proceso de corte aplicado. Se requiere de tal forma que el conjunto de trayectorias de corte considerado sea racional y factible. Este conjunto de soluciones debe considerar, en muchos casos, la estabilidad del proceso de corte definida tecnológicamente, la que se determina por las características de fijación de la chapa en la máquina de corte y por el peso de la chapa.

En determinadas máquinas donde la fijación de la chapa se realiza por prensas de fijación o por el peso propio de la chapa, es necesario mantener su estabilidad geométrica durante el corte, para evitar que el peso sobre el pantógrafo se distribuya de manera no uniforme y proporcione poca rigidez en los puntos de sujeción de la chapa, lo que ocasiona movimientos no deseados de la misma durante el corte y afecta las dimensiones y la forma de las piezas cortadas.

En las máquinas donde la sujeción de la chapa se realiza por métodos diferentes (magnetismo), ésta variable de uniformidad de peso de la chapa no posee carácter directivo en la generación del recorrido de corte, puesto que la chapa siempre estará fijada lo suficientemente rígida al pantógrafo, evitándose de ésta manera los posibles movimientos indeseados de la misma.

De este modo, la definición de la trayectoria de corte debe considerar lo antes expuesto, por lo que debe definirse, antes de comenzar el proceso de generación, la forma en que será tratada la chapa para su corte, sea:

- Generación de trayectorias, garantizando la uniformidad de peso de la chapa.
- Generación de trayectorias, con movimiento libre sobre la chapa.

En ambos casos el procedimiento de generación de trayectorias debe encontrar variantes racionales atendiendo al consumo de recursos tecnológicos y a los tiempos de corte.

Los autores elaboraron diferentes algoritmos de carácter empírico para diferentes variantes tecnológicas. La búsqueda de las variantes de trayectorias de corte se realiza por el

método de la vecindad más cercana[80] el cual permite establecer las proximidades y adyacencias entre piezas, a través de la cercanía de sus fronteras. En lo adelante se explica el que asegura la uniformidad del peso de la chapa. En este caso es necesario partir de las condiciones de posicionamiento de la chapa en la máquina y la ubicación del útil de corte. Es necesario definir la dirección de uniformidad de corte, para lo cual se establece el eje del movimiento del útil para el corte de la chapa. Este barrido tiene en cuenta el posicionamiento y vecindad entre las piezas de manera que se realice con el menor recorrido del útil posible (figura3.25).

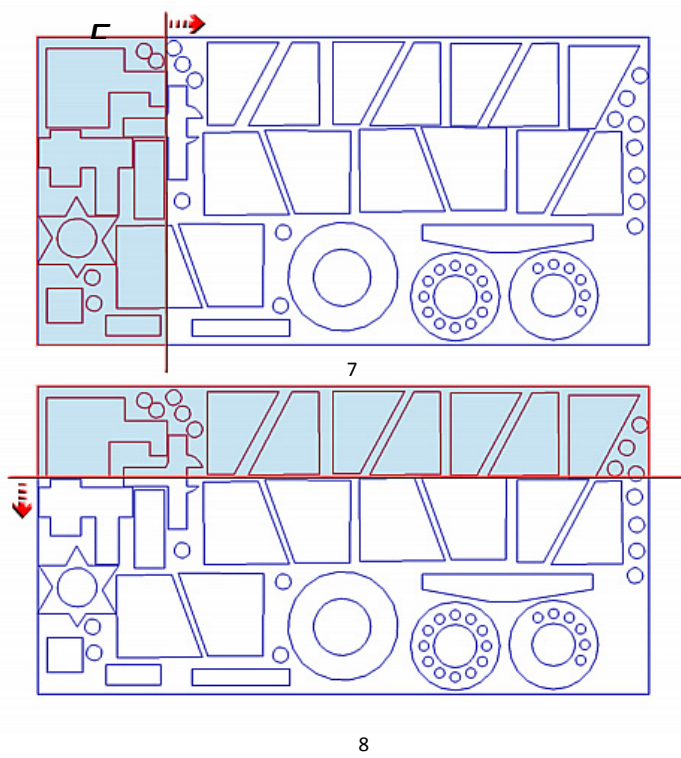


Fig.3.25 Ejes de barrido. (a) Barrido en el eje X, (b) Barrido en el eje Y.

Durante el barrido según el eje establecido, el conjunto de piezas enmarcadas dentro del paso de barrido seleccionado, son definidas como el conjunto inmediato de piezas para el corte C_{corj} (figura 3.26). A este C_{corj} es necesario definirle un orden o secuencia de corte entre las diferentes piezas que lo conforman lo cual se realiza, en dependencia de la cercanía entre sus vecindades, el posicionamiento del útil de corte y el eje seleccionado para el barrido. Una vez cortado el C_{corj} , se somete a la formación de un nuevo conjunto C_{corj+1} realizando

un nuevo barrido de la chapa en el eje y magnitud prefijados. De esta manera, se repite la formación y corte de éstos conjuntos hasta haber cumplimentado el corte de la totalidad de las piezas.

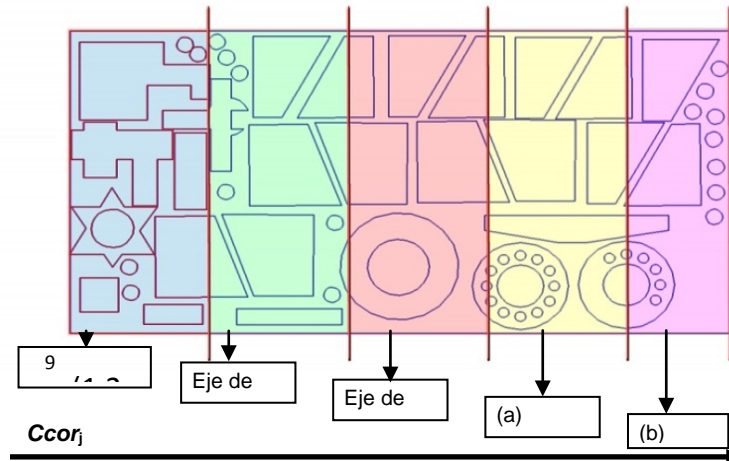


Fig.3.26 Conjunto inmediato de piezas para el corte $Ccorj$

Para prefijar el valor de la magnitud o paso de barrido se tiene en cuenta la pieza con mejor ubicación respecto al posicionamiento del útil de corte, es decir los valores de $(Xhcor; Yhcor)$. Esta pieza se denomina pieza inicial del conjunto inmediato a cortar $PiCcorj$. A partir de la $PiCcorj$ se obtienen las coordenadas extremas de la misma en el sentido del eje de barrido, $(Xext; Yext)$, todas las piezas que posean coordenadas de su frontera dentro del rango definido por las magnitudes extremas, pertenecerán al $Ccorj$ en formación. De esta manera el movimiento del útil de corte se realiza por los conjuntos definidos atendiendo a las variables antes mencionadas (figura3.27).

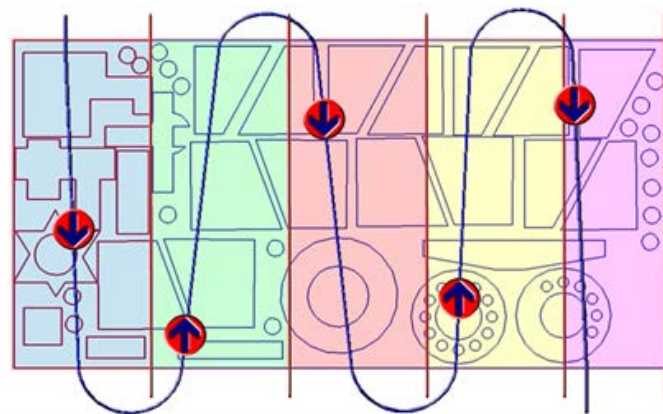


Fig.3.27Ejemplo de la dirección del recorrido del útil de corte

Esquema conceptual del sistema CAD desarrollado

El procedimiento expuesto anteriormente, se implementó en una herramienta informática, de forma que todo el proceso de optimización y representación de los resultados gráficos se efectúa de manera automatizada, lo cual facilita al tecnólogo el proceso de toma de decisiones. El hecho que el proceso de preparación para la fabricación transcurre en el mismo sistema CAD elegido, crea mejores condiciones para la integración de los datos de diseño con los de la preparación para la fabricación del producto, y permite el uso de un formato común para el tratamiento de la información gráfica.

De esta manera, el sistema para la distribución y corte de piezas de configuración irregular en superficies planas cuenta con un conjunto módulos integrados (figura 3.28), los cuales en sus funciones específicas e interrelacionadas garantizan la generación de soluciones al problema en estudio.



Fig. 3.28. Esquema conceptual del sistema CAPP para la distribución y corte de piezas en superficies planas.

Resultados obtenidos

El procedimiento propuesto, para la distribución y corte de piezas irregulares en superficies planas, se ejecutó en una herramienta computacional implementada en el

lenguaje de programación AutoLISP, y OpenDCL como la interfaz de comunicación. El software desarrollado (DIPRONEST) se ejecuta bajo la plataforma de trabajo AutoCAD.

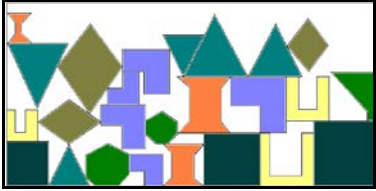
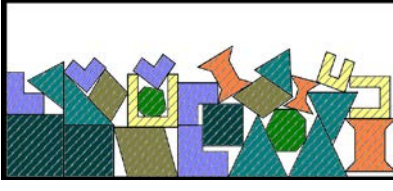
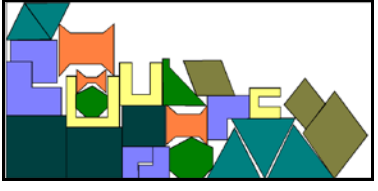
Para el análisis de los resultados ofrecido por DIPRONEST, se realizaron estudios comparativos con diferentes métodos propuestos en la literatura para la solución de la tarea estudiada y con los software de mayor aceptación en el mercado.

La configuración de las piezas y los resultados alcanzados por Jakobs se obtuvieron directamente de su publicación en el artículo [122]. Por otro lado, la información relacionada a los trabajos de Hu-yao y Yuan-jun, se obtuvieron de [120]. Estos últimos, presentaron los resultados obtenidos por su enfoque de solución comparados con los obtenidos por Jakobs. Por esta razón fué utilizada la misma base experimental de piezas.

En el año 2002 Gomes y Oliveira propusieron un nuevo procedimiento para la distribución de piezas de la configuración irregular en superficies[60, 97]. Los resultados obtenidos así como la base experimental de piezas utilizada fueron publicados en [98]. Después, en el año 2006, Liu Hu-yao y He Yuan-jun [120], tomaron estos resultados como patrón de comparación, al evaluar la misma base experimental en su algoritmo solución.

Estos resultados se muestran en las tablas siguientes:

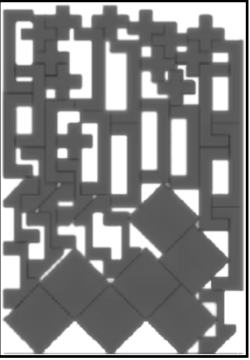
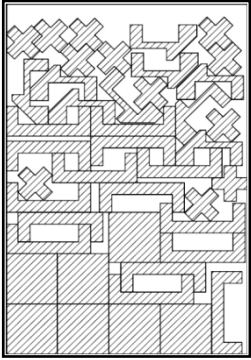
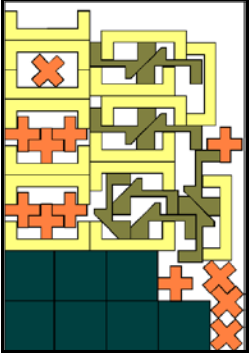
Tabla 3.2 DIPRONEST vs Jakobs & Hu-yao/Yuan-jun

Comparación de resultados de distribución por autores		
Jakobs (1996)	Hu-yao/Yuan-jun (2006)	DIPRONEST
		
Ap = 77,4 %	Ap = 83,6 %	Ap = 86,4 %

Las soluciones generadas por los especialistas de una empresa en una fábrica de la industria mecánica (el Combinado Mecánico del Níquel), con el empleo del muy conocido software TurboNest, y los generados por DIPRONEST fueron también comparados. Como criterios de comparación en ambos casos se utilizaron el aprovechamiento del material (Ap), y el tiempo de generación de las soluciones (T). Los valores medios obtenidos para los mismos 10 lotes

piezas fueron: DIPONEST Ap usando = 84,3%, T = 4,3 min y por TurboNest Ap = 74,2%, T = 9 min

Tabla 3.3 DIPRONEST vs. Gomes /Oliveira & Hu-yao/ Yuan-jun

Comparación de resultados de distribución por autores		
Gomes/Oliveira (2002)	Hu-yao/Yuan-jun (2006)	DIPRONEST
		
Ap = 69,5 %	Ap = 73,1 %	Ap = 76,7 %

El algoritmo propuesto para la solución de la tarea de elaboración de gráficos racionales de MPP, presenta la ventaja adicional de posibilitar la generación de un número de opciones todo lo amplio que se desee, con vistas a la compatibilización de la actividad de MPP con otras actividades laborales.

3.6.3 Búsqueda por Vectores Direccionales

El algoritmo de búsqueda propuesto fue concebido para la solución de problemas de secuenciación y responde al esquema general del Método de Integración de Variables. A continuación se describen sus características principales[227].

Codificación

Dado un conjunto de n vértices a ordenar $V = \{1, 2, \dots, n\}$ se requiere hallar una secuencia de vértices entre el vértice de partida y el de llegada de forma de satisfacer un criterio de optimización. Cada elemento de la población de soluciones responde a tres vectores denominados V_{Libres} , $V_{Bloqueados}$ y V_{Sol} . Cada vector almacena los índices de los nodos

de S que pertenecen a él. El conjunto de vértices que pertenecen a $VSol$ cumplen la propiedad de satisfacer una secuencia, son un subgrafo completo de S . $VLibres$ almacena el conjunto de vértices disponibles para aumentar la cantidad de vértices en $VSol$, cada uno de los vértices de $VLibres$ es adyacente a todos los vértices de $VSol$. El conjunto de vértices en $VBloqueados$ cumplen la propiedad de no ser adyacentes con al menos uno de los vértices en $VSol$. Ninguno de los vértices de $VBloqueados$ puede ser agregado a $VSol$ porque entonces $VSol$ dejaría de ser una secuencia válida.

Creación de la población inicial

La cantidad de elementos ce tiene un impacto fundamental en la calidad de la solución a encontrar y en el tiempo de ejecución. A mayor tamaño de la población se obtiene mejor exploración de soluciones diferentes. Se denota como $VLibres_i$, $VBloqueados_i$ y $VSol_i$ a los vectores correspondientes al elemento i de la población. La configuración inicial para cada elemento se define:

$$ce > 0, ce \in \mathbb{Z}$$

$$i \in \{1, 2, \dots, ce\}$$

$$VLibres_i = \{1, 2, \dots, n\}$$

$$VBloqueados_i = \{\}$$

$$VSol_i = \{\}$$

Operadores para generar poblaciones sucesivas

Se definen dos operadores que permiten la evolución de una población, el operador de adición y el operador de eliminación. Cada operador es aplicado de manera independiente a un elemento de la población. Estos operadores tienen funciones opuestas y permiten explorar el conjunto de soluciones.

El operador de adición tiene como vector de partida a $VLibres$, su función es seleccionar aleatoriamente un vértice de $VLibres$, eliminarlo y adicionarlo al vector $VSol$. Los vértices de $VLibres$ cumplen la propiedad de ser adyacentes a todos los vértices de $VSol$, por lo tanto con este nuevo vértice continúa siendo una solución. El resto de los vértices de $VLibres$ tienen que ser explorados para eliminar aquellos que no son adyacentes al vértice adicionado a $VSol$ y adicionarlos al vector $VBloqueados$. De esta manera se conserva la propiedad de los vértices de $VLibres$.

El operador de eliminación tiene como vector de partida a V_{Sol} , y su función es seleccionar aleatoriamente un vértice de V_{Sol} , eliminarlo y adicionarlo a V_{Libres} . Los vértices de $V_{Bloqueados}$ tienen que ser explorados para seleccionar aquellos que no son adyacentes al vértice eliminado de V_{Sol} y que además sean adyacentes a todos los vértices de V_{Sol} para adicionarlos a V_{Libres} . Este operador permite realizar un retroceso en el proceso de búsqueda semejante a la técnica backtracking.

La probabilidad de aplicación del operador de adición debe ser alta. Las probabilidades de los operadores de adición y eliminación son complementarias. Si la probabilidad indica la aplicación de un operador, pero este no puede ser aplicado porque no existen vértices en su vector de partida entonces el operador opuesto debe ser aplicado. La complejidad computacional del operador de adición es $O(n)$ y del operador de eliminación es $O(n^2)$. Una característica importante en la eficiencia del algoritmo es la aplicación del operador de adición con una probabilidad alta pues la complejidad computacional de este es menor que la complejidad de su opuesto.

Criterio de parada

Existen diversos criterios de parada que se pueden establecer, escoger uno de ellos depende de la aplicación concreta del problema.

El primer criterio de parada consiste en realizar un número de iteraciones igual al número de vértices del grafo. Este criterio garantiza que se conoce el número de iteraciones a ejecutar y que el tiempo de ejecución puede estimarse con bastante exactitud..

El segundo criterio de parada consiste en terminar la ejecución cuando se hayan realizado una cantidad de iteraciones mayor o igual a un número predeterminado de ellas.

Aplicación 17: Solución al problema máximo clique ponderado

En un grafo no dirigido y con pesos positivos asociados a los vértices, el problema máximo clique ponderado (*Maximum Weight Clique* MWC) consiste en encontrar un subgrafo completo donde la suma de los pesos de los vértices sea máxima. El problema es NP-completo. El problema MWC tiene aplicaciones en la identificación de caras poligonales como proceso de la reconstrucción tridimensional y en la segmentación de objetos en secuencias de video. También se encuentran aplicaciones en el diagnóstico de fallas en sistemas con múltiples procesadores, teoría de códigos y biología molecular.

Hasta la realización de esta investigación existían dos enfoques principales para resolver el problema MWC: la resolución mediante un algoritmo exacto o mediante algún algoritmo heurístico diferente al propuesto; **Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Han sido elaborados diferentes algoritmos de ambos tipos para el problema. Los algoritmos exactos tienen la desventaja que exploran en el peor de los casos todas las soluciones posibles, por lo cual solo pueden aplicarse para grafos pequeños.

En 1994 L. Babel presenta un método de la técnica *branch and bound* con heurística de coloración ponderada para grafos arbitrarios; **Error! No se encuentra el origen de la referencia..** También han sido elaborados algoritmos heurísticos con técnicas de Redes Neuronales, Algoritmos Genéticos y Búsqueda Tabú; **Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Marchiori presenta en; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** un algoritmo genético para el problema MWC. En; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se propone la aproximación del problema MWC usando Replicator Dynamics en Redes Neuronales.

Un conjunto de grafos de referencias de acceso público es mantenido por *Center for Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science* (DIMACS). Los grafos públicos de DIMACS y grafos contruidos aleatoriamente pueden ser usados como indicadores de la calidad de los nuevos algoritmos. Aunque muchos algoritmos han sido publicados desde 1970, la comparación entre estos se hace difícil pues no existen publicaciones amplias sobre comparaciones; **Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Esquema de solución:

El algoritmo de búsqueda propuesto para el problema MWC responde al esquema general del Algoritmo de Búsqueda por Vectores Direccionales. A continuación se describen las particularidades principales.

Se define al conjunto devértices del grafo G como $V = \{1, 2, \dots, n\}$. El conjunto de vértices que pertenecen a $VSol$ cumplen la propiedad de ser un clique en G y son un subgrafo completo de G . Al igual que en el algoritmo general expuesto, $VLibres$ almacena el conjunto de vértices disponibles para aumentar la cantidad de vértices en $VSol$, cada uno de los vértices de $VLibres$ es adyacente a todos los vértices de $VSol$. El conjunto de vértices en $VBloqueados$ cumple la propiedad de no ser adyacentes con al menos uno de los vértices en $VSol$. Ninguno

de los vértices de $VBloqueados$ puede ser agregado a $VSol$ porque entonces $VSol$ dejaría de ser un clique.

La población inicial se crea tal y como se propone para el Algoritmo de Búsqueda por Vectores Direccionales.

Función de calidad

Siendo ω_j el valor de ponderación del vértice j y W_i la calidad del elemento i ; se define como función de calidad.

$$W_i = \sum_{j \in VSol_i} \omega_j$$

La anterior definición representa para un elemento i la suma de pesos de los vértices que se encuentran en el vector de soluciones $VSol$. En cada iteración se compara W_i con el valor de MWC global W , y si $W < W_i$ entonces el valor W es actualizado y una copia de $VSol_i$ es hecha para $VBest$. Al finalizar la ejecución $VBest$ almacena los índices de los vértices del mejor clique encontrado.

Los operadores de adición y eliminación se implementan según lo propuesto para el Algoritmo de Búsqueda por Vectores Direccionales.

Criterios de parada:

El primer criterio de parada consiste en realizar un número de iteraciones igual al número de vértices del grafo. Este criterio garantiza que se conoce el número de iteraciones a ejecutar y que el tiempo de ejecución puede estimarse con bastante exactitud. El algoritmo propuesto utilizando este criterio de parada será denominado en lo adelante LBS1.

El segundo criterio de parada consiste en terminar la ejecución cuando se hayan realizado una cantidad de iteraciones mayor o igual que $\log_2 n$ sin haberse mejorado el valor W . Con este criterio el algoritmo garantiza no terminar mientras se mejore la solución global en un número pequeño de iteraciones. El algoritmo propuesto utilizando este criterio de parada será denominado en lo adelante LBS2.

El criterio número tres sólo se diferencia del primer criterio en que el número de iteraciones para terminar la ejecución tiene que ser mayor o igual que n . Este criterio garantiza resultados mejores que el primer criterio pero en un tiempo de ejecución más alto. El algoritmo propuesto utilizando este criterio de parada será denominado en lo adelante LBS3.

Resultados computacionales

Se realizan experimentos para evaluar correctamente el nuevo algoritmo. Se muestra el rendimiento en grafos de referencias DIMACS y en grafos aleatorios. Para cada caso de prueba el algoritmo fue ejecutado cien veces. El tamaño de la población utilizado en las ejecuciones es igual al número de vértices del grafo. La probabilidad de aplicación del operador de adición fue de 0.95. La media y la varianza del máximo clique ponderado encontrado y la media de tiempo de ejecución fueron calculados. El procedimiento fue implementado en C++. Las pruebas se realizaron en una Laptop Acer con 2 GB de memoria RAM y un procesador Intel P6200 a 2.13 GHz. Un sistema operativo Linux fue utilizado. Los tiempos de usuario para los grafos de referencias DIMACS destinados a la comparación del rendimiento de PC denominados r100.5, r200.5, r300.5, r400.5 y r500.5 fueron 0.00, 0.04, 0.27, 1.62, y 6.15 segundos respectivamente.

Grafos DIMACS

Los grafos DIMACS no son ponderados, sin embargo aquí es utilizado un valor constante como peso para cada uno de los nodos. Los resultados se muestran en las tablas 1 y 2. El nuevo algoritmo es comparado con el método de Lemke utilizando el criterio de resolución por degeneración lexicográfica (LDR) y la heurística basada en pivote (PBH) **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Los datos de LDR y PBH son tomados de las tablas 1 y 2 de **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** En **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** sólo es descrita la PC donde fueron realizadas las pruebas, por lo cual solo es posible realizar una comparación aproximada en cuanto a los tiempos de ejecución.

La primera columna ω muestra el valor de máximo clique ponderado y las otras columnas ω son los valores de máximo clique ponderado para los algoritmos LDR y PBH respectivamente. μ es la media de máximos cliques ponderados encontrados en las cien ejecuciones y σ^2 la varianza. μ_T es la media de tiempo de ejecución en segundos.

LDR y PBH no son algoritmos exactos, utilizan la formulación del problema máximo clique ponderado como problema de complementariedad lineal. PBH mejora los resultados de LDR ingresando una regla de pivote denominada por los autores *look-ahead*.

Para el grafo p_hat1000-3 el algoritmo LBS3 encontró cliques con tamaño 68. La siguiente es una solución de tamaño 68 (los vértices están enumerados comenzando por 1): {8, 38, 65, 92, 104, 162, 171, 186, 192, 194, 202, 204, 226, 227, 242, 243, 262, 271, 283, 330, 334, 335, 370, 378, 401, 406, 411, 461, 492, 495, 497, 527, 537, 538, 549, 562, 598, 599, 604, 621, 623, 639, 650, 651, 662, 671, 705, 719, 778, 782, 783, 784, 798, 780, 819, 824, 836, 864, 868, 876, 897, 900, 914, 922, 927, 967, 992, 993}.

Diferentes familias de grafos son utilizadas en las pruebas basadas en los grafos DIMACS. La Tabla 1 muestra las pruebas realizadas con grafos CFats, Hamming, Johnson y PHat. Los grafos CFats surgen del problema de diagnóstico de fallas en sistemas con múltiples procesadores **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Los grafos de Hamming y Johnson están basados en los esquemas de Hamming y Johnson respectivamente. PHat son grafos aleatorios con alta varianza en la distribución del grado de los nodos, estos grafos tienen cliques mayores que los grafos aleatorios **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Tabla 1. Resultados en grafos DIMACS (parte I)

Grafos	ω	LDR		PBH		LBS 1			LBS 2			LBS 3		
		ω	Time	ω	Time	μ	σ^2	μ_r	μ	σ^2	μ_r	μ	σ^2	μ_r
c-fat200-1	12	12	0.07	12	5.0	12.00	0.00	0.04	12.00	0.00	0.00	12.00	0.00	0.04
c-fat200-2	24	24	0.12	24	9.0	24.00	0.00	0.04	24.00	0.00	0.00	24.00	0.00	0.04
c-fat200-5	58	58	0.28	58	22.5	58.00	0.00	0.03	58.00	0.00	0.00	58.00	0.00	0.04
c-fat500-1	14	14	0.48	14	100.3	14.00	0.00	0.78	14.00	0.00	0.03	14.00	0.00	0.80
c-fat500-2	26	26	0.79	26	185.2	26.00	0.00	0.75	26.00	0.00	0.03	26.00	0.00	0.78
c-fat500-5	64	64	1.83	64	464.5	64.00	0.00	0.66	64.00	0.00	0.04	64.00	0.00	0.76
c-fat500-10	126	126	3.59	126	1024.2	126.00	0.00	0.52	126.00	0.00	0.06	126.00	0.00	0.69
hamming6-2	32	32	0.01	32	0.4	31.51	1.38	0.00	31.30	0.98	0.00	31.56	0.98	0.00
hamming6-4	4	4	0.00	4	0.1	4.00	0.00	0.00	4.00	0.00	0.00	4.00	0.00	0.00
hamming8-2	128	128	0.98	128	252.6	107.19	22.83	0.68	100.6	54.04	0.02	115.12	7.86	0.22
hamming8-4	16	16	0.14	16	22.8	16.00	0.00	0.16	15.47	1.14	0.01	16.00	0.00	0.18
hamming10-2	512	512	61.01	512	-	362.12	89.26	4.50	303.16	251.77	1.03	454.52	25.56	32.75
hamming10-4	≥ 40	32	4.1	32	-	40.00	0.00	10.40	31.92	0.61	0.35	40.00	0.00	15.12
johnson8-2-4	4	4	0	4	0.0	4.00	0.00	0.00	4.00	0.00	0.00	4.00	0.00	0.00
johnson8-4-4	14	14	0.01	14	0.3	14.00	0.00	0.00	13.56	0.92	0.00	14.00	0.00	0.00
johnson16-2-4	8	8	0.01	8	1.1	8.00	0.00	0.01	8.00	0.00	0.00	8.00	0.00	0.01
johnson32-2-4	≥ 16	16	0.54	16	184.8	16.00	0.00	0.93	16.00	0.00	0.03	16.00	0.00	0.95
p_hat300-1	8	6	0.1	8	14.0	8.00	0.00	0.28	7.41	0.24	0.01	8.00	0.00	0.30
p_hat300-2	25	16	0.2	25	34.9	25.00	0.00	0.26	21.09	0.82	0.02	25.00	0.00	0.39
p_hat300-3	36	21	0.25	35	61.0	34.35	0.56	0.20	29.59	1.22	0.02	35.66	0.42	0.51
p_hat500-1	9	6	0.27	9	83.5	9.00	0.00	1.45	8.45	0.24	0.04	9.00	0.00	1.50
p_hat500-2	36	26	0.82	36	282.5	35.98	0.01	1.27	28.49	1.66	0.07	36.00	0.00	2.23
p_hat500-3	≥ 50	30	0.94	48	485.7	48.54	0.28	0.99	39.14	1.70	0.06	49.62	0.23	2.42
p_hat700-1	11	5	0.47	10	249.4	11.00	0.00	4.37	9.05	0.14	0.11	11.00	0.00	5.05
p_hat700-2	44	20	1.26	44	1022.3	44.00	0.00	3.79	35.11	2.35	0.18	44.00	0.00	6.11
p_hat700-3	≥ 62	29	1.76	62	1804.0	60.6	0.36	2.84	47.41	4.20	0.17	61.91	0.08	6.82
p_hat1000-1	≥ 10	7	1.17	10	798.0	10.00	0.00	13.49	9.32	0.21	0.26	10.00	0.00	13.79
p_hat1000-2	≥ 46	18	2.37	46	-	46.00	0.00	12.14	36.08	2.67	0.40	46.00	0.00	19.04
p_hat1000-3	≥ 66	31	3.82	64	-	65.01	0.72	9.10	49.55	2.48	0.37	67.59	0.32	27.20
p_hat1500-1	12	9	3.12	12	-	11.37	0.23	50.57	10.15	0.12	0.73	11.36	0.23	59.41
p_hat1500-2	≥ 65	28	7.69	64	-	64.99	0.00	43.80	47.97	3.76	1.20	65.00	0.00	76.68
p_hat1500-3	≥ 94	43	11.43	91	-	92.05	0.36	35.13	64.06	6.27	1.19	93.79	0.18	100.00

En los resultados correspondientes a los grafos CFats de la Tabla 1 las tres versiones del algoritmo propuesto obtienen el óptimo, destacándose la versión LBS2 por tener menor media de tiempo de ejecución. Para el grafo hamming10-2 el algoritmo propuesto obtiene resultados inferiores a LDR y PBH en cuanto a clique se refiere pero los tiempos de ejecución se mantienen por debajo.

Las pruebas de la Tabla 2 utilizan grafos MANN, Keller, Brock, San y Sanr. Los grafos MANN son una reducción al problema máximo clique del problema *Minimum Set Cover*. No se encuentra el origen de la referencia.. Los grafos de Keller tienen su base en la conjetura de Keller. No se encuentra el origen de la referencia.. San y Sanr son grafos aleatorios con máximo clique conocido y para los grafos Brock el máximo clique es mucho mayor que el esperado. No se encuentra el origen de la referencia..

Tabla 2. Resultados en grafos DIMACS (parte II)

Grafos	ω	LDR		PBH		LBS1			LBS2			LBS3		
		ω	Time	ω	Time	μ	σ^2	μ_T	μ	σ^2	μ_T	μ	σ^2	μ_T
MANN_a9	16	16	0.00	16	0.1	16.00	0.00	0.00	16.00	0.00	0.00	16.00	0.00	0.00
MANN_a27	126	125	2.18	125	699.7	123.22	0.23	0.18	12.78	0.43	0.05	123.42	0.34	0.28
MANN_a45	345	340	43.72	342	-	336.88	0.38	4.15	335.88	1.68	1.16	336.97	0.44	5.88
keller4	11	7	0.03	11	3.6	11.00	0.00	0.04	10.95	0.04	0.00	11.00	0.00	0.05
keller5	27	15	1.27	26	1093.5	26.64	0.23	4.47	22.88	0.60	0.15	26.80	0.16	7.43
keller6	≥ 59	31	45.54	-	-	53.97	0.60	782.19	45.11	1.11	8.09	54.46	0.72	1484.86
brock200_1	21	13	0.07	20	9.7	19.82	0.20	0.07	17.94	0.37	0.00	19.99	0.12	0.12
brock200_2	12	7	0.04	11	5.1	10.84	0.43	0.08	9.91	0.68	0.00	10.87	0.33	0.12
brock200_3	15	10	0.6	14	6.4	13.75	0.38	0.08	12.45	0.42	0.00	13.83	0.40	0.12
brock200_4	17	11	0.06	16	7.3	15.62	0.33	0.08	14.02	0.29	0.00	15.87	0.35	0.13
brock400_1	27	17	0.37	24	111.6	23.66	0.38	0.63	20.66	0.38	0.03	24.00	0.38	1.17
brock400_2	29	17	0.37	24	113.3	23.70	0.29	0.62	20.87	0.39	0.03	24.01	0.46	1.11
brock400_3	31	17	0.37	24	111.2	23.76	1.82	0.63	20.67	0.36	0.03	24.12	1.82	1.11
brock400_4	33	16	0.35	24	112.7	24.66	6.62	0.60	20.79	0.44	0.03	25.02	6.53	1.11
brock800_1	23	13	0.18	21	858.6	20.10	0.11	6.73	17.49	0.26	0.16	20.19	0.15	10.16
brock800_2	24	13	1.19	20	866.4	20.08	0.07	6.71	17.61	0.37	0.16	20.16	0.13	9.79
brock800_3	25	15	1.34	20	864.5	20.13	0.13	6.73	17.57	0.28	0.16	20.23	0.27	9.88
brock800_4	26	16	1.40	20	862.4	20.07	0.10	6.72	17.47	0.32	0.16	20.19	0.21	10.22
san200_0.7_1	30	16	0.09	30	9.9	27.01	11.40	0.07	20.73	17.99	0.00	27.68	10.67	0.12
san200_0.7_2	18	12	0.08	17	8.2	15.72	1.30	0.06	14.22	0.21	0.00	15.94	1.81	0.10
san200_0.9_1	70	38	0.19	70	28.8	59.12	13.86	0.04	54.30	22.63	0.01	65.36	5.15	0.13
san200_0.9_2	60	30	0.16	60	22.8	50.29	7.92	0.04	41.71	10.96	0.00	57.47	2.84	0.14
san200_0.9_3	44	25	0.13	44	19.0	35.84	1.63	0.04	32.32	0.47	0.00	42.01	5.04	0.17
san400_0.5_1	13	7	0.20	13	52.3	10.14	3.46	0.53	8.31	0.25	0.02	10.37	4.15	0.67
san400_0.7_1	40	20	0.43	40	142.0	28.36	52.41	0.58	22.48	2.02	0.03	30.34	55.86	0.85
san400_0.7_2	30	15	0.35	30	110.7	20.30	17.15	0.60	17.89	0.39	0.03	20.87	21.73	0.82
san400_0.7_3	22	14	0.31	17	93.8	17.93	2.70	0.62	15.62	0.25	0.03	18.92	3.91	1.16
san400_0.9_1	100	45	0.88	100	397.8	84.46	35.04	0.40	58.59	59.12	0.04	95.37	8.15	1.24
sanr200_0.7	18	12	0.07	18	8.2	17.44	0.24	0.07	15.62	0.41	0.00	17.62	0.23	0.12
sanr200_0.9	42	32	0.16	41	21.4	38.48	0.78	0.04	35.15	1.06	0.00	40.18	0.90	0.13
sanr400_0.5	13	10	0.25	13	59.5	12.47	0.24	0.76	11.20	0.18	0.03	12.59	0.24	1.04
sanr400_0.7	≥ 21	16	0.36	20	101.9	20.38	0.23	0.65	18.08	0.33	0.03	20.55	0.24	1.10
san1000	15	8	1.34	15	1185.0	10.01	0.72	9.33	9.81	0.45	0.23	9.92	0.31	9.69

En sentido general los tiempos de ejecución y el valor de máximo clique de LBS1, LBS2 y LBS3 respecto a LDR y PBH son mejores. Se aprecia el caso del grafo keller6 en el cual para

PBH no se reportan datos debido al prolongado tiempo de ejecución y el máximo clique encontrado por LDR (31) en 45.54 segundos es inferior al encontrado por LBS1, LBS2 y LBS3; para este caso es significativo que en promedio LBS2 demoró 8.09 segundos **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Grafos aleatorios

El algoritmo presentado ha sido extensamente probado en grafos aleatorios. Un grafo aleatorio es un grafo de n vértices donde la probabilidad de existencia de una arista entre cada par de nodos es p . p es la densidad de aristas en el grafo. Si el número de vértices es fijado entonces la densidad de aristas puede ser interpretada como una medida de la dificultad del problema MWC, según aumenta p la dificultad aumenta **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

El número de vértices y la densidad de aristas han sido variados en las pruebas para medir el comportamiento del algoritmo. Los pesos de los nodos son valores enteros generados aleatoriamente en el intervalo [32, 45]. La Tabla 3 muestra los resultados obtenidos. El valor de máximo clique ponderado para cada grafo generado fue obtenido mediante un algoritmo exacto, por lo tanto el valor de la columna ω es óptimo.

Tabla 3. Resultados en grafos aleatorios

Vértices	p	ω	LBS1			LBS2			LBS3		
			μ	σ^2	μ_r	μ	σ^2	μ_r	μ	σ^2	μ_r
50	0.1	22	22.00	0.00	0.00	21.68	0.34	0.00	22.00	0.00	0.00
50	0.2	29	28.73	0.74	0.00	27.62	2.52	0.00	28.79	0.59	0.00
50	0.3	39	38.83	0.98	0.00	36.95	11.31	0.00	38.78	1.43	0.00
50	0.4	44	44.00	0.00	0.00	43.05	3.15	0.00	44.00	0.00	0.00
50	0.5	51	50.28	0.60	0.00	48.62	3.70	0.00	50.44	0.51	0.00
50	0.6	53	52.80	0.34	0.00	51.75	3.15	0.00	52.98	0.02	0.00
50	0.7	79	76.60	3.38	0.00	73.65	9.49	0.00	77.53	1.53	0.00
50	0.8	113	105.27	18.50	0.00	101.17	30.42	0.00	109.79	11.57	0.00
50	0.9	157	149.84	13.07	0.00	147.31	19.85	0.00	152.91	9.40	0.00
100	0.1	28	28.00	0.00	0.01	27.61	0.56	0.00	28.00	0.00	0.01
100	0.2	36	35.24	2.46	0.01	33.92	5.11	0.00	34.88	3.23	0.01
100	0.3	48	47.82	0.33	0.01	45.40	7.60	0.00	47.82	0.33	0.01
100	0.4	55	54.10	2.91	0.01	49.48	5.41	0.00	54.79	0.85	0.02
100	0.5	71	68.11	9.56	0.01	60.47	16.97	0.00	69.92	4.59	0.02
100	0.6	80	78.69	2.91	0.01	72.37	10.11	0.00	79.36	1.69	0.02
100	0.7	91	86.23	6.72	0.01	79.75	19.91	0.00	87.86	3.44	0.02
100	0.8	126	119.33	9.18	0.01	110.15	24.41	0.00	121.69	7.75	0.02
200	0.1	36	36.00	0.00	0.06	34.83	3.32	0.00	35.99	0.01	0.07
200	0.2	47	46.98	0.02	0.07	43.45	9.21	0.01	47.00	0.00	0.09
200	0.3	55	54.97	0.09	0.08	49.98	7.94	0.01	54.97	0.09	0.10
200	0.4	64	63.23	0.84	0.09	56.33	10.46	0.01	63.46	0.73	0.13
200	0.5	82	80.18	5.31	0.09	70.40	18.00	0.01	81.02	3.32	0.15
200	0.6	95	91.12	5.83	0.08	81.74	12.33	0.01	92.60	2.88	0.16
500	0.1	38	38.00	0.00	1.00	37.40	0.50	0.04	38.00	0.00	1.04
500	0.2	51	50.94	0.06	1.22	48.75	2.89	0.05	50.96	0.04	1.45
500	0.3	62	61.67	0.62	1.61	56.24	6.64	0.05	61.78	0.41	2.03
500	0.4	80	77.49	2.79	1.52	68.41	11.94	0.06	77.97	2.75	2.56

500	0.5	103	93.11	9.26	1.58	81.13	12.01	0.06	93.96	13.20	2.82
1000	0.1	47	47.00	0.00	9.00	44.04	5.46	0.25	47.00	0.00	9.89
1000	0.2	61	59.20	3.06	11.02	53.27	7.12	0.25	58.88	3.47	14.92
1000	0.3	78	73.11	11.56	13.04	62.43	11.71	0.27	73.50	8.37	20.59
1000	0.4	92	86.10	3.39	14.31	76.02	7.20	0.29	86.63	2.75	23.70

En la Tabla 3 se puede apreciar que solamente existen cuatro entradas donde LBS1 supera en la media de máximo clique ponderado a LBS3. En los datos presentados el algoritmo LBS3 tiene su valor de media más alejado del óptimo para el grafo aleatorio de 500 vértices y densidad de aristas 0.5, donde la diferencia con respecto al óptimo es de 9.04. La media de tiempo de ejecución de LBS2 nunca supera un segundo y en todos los casos es menor o igual que la media de tiempo de LBS1 y LBS3. Para LBS2 la media de máximo clique ponderado no supera las medias de LBS1 y LBS3.

Como puede observarse por los resultados numéricos obtenidos, el algoritmo propuesto en las 3 variantes ensayadas brinda mejores resultados en la mayoría de los experimentos realizados que los disponibles en la bibliografía especializada.

Conclusiones

- La síntesis de los sistemas de ingeniería presupone la generación de opciones de solución a los elementos del nivel inferior y la selección de combinaciones entre ellas de aquellas combinaciones que mejor satisfacen los intereses de todo el sistema. En la generación y en la selección de opciones se utiliza todo el arsenal de métodos de la programación matemática y de los métodos heurísticos, incluidos los métodos de Selección de Propuestas y de Integración de Variables, desarrollados por el autor para la solución del problema de la síntesis de sistemas.
- Los métodos de Selección de Propuestas y de Integración de Variables resultan de utilidad en la solución de problemas de muy alta complejidad, como los presentados en las aplicaciones mostradas en el capítulo: Diseño de redes de climatización, generación de tecnologías de maquinado, diseño de redes de hidráulicas, distribución y corte óptimos de piezas de configuración irregular.

Conclusiones generales

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

- Los resultados obtenidos en el campo de la teoría de sistemas permiten enfocar adecuada y racionalmente los problemas de análisis y síntesis de sistemas, con la aplicación de procedimientos efectivos de descomposición de las tareas de toma de decisiones en subtareas vinculadas y la conciliación de decisiones obtenidas entre las subtareas..
- La estructura más racional del sistema de toma de decisiones de un objeto complejo depende de la estructura del modelo matemático que lo describe.
- La aplicación realizada de la metodología de análisis y síntesis de sistemas de ingeniería para la preparación y toma de decisiones bajo criterios múltiples propuesta en la realización de un número importante de investigaciones prácticas, propias de varias ingenierías, permiten esperar su aplicabilidad a un conjunto muy amplio de otras tareas de ingeniería.
- Los procesos de toma de decisiones en sistemas de gran complejidad pueden, al menos en un número importante de casos, ser separados en procesos de generación de opciones de las subtareas componentes y de selección de opciones entre las subtareas de la tarea original. En la solución de las tareas de selección de opciones pueden ser utilizados, en dependencia de las particularidades de cada caso concreto, alguno de los algoritmos estudiados del método de Integración de Variables u otro método entre los disponibles en la bibliografía.
- A partir del concepto del método de Integración de Variables se abre una vía para el desarrollo de una familia de nuevas heurísticas que puede permitir enfrentar un gran número de aplicaciones asociadas a tareas de optimización no lineales y discretas en la ciencia y las ingenierías.
- El método de Integración de Variables y, particularmente, los algoritmos de búsqueda por Localización Aleatoria del Extremo de una Función de un Código Variable (BLAF) y por Exploración Aleatoria del Extremo de una Función de un Código Variable (BEAF) pueden ser considerados como nuevas herramientas añadidas al arsenal de métodos de optimización disponibles. La simplicidad algorítmica y los resultados numéricos obtenidos

muestran que los algoritmos desarrollados pueden competir con éxito con otras heurísticas, incluyendo los Algoritmos Genéticos.

Recomendaciones

El desarrollo ulterior del análisis y la síntesis de sistemas de ingeniería requiere del desarrollo de nuevas investigaciones básicas y de aplicación, entre las que se pueden mencionar:

1. El desarrollo ulterior de la teoría de sistemas, incluyendo la debida fundamentación de los actuales postulados de las teorías de la complejidad, las que deben concretizarse cada vez mas y evolucionar desde su actual carácter de filosofía al requerido de ciencia de los sistemas.
2. La continuación del desarrollo de las ciencias vinculadas a los sistemas, de forma de contribuir cada vez con mayor eficacia a la construcción de las pirámides de sistemas de preparación y toma de decisiones que permitan enfrentar con éxito las tareas mas importantes propias del diseño, la fabricación, la operación de procesos, la logística, la confiabilidad y el control en las diferentes áreas de la Ingeniería.
3. La integración de los logros en el área de los conjuntos difusos, las clasificación de objetos (clustering), y otras áreas modernas del conocimiento vinculadas a los sistemas, a la metodología de análisis y síntesis de sistemas.
4. Los métodos de modelación, simulación, representación gráfica y optimización y su automatización de forma de incrementar la eficacia de utilización de estas herramientas en la preparación y toma de decisiones.
5. Las investigaciones adicionales básicas y de aplicación requeridas para la elaboración de sistemas que integren cada vez mas los diferentes tópicos de temas, los temas de las disciplinas y las disciplinas de las áreas de ingeniería. Estos sistemas deben de integrar cada vez mas las difentes esferas de actuación de las ingenierías: el diseño, la fabricación, la operación de procesos, la logística, la confiabilidad y el control entre sí y con las ciencias sociales, económicas, humanidades, etcétera.

Bibliografía

1. ABDELWAHED S, N.KANDASAMY (2006): "A Control-Based Approach to Autonomic Performance Management in Computing Systems". In Autonomic Computing – Concepts, Infrastructure, and Applications, Wiley.
2. ABELN, O. y D. KRAUSE (1995): "The References Models for CAD Systems—on the way to a new architecture". Proceedings of ICED'95. Edition Heurista. Zurich, Suiza
3. ABRAHAMSSON, P. O. SALO, J. RONKAINEN, J. WARSTA (2002): "Agile software development methods". Review and analysis. VTT Publications.
4. ADAMOWICZ, M., ALBANO, A. (1976): "Nesting two-dimensional shapes in rectangular modules". Computer-Aided Design, Volume 8, Issue 1. 27-33
5. ÁLVAREZ, V. (2011): Determinación de las características técnicas básicas para el diseño de conjuntos tractivos del transporte de la cosecha cañera. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Holguín
6. Álvarez-Sánchez, V y .J. Arzola-Ruiz (2009): "Determinación de la configuración geométrica óptima de la zona de carga de un remolque cañero", Ingeniería Mecánica. Vol. 12. No.3, pp. 39-44.
7. ARAI T., E. PAGELLO, AND L. PARKER (2002): "Special issue on advances in multirobot systems". IEEE Tr. on Rob. and Autom., vol. 18, no. 5, pp. 655–864.
8. R. ARKIN AND T. BALCH (1998): "Cooperative multiagent robotic systems". Eds. Cambridge, MA: MIT/AAAI Press.
9. ART, R.C. (1966): "An approach to the two dimensional irregular cutting stock problem". IBM Cambridge Scientific Centre, Report 36-Y08.
10. Arzola-Ruiz, J. (1989): Selección de Propuestas. Ed. Científico Técnica, La Habana.
11. ARZOLA-RUIZ, J. (2000): Sistemas de ingeniería. Ed. Félix Varela, La Habana.
12. ARZOLA-RUIZ, J. (2009): Análisis y Síntesis de Sistemas de ingeniería. Disponible en <http://www.bibliomaster.com/>.
13. ARZOLA-RUIZ, J. (1979): "Optimización de gráficos de mantenimiento". Rev. Investigación Operacional, No. 26, La Habana.
14. ARZOLA-RUIZ, (1975): "Optimización heurística de gráficos calendarios de trabajo de Hornos Martín". Investigación Operacional (3), La Habana.
15. ARZOLA-RUIZ, J. (1973): "Automatización de los procesos de toma de decisiones". Revista Tecnológica (3). La Habana.
16. ARZOLA-RUIZ, J. y L. Suárez-García (1993): "Reglas de Conducta en la proyección y conducción de procesos de calentamiento del acero". Rev. Argus, Saltillo (México).
17. ARZOLA-RUIZ, J.. (2003): "La tarea de Selección de Propuestas bajo Criterios Múltiples. Métodos de Solución". Revista de Matemática, Vol. XI, N1, San José de Costa Rica.
18. ARZOLA-RUIZ, J. R. E. SIMEÓN-MONET Y A. MACEO (2003): "El Método de Integración de Variables: una generalización de los Algoritmos Genéticos". Proceeding of the Intensive Workshop: Optimal Design of Materials and Structures, París, Francia.
19. ARZOLA-RUIZ, J. (1980): "Circuitos cerrados de TV como un componente del Sistema Automatizado de Dirección en un Empresa Metalúrgica". Control, Cibernética y Automatización (3), La Habana.
20. ARZOLA-RUIZ, J. R. Simeón-Monet (2002): "Análisis y síntesis de sistemas de ingeniería para la preparación y toma de decisiones bajo criterios múltiples", Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones Vol. 9, N 1, pp. 67–91
21. Arzola-Ruiz, J. y R. E. SÍMEÓN-MONET (2002): "Aplicación de los algoritmos genéticos al diseño óptimo multiobjetivo de troqueles de corte y punzonado simples y progresivos", Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, Vol. 22, N° 2, pp, 11 -17.
22. ARZOLA-RUIZ, J. R. SIMEÓN-MONET, R SANTANA-MILIÁN (2001): "Evaluación de indicadores subjetivos durante el diseño optimo con objetivos múltiples de herramientas para la conformación de metales", Ingeniería Mecánica, N1, pps. 31 – 40, La Habana.
23. ARZOLA-RUIZ J., A. FIOL-ZULUETA (2002): "Aplicación del método de selección de propuestas a la descomposición de tareas discretas de optimización de gran complejidad". Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones, Costa Rica, V. 9, N 2, pp 59–74.

24. ARZOLA-RUIZ, J., R. SIMEÓN-MONET, A. FIOL-ZULUETA (2001): "Sistemas para la preparación y toma de decisiones en la Ingeniería", Ingeniería Mecánica, N1 pp. 51 - 66
25. AHMAD, N.. (2001): "Current Trend in Computer Aided Process Planning". Proceedings of the 7th Annual Paper Meet and 2nd Intern. Conf. Bangladesh. Mech. Eng. Division 25-27, Paper No. 10, pp. 81-92.
26. ASHBY, W. R. (1956): "An introduction to cybernetics". London: Chapman and Hall.
27. ASHBY, W. R. (1960): "Design of brain". London: Chapman & Hall.
28. ASHBY, W. R. (1962): 1998 "Principles of self-organization" (H. von Foerster, C. S. Zopf, eds.), New York, Pergamon Press.
29. ASCHER, U. M. AND L. R. PETZOLD (2001): "Computer Methods for Ordinary Differential Equations and Differential-Algebraic Equations". Philadelphia, Pennsylvania: SIAM,
30. 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.
31. BABEL, L. (1993): "A Fast Algorithm for the Maximum Weight Clique Problem". Computing, 52, 31-38.
32. BABEL, L. (1991): "Finding Maximum Cliques in Arbitrary and in Special Graphs". Computing, 46, 321-341.
33. BACIU, G. AND H. K. KESAVAN (1997): "From Particle-Mass to Multibody Systems: Graph-Theoretic Modeling," IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics, vol. 27, pp. 244-250.
34. BAK, P. Y K. CHEN, (1991): "Criticalidad autoorganizada". Investigación y Ciencia, 174 (marzo), 18-25.
35. BANA, C. A. Y E. COSTA (1990): "Readings in Multiple Criteria Decision Aid". Springer Verlag, Berlin-Heidelberg.
36. BENNETT, J. G. (1998): "Creative thinking". Santa Fé, NM: Bennett Books.
37. BERMAN, P. Y PELC, A. (1990): "Distributed fault diagnosis for multiprocesors systems". 20th Annual Int. Symp. on Fault-Tolerant Computing, 340-346.
38. BHAT V, M. PARASHAR, N. KANDASAMY (2006): Autonomic Data Streaming for High-Performance Scientific Applications, in Autonomic Computing – Concepts, Infrastructure, and Applications
39. BIN, W. (1994): "CAD Interaction with CAPP". Manufacturing Systems Design and Analysis. Ed. Chapman & Hall, Brunel University, Uxbridge, UK,.
40. BLANCHARD, B. S. (1995): Ingeniería de sistemas. Ed. Isdefe, Madrid.
41. BLACK, J.T. (1991): The Design of the factory whith a Future". McGraw-Hill International Editions. University of Illinois, USA.
42. BLANCO A. ET AL. (1998): Matmática Numérica, Ed. Félix Valera, La Habana
43. BOLTZMAN, L. (1909): Wissenschaftliche abhandlungen von Ludwig Boltzman. (Compilación de Fritz HAVENOHRL, 3 vols.), Leipzig: Barth.
44. BOMZE, I., BUDINICH, M., PARDALOS, P. M. Y PELILLO, M. (1999): "The Maximum Clique Problem". Handbook of combinatorial optimization, 4, 1-74.
45. BOMZE, I. R., PELILLO, M. Y STIX, V. (2000): "Approximating the maximum weight clique using replicator dynamics". Neural Networks, IEEE Transactions on, 11, 1228-1241.
46. BRANIN, F. H. (1966): "The Algebraic-Topological Basis for Network Analogies and the Vector Calculus," Symposium on Generalized Networks, Brooklyn, New York, pp. 453-491.
47. BREUNSE, A. P. AND J. F. BROENINK (1997): "Modeling Mechatronic Systems Using the SIDOPS+ Language," ICBGM '97, Phoenix, AZ, pp. 301-306.
48. BRIGGS, J. PEAT Y F. DAVID (1994): "Espejo y reflejo: Del caos al orden". Barcelona: Gedisa (2ª ed.).
49. BRIGGS, J. PEAT Y F. DAVID (1999): *Las siete leyes del caos*. Barcelona: Grijalbo
50. BRILLOUIN, L. (1951): "Maxwell's demon cannot operate: Information and entropy". Journal of Applied Physics, 22, 334-357.
51. CAO Y., A. FUKUNAGA, AND A. KAHNG (1997): "Cooperative mobile robotics: Antecedents and directions," Autonomous Robots, vol. 4, pp. 1-23, 1997.
52. CAPRA, F. (1996): "La trama de la vida". Barcelona: Anagrama, 1998.
53. CARRASCO J. B. (1998): Análisis de sistemas, ISBN 956-7604-04-5, www.evolucion.cl
54. CASALS, B. Y J. ARZOLA (1997): "Uso de la explosión en la producción de materiales". Proceedings de la II Conferencia Internacional de Metalurgia y Tecnología de Materiales, Sao Paolo.
55. 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.

56. CHAKRABARTY, S. Y COL. (1995): A Structure-Oriented Approach to Assembly Sequence Planning. Department of Computer Sciences, Texas A&M University.
57. CHUNG, C. (2004): Simulation modeling handbook: a practical approach, CRC PRESS
58. 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.
59. CORDOVÉS A., J. ARZOLA, J. HECHAVARRÍA, M. FERNÁNDEZ (1999): "Diseño óptimo multiobjetivo y planificación del proceso de fabricación (CAD/CAPP) de redes de conductos de climatización", Ingeniería Mecánica, V 2, N1, pp. 63-70.
60. COSTA, M. T., A. M GOMES AND J. OLIVEIRA (2009): "Heuristic approaches to large-scale periodic packing of irregular shapes on a rectangular sheet". European Journal of Operational Research, Volume 192, Issue 1, P. 29-40.
61. CUI, Y. (2009): "Simplest optimal cutting patterns for equal rectangles". Operations Research Letters, Volume 34, Issue 6, P. 630-638.
62. CUI, Y. (2007): "An exact algorithm for generating homogenous T-shape cutting patterns". Computers & Operations Research, Volume 34, Issue 4. 1107-1120.
63. CUI, Y. (2007): "Simple block patterns for the two-dimensional cutting problem". Mathematical and Computer Modelling, Volume 45, Issues 7-8. 943-953.
64. CUI, Y. (2007): "Exact algorithm for generating two-segment cutting patterns of punched strips". Applied Mathematical Modelling, Volume 31, Issue 9. 1865-1873.
65. CUI, Y. (2008) "Heuristic and exact algorithms for generating homogenous constrained three-staged cutting patterns". Computers & Operations Research, Volume 35, Issue 1. 212-225.
66. CUI, Y., AND Y. YANG (2010): "A heuristic for the one-dimensional cutting stock problem with usable left-over". European Journal of Operational Research, Volume 204, Issue 2. 245-250, Julio.
67. CUI, Y., T. GU, AND W. HU (2009): "A cutting and inventory control problem in the manufacturing industry of stainless steel wares". Omega, Volume 37, Issue 4. 864-875.
68. CUI, Y., Y. YANG, X. CHENG AND P. SONG. (2008): "A recursive branch-and-bound algorithm for the rectangular guillotine strip packing problem". Computers & Operations Research, Volume 35, Issue 4, pp. 1281-1291.
69. Cui, Y., F. Chen, R. Liu, Y. Liu, and X. Yan, (2010): "A simple algorithm for generating optimal equal circle cutting patterns with minimum sections". Advances in Engineering Software, Volume 41, Issue 2, P. 401-403.
70. CUI, Y. AND Y.LU (2009) "Heuristic algorithm for a cutting stock problem in the steel bridge construction". Computers & Operations Research, Volume 36, Issue 2. 612-622
71. CUI, Y. AND D.Y. XU (2010): "Strips minimization in two-dimensional cutting stock of circular items". Computers & Operations Research, Volume 37, Issue 4. 621-629.
72. CUI, Y. AND X.ZHANG (2007): "Two-stage general block patterns for the two-dimensional cutting problem". Computers & Operations Research, Volume 34, Issue 10, P. 2882-2893.
73. CUI, Y., D. HE AND X. SONG (2006): "Generating optimal two-section cutting patterns for rectangular blanks". Computers & Operations Research, Volume 33, Issue 6. 1505-1520.
74. Dantzig, G. B. (1963): "Linear Programming and Extensions, Princeton University Press, Princeton, New Jersey.
75. Daou, K.; Wang R. Z, Xia Z. Z.: "Renewable desiccant cooling air conditioning": a review. Renewable and Sustainable Energy Reviews XX, 1-23, 2004.
76. Dehumidification for all requirements. <http://www.muntersamerica.com> 2002.
77. DIAS, L. C. AND J. CLIMACO, (2002): "Exploring the consequences of imprecise information in choice problems using ELECTRE". In Bouyssou, D., Jacquet-Lagrèze, ´ E., Perny, P., Słowiński, R., Vanderpooten, D., and Vincke, P., editors, Aiding decisions with multiple criteria, pages 379–403. Kluwer Academic Publishers.
78. DÍAZ, A. Y COL. (1996): Optimización heurística y redes neuronales. Ed. Paraninfo, Madrid.
79. DÍAZ-HERNÁNDEZ Y., A. FIOL-ZULUETA, J. ARZOLA-RUIZ (2013): "Simulación del vaciado continuo de perfiles de aceros al carbono de baja aleación", Ingeniería Mecánica. Vol. 16. No. 1, pp. 22-34,

80. DÍAZ-HERNÁNDEZ Y., A. FIOL-ZULUETA, J. ARZOLA-RUIZ (2014): Modelado del sistema de enfriamiento primario en máquinas de colada de acero con cristalizador curvo", Ingeniería Mecánica. Vol. 17. No. 1, enero-abril, pp. 90-97.
81. DIEGOLI S. (2003): El comportamiento de los grupos pequeños de trabajo bajo la perspectiva de la complejidad: Modelos descriptivos y estudio de casos. Tesis de Doctorado, Universitat de Barcelona, Barcelona.
82. DORIGO M. AND T.STUTZLE (2004): Ant Colony optimization. The MIT Press.
83. DUFFIN, R.J., E.L. PETERSON AND C. ZENER (1967): Geometric Programming, Theory and Applications, Ed. John Wiley, New York.
84. DURFEE, W. K., M. B. WALL, D. ROWELL AND ABBOTT, F. K. (1991) "Interactive Software for Dynamic System Modeling Using Linear Graphs" IEEE Control Systems, vol. 11, pp. 60-66.
85. EGEHLAD, J., B. K. NIELSEN AND A. ODGAARD (2006): "Fast neighborhood search for two- and three-dimensional nesting problems". European Journal of Operational Research. In Press.
86. EGEHLAD, J. AND D. PISINGER (2009): "Heuristic approaches for the two- and three-dimensional knapsack packing problem". Computers & Operations Research, Volume 36, Issue 4. 1026-1049.
87. ELMQVIST, H., S. E. MATTSSON AND M. OTTER (1998): "Modelica: The New Object-Oriented Modeling Language," The 12th European Simulation Multiconference, Manchester, UK.
88. EDSTRÖM, K. (1999): "Simulation of Newton's Pendulum Using Switched Bond Graphs," 1999 Western MultiConference, San Francisco, California.
89. FARMANI, R., D. A. SAVIC AND G. A. WALTERS (2005): "Evolutionary multi-objective optimization in water distribution network design". Engineering Optimization. 37(2)167–183.
90. FERRIS, J. B. AND J. L. STEIN (1995): "Development of Proper Models of Hybrid Systems: "A Bond Graph Formulation", International Conference on Bond Graph Modeling and Simulation, Las Vegas, Nevada.
91. Fiol-Zulueta, A., J. Arzola-Ruiz, A. da Silva-Carvalho. (2009): "Modelo matemático y algoritmo de solución de un flujo con tiempos dependientes de la secuencia", Ingeniería Mecánica. Vol. 12. No.2, pag. 37-48.
92. FIOL-ZULUETA, A., J. ARZOLA-RUIZ, A. DA SILVA-CARVALHO A. (2010): "Evaluación del comportamiento de un algoritmo para la secuenciación en un taller de flujo con tiempos dependientes de la secuencia", Ingeniería Mecánica. Vol. 13. No.1, pp. 67-78.
93. FISHWICK, P. A. (1998): "A Taxonomy for Simulation Modeling Based on Programming Language Principles," IET Transactions, vol. 30, pp. 811-20.
94. FOERSTER, H. VON (1976): "An epistemology for living things". In K. Wilson (Ed.), Collected works of the biological computer laboratory. Peoria, IL: Illinois Blueprint.
95. GARDINER, L. R. AND R. E. STEUER (1994): "Unified interactive multiple objective programming", Eur. J. Opl. Research 74.
96. GE, T. S.; Y. LI, R. Z. WANG, Y. J. DAI. (2008): "A review of the mathematical models for predicting rotary desiccant wheels", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12 1485–1528.
97. GOMES, A. M. AND J. F. OLIVEIRA (2001): "A GRASP Approach to the Nesting Problem ", MIC-4th Metaheuristics International Conference. 47–52.
98. GOMES, A. M. AND J. F. OLIVEIRA, (2002): "A 2-exchange heuristic for nesting problems". European Journal of Operational Research 141. 359–370.
99. GONZÁLEZ, I., J. ARZOLA, S. MARRERO, A. LEGRÁ (2007): "Operación con criterios múltiples para la compensación de potencia reactiva en redes industriales de suministro eléctrico. Parte I". Energética Vol. XXVIII, No. 1.
100. GONZÁLEZ, I., J. ARZOLA, S. MARRERO, A. LEGRÁ (2007): "Operación con criterios múltiples para la compensación de potencia reactiva en redes industriales de suministro eléctrico. Parte II". Energética Vol. XXIX, No. 2.
101. GONZALEZ T (2007): "Handbook of Approximation Algorithms and Metaheuristics", Chapman & Hall/Crc Computer and Information Science Series.
102. GUAN, Q. Y COL. (2002): "A Concurrent Hierarchical Evolution Approach to Assembly Process Planning", Int. J. Prod. Res. pp. 3357–3374.
103. GUTIÉRREZ-PÉREZ J. A. ET AL, (2012): "Enfoque Multiagente para la Identificación de Elementos Vulnerables de una Red de Abastecimiento de Agua", Proceeding del VIII SELASI. ISBN 978-959-261-405-5, La Habana.

104. GRAMANI, M. C. N., P. M. FRANÇA, M. N. ARENALES (2009): "A Lagrangian relaxation approach to a coupled lot-sizing and cutting stock problem", International Journal of Production Economics, Volume 119, Issue 2. 219-227.
105. HAKEN, H. (1977): "Synergetics: Nonequilibrium phase transitions and self-organization in physics, chemistry and biology". New York, Springer.
106. HAKEN, H. (1983): "Laser theory". Berlín: Springer.
107. HAKEN, H. (1987): "Synergetics: An approach to self-organization". En F. Eugene Yates (Ed.), in Self-organizing Systems. New York: Plenum.
108. HAKEN, H. Y WUNDERLIN, A. (1990): "El caos determinista", Mundo Científico, V. 10 N 108, 1210-1217.
109. HASSELBERG, J., PARDALOS, P. M. Y VAIRAKTARAKIS, G. (1993): Test Case Generators and Computational Results for the Maximum Clique Problem. Disponible en <ftp://dimacs.rutgers.edu>
110. Hayles, N. K. (1990): "La evolución del caos: El orden dentro de desorden en las ciencias contemporáneas", Barcelona: Gedisa, 1993.
111. Hechavarría, H. J., J. Arzola y otros (2007): "Optimal, under Multiple Criteria, Design of Aqueduct Nets", III Seminario Latinoamericano de Sistemas de ingeniería III SELASI, Chile, Mayo.
112. Hechavarría-Hernández, J. R., J. Arzola-Ruiz, A. Cordovés-García, A. M. Lastre-Aleaga (2007): "Diseño óptimo de redes hidráulicas bajo criterios múltiples". Ingeniería Mecánica, N2, pp. 15-22.
113. Hechavarría-Hernández, J. R. J. Arzola-Ruiz, E. Escofet-Batista, L. Rodríguez-Gil (2007): "Generación automática de variantes de trayectorias aplicada al diseño óptimo bajo criterios múltiples de redes hidráulicas de abasto", Ingeniería Mecánica, N2, pp. 71 – 78.
114. Hechavarría, H. J. (2007): Manual de Usuario DP-GVT 1.0. Sistema automatizado de aplicación sobre AutoCAD para la generación de variantes de trayectorias cerradas, Holguín.
115. HECHAVARRÍA, H. J. (2007): Manual de Usuario DP-ORH 1.0. Sistema automatizado de aplicación sobre AutoCAD para el diseño óptimo bajo criterios múltiples de redes hidráulicas cerradas, Holguín.
116. HU, D. Y COL. (2002): "Mechanical Product Disassembly Sequence and Path Planning Based on Knowledge and Geometric Reasoning", Intl. J. Adv. Manuf. Tech. 19, pp. 688-696.
117. HURTADO-ORTEGA, J. (2013): Optimización multiobjetivo de los parámetros que intervienen en los procesos de doblado de tubos cilíndricos metálicos por el método de arrastre. Tesis en opción al grado científico de Dr. en Ciencias Técnicas, Holguín.
118. HURTADO-ORTEGA, J., R. SANTANA-MILÁN, J. ARZOLA-RUIZ (2013): "Análisis y síntesis de la planeación del proceso de doblado de tubos por arrastre", Revista Ciencia e Ingeniería. Vol. 34, No. 1, pp. 3-12
119. HUANG, K.; H. S. Ismail and K. B. Hon (1996): "Automated design of progressive dies", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Journal of Engineering Manufacture, v 210 N B4.
120. Hu-yao, L. and H. Yuan-jun (2006): "Algorithm for 2D irregular-shaped nesting problem based on the NFP algorithm and lowest-gravity-center principle", Journal of Zhejiang University SCIENCE A. ISSN 1009-3095.
121. Jachaturov, V. (1989): Métodos matemáticos de la programación regional (en ruso), Ed. Nauka, Moscú.
122. Jakobs, S. (1996): "On genetic algorithms for the nesting of polygons". European Journal of Operational Research. 88(1).165-181.
123. Jwata, K. (1986): "Knowledge based computer aided process planning in intelligent manufacturing systems", Ed. V. R. Milacic, Amsterdam.
124. KARAINOVA, J. N., S. C. NARULA AND V. VASSILEV (1993): "An interactive procedure for multi-objective integer programming". *Eur. J. Opl. Research* 68.
125. Karris S. T. (2006): Introduction to Simulink with Engineering Applications, Orchard Publications.
126. Kossiakoff A. et al. (2011): Systems Engineering, Principles and Practice, Wiley.
127. Kauffman, S. A. (1992): "Anticaos y adaptación", Investigación y Ciencia, pp. 46-53.
128. Kauffman, S. A. (1993): "The origins of order: Self-organization and selection in evolution", New York: Oxford University Press.
129. Kauffman, S. A. (1995): "At home in the universe: The search for laws of self-organization and complexity", New York: Oxford University Press.
130. Kaufmann, S. A. y J. Gil Aluja (1990): Las matemáticas del azar y de la incertidumbre, Madrid: Editorial Centro de Estudios Ramon Arces.
131. Keeney, R. L. and H. Raiffa (1976): Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoff, Willey, New York.

132. Korhonen, P. and R. E. Steuer (1993): An Heuristic For Estimating Nadir Criterion Values in Multiple Objective Linear Programming, Graduate Programs in Management Science, University of Georgia. Athens, Georgia.
133. KUHN, T. (1970): The Structure of Scientific Revolution, University of Chicago Press, Chicago.
134. LAKOFF, G. (1987): Women, Fire, and Dangerous Things: What Categories Reveal about the Mind, University of Chicago Press, Chicago.
135. LANDAUER, R AND CH.BENNETT (1985): The fundamental physical limits of computation, Scientific American, 253(1), 48-56.
136. LASTRES-ALEAGA A. M., A. CORDOVÉS-GARCÍA, J. ARZOLA-RUIZ (2010): "Distribución y corte de piezas irregulares con anidamiento bidimensional en la industria minera", Minería y Geología, v.26, N.3, pp. 48-67.
137. LASTRES A. M., A. CORDOVÉS-GARCÍA, J. ARZOLA-RUIZ (2010): "Optimización de la distribución y corte de piezas irregulares en chapas para la industria minera", Minería y Geología, V.26, N.3, pp. 68-80
138. LEE, D. H. ET. AL. (2001): "Disassembly Sheduling for Products with Assembly Structure: Integer Programming Approach", SFIT, Suiza.
139. LEÓN T. V. VIERN AND E.VERCHER (2002): "Two Fuzzy Approaches for Solving Multiobjective Decision Problems", Computational Economics, 19,Kluwer Academic Publishers, pp. 273–286.
140. LEWANDOWSKI, A. AND A. P. WIERZBICKI (1989): "Aspiration Based Decision Support Systems", Springer-Verlag, Berlin.
141. LIANG-HSUAN CH. AND CHAN-CHING H. A (2007): "Mathematical Programming Method for Formulating a Fuzzy Regression Model Based on Distance Criterion", IEEE transactions on systems, man, and cybernetics — part b: Cybernetics, vol. 37, no. 3, pag. 705.
142. LORENZ, EDWARD N. (1993): "La esencia del caos". Madrid: Debate, 1995.
143. LOVELOCK, JAMES (1979): Gaia, New York: Oxford University Press.
144. LOURENÇO, H. R., O. MARTIN AND STÜTZLE, T. (2002): "Adaptive search heuristics for the generalized assignment problem", Mathware and Soft Computing, 9 (2-3), 209 – 213.
145. LUHMANN, N. (1990): Essays on self-reference, New York: Columbia University Press.
146. LUHMANN, N. (1995): Introducción a la teoría de sistemas,Mexico, DF: Universidad Iberoamericana.
147. MACEDO, R., ALVES, C., VALÉRIO DE CARVALHO, J. M. (2010): "Arc-flow model for the two-dimensional guillotine cutting stock problem", Computers & Operations Research, Volume 37, Issue 6. 991-1001.
148. MACKI, J. AND A. STRAUSS (1982): Introduction to Optimal Control Theory. Springer, New York.
149. MARCHIORI, E. (1998):A Simple Heuristic Based Genetic Algorithm for the Maximum Clique Problem. Symposium on Applied Computing: Proceedings of the 1998 ACM symposium on Applied Computing, 27, 366-373.
150. MAIER, H. R., A. R., ET. AL. (2003): "Ant colony optimization for design of water distribution systems", Journal of Water Resources Planning and Management, 129(3), 2003: 200–209.
151. MALONE T, R. LAUBACHER AND C.DELLAROCAS (2009): "Harnessing crowds: Mapping the genome of collective intelligence", Working paper 2009-001, MIT Center for Collective Intelligence.
152. MAN, K. F.; K. S. TANG AND S. KWONG (1996): "Genetic Algorithms: Concepts and Applications", IEEETransactions on Industrial Electronics, 43 (5):519-533.
153. MANDELBROT, B. B. (1996): "Del azar benigno al azar salvaje", Investigación y Ciencia, 14-20.
154. MADUREIRA A., J. FERREIRA AND Z.VALE (2011): "Computational Intelligence for Engineering Systems", Springer.
155. MARGULIS, L. Y J. LOVELOCK (1974): "Biological modulation of the earth's atmosphere", Icarus, 21, pp. 471-489.
156. MARTIN, O., S. W. OTTO AND E. W.FELTEN (1991): "Large-step Markov Chains for the traveling salesman problem", Complex Systems, 5(3), 299-326.
157. MARTÍNEZ, J., J. LLAMOS, A. GARCÍA, T. ORTIZ (2001):"Rational Design Automation by Di-chromatic Graphs", Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers in Engineering Conference (Paper DETC2001/DAC-21050), Pittsburgh, USA.
158. MARTÍNEZ-VALDÉS O. (2011): "Optimización del revestimiento refractario para cazuelas metalúrgicas", Tesis en opción al título de máster en diseño y fabricación asistidos por computadoras (cad/cam), Holguín.

159. MARTÍNEZ-VALDÉS O. Y J. ARZOLA-RUIZ (2016): Selección óptima bajo criterios múltiples de materiales refractarios y aislantes para cazuelas metalúrgicas. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, V 32, N 4, pp 252–260.
160. MATURANA, H. R. (1981): Autopoiesis. En M. Zeleny (Ed.) *Autopoiesis: A theory of living organization*. New York: North Holland Publishers.
161. MATURANA, H. R. (1995): La realidad: ¿Objetiva o construida? I. Fundamentos biológicos de la realidad. Barcelona: Anthropos.
162. MATURANA, H. R. (1996): La realidad: ¿Objetiva o construida? II. Fundamentos biológicos del conocimiento. Barcelona: Anthropos.
163. MATURANA, H. R. Y F. VARELA (1980): Autopoiesis and cognition: The realization of the living. Boston: Reidel Publishing Company.
164. MASSARO, A., PELILLO, M. Y BOMZE, I.M. (2002): "A complementary pivoting approach to the maximum weight clique problem". *SIAM Journal on Optimization*, 12, 928-948.
165. MCPHEE, J. J. (1996): "On the Use of Linear Graph Theory in Multibody System Dynamics," *Nonlinear Dynamics*, vol. 9, pp. 73-90.
166. MERTINS, K. AND B. WIENEKE (1991): "State of the art in flexible manufacturing systems design", *Production Planning and Control*, vol. 2, Berlin, Alemania.
167. MESAROVIC, M. D.; D. MACKO, Y. TAKAHARA (1970): "Theory of hierarchical, multilevel systems", Academic Press, New York-London.
168. MEYER, J., AND W. SCOTT (1983): "Organizational Environments: Ritual and Rationality", Beverly Hills.
169. MICHALEWICZ, Z. AND M. SCHOENAUER (1996): "Evolutionary Algorithms for Constrained Parameter Optimization Problems", *Evolutionary Computation*, 4(1): 1-32.
170. MILNER, D. A. AND VASILIOU (1994): "The integration of CAD and CAM". *Computer-Aided Engineering for Manufacture*, Ed. Kogan Page Ltd, London, UK.
171. MITCHELL F. H. *CIM Systems* (1991): An introduction to Computer Integrated Manufacturing, Ed. Prentice Hall, New Jersey.
172. MITCHELL M. AND M. NEWMAN (2001): "Complex systems theory and evolution", publication of Santa Fe Institute, 1399 Hyde Park Road, Santa Fe, NM 87501.
173. MOREJÓN-VIZCAÍNO, G. Y J. ARZOLA-RUIZ (2005): Desarrollo de productos orientados a una capacidad tecnológica disponible, en el ejemplo de Hidromotores de alto par. *Memorias I SELASI*, pp. 67-80, Trujillo, Perú.
174. MORIN, EDGAR (1990): *Introducción al pensamiento complejo*, Barcelona: Gedisa, 1994.
175. MUEGGE, B. J. (1996): *Graph-Theoretic Modeling and Simulation of Planar Mechatronic Systems*, PhD Thesis, University of Waterloo, Systems Design Engineering, Waterloo.
176. MUNJIZA, A. (2004): *The combined finite-discrete element method*, John Wiley & Sons Inc. ISBN 0-470-84199-078b).
177. MUNNÉ, F. (1995): "Las teorías de la complejidad y sus implicaciones en las ciencias del comportamiento", *Revista Interamericana de Psicología*, 29(1), 1-12.
178. MUNNÉ, F. (1995): "Las teorías psicosociales y el análisis e intervención en las organizaciones", *Comportamento Organizacional e Gestão*, 1, 37-48.
179. MUNNÉ, FREDERIC (1995): *La interacción social: Teorías y ámbitos*, Barcelona: PPU.
180. NAVAS-MEDINA E. E., J. ARZOLA-RUIZ, L. GARCÍA-ESCALONA (2007): "Producción de aceros al carbono en hornos de arco eléctrico en condiciones de mineral de manganeso". *Ingeniería Mecánica*, N 3 (2007) pp. 23-31 23.
181. NAVAS-MEDINA E. E., J. ARZOLA-RUIZ, L. GARCÍA-ESCALONA (2008): "Análisis sistémico de la tarea de dosificación de hornadas en HAE en condiciones de utilización de mineral de manganeso". *Ingeniería Mecánica*, N 1, pp. 15 –24.
182. NAVARRO, J. C. (2001): *La organización como sistema dinámico complejo*, Tesis doctoral presentada a la Universidad de Barcelona, Fuente: <http://www.tdcat.cesca.es>
183. NEUMANN, JOHN VON (1980): *El ordenador y el cerebro*, Barcelona: Antoni Bosch.
184. NICOLIS, G. AND I. PRIGOGINE (1977): *Self-organization in nonequilibrium systems: From dissipative structures to order through fluctuations*, New York: Wiley-Interscience.
185. NICOLIS, G. Y I. PRIGOGINE (1994): *En el camino hacia una nueva comprensión de las ciencias*, Madrid: Alianza.

186. ROLLER, D. AND P. BRUNET (1997): CAD Systems Development. Tools and Methods, University of Stuttgart, Germany.
187. OGATA, K. (1990): Ingeniería de control moderna, Prentice Hall, México D.F.
188. ÖSTERGÅRD, P. (2002): "A fast algorithm for the maximum clique problema". Discrete Applied Mathematics, 120, 197-207.
189. PAYNTER, H. M. (1961): Analysis and Design of Engineering Systems, Cambridge, MA: MIT Press.
190. PHAM D. T. AND X.LIU (1999): Neural Networks for Identification, Prediction and Control, Springer-Verlag, London.
191. PHAM, D. T. ET AL (2001): Computational Intelligence for Manufacturing, Computational Intelligence in Manufacturing Handbook, Edited by Jun Wang et al, Boca Raton: CRC Press LLC.
192. PIKE, R.W. Y L. GUERRA: Optimización en ingeniería . Ed. Reverté, México, 1989.
193. PINDER M. (2014): Diseño de aislamiento térmico de hornos de cabina para el calentamiento de crudos. Tesis en opción al grado de MSc., El Tigre, Anzoátegui, Venezuela.
194. PINEDO, M. (2002) Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems, Prentice Hall.
195. PRIGOGINE, I. (1993): Las leyes del caos. Barcelona: Crítica.
196. PRIGOGINE, I. (1997): El fin de las certidumbres. Madrid: Taurus.
197. PRIGOGINE, I. AND P. M. ALLEN (1982): The Challenge of complexity. In WILLIAM C. SCHIEVE AND PETER M. ALLEN (Eds.), Self-organization and dissipative structures: Applications in the physical and social sciences. Austin, TE: University of Texas Press.
198. PROSSER P. (2012): "Exact Algorithms for Maximum Clique A Computational Study". Algorithms, 5, 545-587.
199. REEVES, C.R. (1993): Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems, Blackwell Scientific Pub, Oxford.
200. RÍOS, I.S. (1993): Investigación Operacional, 2. ed., Centros de Estudios Ramón Arces, Madrid.
201. ROCHA R. (2005): Building volumetric maps with cooperative mobile robots and useful information sharing: a distributed control approach based on entropy, Ph.D. Thesis, Facultad de Ingeniería de la Universidad de Porto.
202. ROSENBERG, R. C. and Karnopp, D. C. (1983): Introduction to Physical System Dynamics. New York: McGraw-Hill.
203. ROY, B. (1993): Méthodologie Multicritere a la Decision: Méthodes et. Cas, Economica, Paris.
204. RUDD, D. F. and Ch. C (1968). Watson. Strategy of Process Engineering. John Wiley, New York.
205. SAATY, T. L. (1978): "Exploring the interface between hierarchies, multiple objectives and fuzzy sets". Fuzzy Sets and Systems, N1, pp. 57-68.
206. SAATY, T.L. (2008): "Relative measurement and its generalization in decision making. Why pairwise comparisons are central in mathematics for the measurement of intangible factors. The analytic hierarchy/network process", Revista de la Real Academia de Ciencias Serie A: Matemáticas 102 (2), pg. 251-318.
207. SAKAWA, M. (1993): Fuzzy Sets and Interactive Multiobjective Optimization, Applied Information Technology, Plenum Press, New York.
208. SANTANA-MILÁN R., J. ARZOLA-RUIZ(1997): "Multiobjective optimization of forging dies processes for rotational symmetrical parts", 13th. ISPE / IEE International Conference on CAD/CAM, Robotics and Factories of the Future, Pereira, Colombia.
209. SEGERLIND H., Applied Finite Element Analysis, Wiley, 1984.
210. SESHU, S. and Reed, M. B., Linear Graphs and Electrical Networks. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley, 1961.
211. SMALE, S. (1980): "How I got started in dynamical systems." In The Mathematics of Time: Essays on Dynamical Systems, Economic Processes, and Related Topics. Smale, Yorke, Guckenheimer, Abraham, May, Feigenbaum, Springer-Verlag, p. 147-151, New York.
212. SHANNON, C. E. (1948): "A mathematical theory of communication". Bell Systems Technical Journal, 27, 379-423 y 623-656.
213. SHANNON, C. E. AND W. WEAVER (1949): The mathematical theory of communication. Urbana: University of Illinois Press.
214. SHAW, R. (1981): "Strange attractors, chaotic behavior, and information theory". Zeitschrift für Naturforschung, 36a, 79-112.

215. SINHA R., V.C. LIANG, C.J.J. PAREDIS, AND P.K. KHOSLA, (2001): "Modeling and Simulation Methods for Design of Engineering Systems," in Journal of Computing and Information Science in Engineering. Vol. 1, pp. 84-91.
216. SIMEÓN-MONET R. (1999): Diseño óptimo multiobjetivo de troqueles de corte y punzonado simples y progresivos. Tesis en opción al grado científico de Dr. en Ciencias Técnicas, Holguín.
217. SMITH, J. M. (1976): Mathematical Modelling and Digital Simulation to Engineers and Students, Ed. John Wiley, New York.
218. STEUER, R. E. (1986.): Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation and Applications. Wiley, New York.
219. SULIS W (1997): "Fundamental concepts of collective intelligence". Non linear Dynamics, Psychology, and Life Sciences, (1):35–53.
220. TRENT, H. M. (1955): "Isomorphisms between Oriented Linear Graphs and Lumped Physical Systems," The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 27, pp. 500-527.
221. THOM, R. (1986): Determinismo e innovación. En Jorge Wagensberg (Ed.), Proceso al azar. Barcelona: Tusquets.
222. TIJONOV A.N. Y A. A. SAMARSKY. (1983): Ecuaciones de la Física Matemática. Mir, Moscú,
223. Thrun S., D. Hahnel, D. Ferguson, M. Montermelo, R. Riebwel, W. Burgard, C. Baker, Z. Omohundro, S. Thayer, and W. Whittaker (2003): "A system for volumetric robotic mapping of underground mines," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA'2003):, pp. 4270–4275.
224. TRIENGO, M. J. L. AND BOS, A. M. (1985): "Modeling the Dynamics and Kinematics of Mechanical Systems with Multibond Graphs," Journal of the Franklin Institute, vol. 319, pp. 37-50.
225. TRIGO P, COELHO H (2008): Decisions with multiple simultaneous goals and uncertain causal effects. In Artificial Intelligence in Theory and Practice II, volume 276 of IFIP International.
226. TOLEDO H. (2014): Diseño óptimo de revestimiento para horno de reverbero de fusión de aluminio. Tesis presentada en opción al título de máster en diseño y fabricación asistidos por computadoras (cad/cam). C. Bolívar, Venezuela
227. TORANZO-LORCA G. J. ARZOLA-RUIZ (2014): "Un algoritmo del método de integración de variables para la solución del problema Máximo Clique Ponderado", Revista Investigacion Operacional , Vol. 35, No. 1, pp. 27-34.
228. VARELA, F. J. (1981): Describing the logic of the living. En Milan Zeleny (Ed.), Autopoiesis: A theory of living organization. New York: Columbia University.
229. VARELA, F. J. AND A. COUTINHO (1991): Inmunoknowledge. En J. Brockman (Ed.), Doing Science, New York: Prentice-Hall.
230. VARELA, F. J. Y A. COUTINHO (1991): "Second generation immune networks". Immunology Today, 12(5), 159-166.
231. VON BERTALANFFY, L. (1968,): General System Theory: Foundations, Development, Applications. New York, George Braziller.
232. WAGENSBERG, J. (1985): Ideas sobre la complejidad del mundo. Barcelona: Tusquets Editores.
233. WANG, F.; XIAO, X.; Li, J. (1995): "Development of intelligent CAD/CAM systems for progressive dies". Int. Conference on Intelligent Manufacturing. Wuhan, República Popular China.
234. WANG, P. AND D. P. KOWK. (1994): "Optimal design of pid process controllers based on genetic algorithms". Contr. Eng. Practic, 2 (4):641-648.
235. WECK, M.; W. KONIG, J. (1992): Lauscher. Assimilation of a common CAD/CAM system into dies and molds manufacturing. American Society of Mechanical Engineers. Production Engineering Division V32 Pub by ASME. New York,. pp. 119-133.
236. WEINBERG, G. M. (2002) An Introduction to General Systems Thinking. Dorset House Publishing.
237. WIENER, N. Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and Machine. Willey, N. Y.
238. Wierzbicki, A. P. (1949): "The use of reference objectives in multiobjective optimization". En Multiple Criteria Decision Making: Theory and Application (G. Fandel y T. Gal) Springer-Verlag, Berlin, 1980. pp. 468-486.
239. WILLIAMS. D. J. (1994): Manufacturing Systems. And introduction to the technologies. Chapman-Hall. UK.
240. WOOLDRIDGE M. (2002): An Introduction to Multiagent Systems, John Wiley and Sons.

- 241. WOOLDRIDGE, M. Intelligent agents. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, UK., 2000, ISBN-10: 0-262-23203-0.
- 242. YIN, Z. P. AND COL. (2003): "A Connector-Based Hierarchical Approach to Sequence Planning for Mechanical Assemblies". Computer Aided Design.
- 243. YUPING, Z. SHOUWEI, J. CHUNLI, Z. (2005): "A very fast simulated re-annealing algorithm for the leather nesting problem". Int J Adv Manuf Technol. P. 1113–1118. DOI 10.1007/s00170-003-1966-6.
- 244. ZADEH, L. (1969): "Biological application of the theory of fuzzy sets and systems" Proceedings of an International Symposium on Biocybernetics of the Central Nervous System. Little Brown, Boston, pp. 199-206.
- 245. ZADEH, L. A. (1978): "Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility". Fuzzy Sets and Systems, 1, 3-28.
- 246. ZEID, I. (1991): CAD/CAM Theory and Practice. McGraw Hill. USA.
- 247. ZEIGLER, B. P., PRAEHOFFER, H., AND KIM, T. G. (2000): Theory of Modeling and Simulation: Integrating Discrete Event and Continuous Complex Dynamic Systems, 2nd ed. Academic Press.
- 248. ZEIGLER, B. P. (1990): Object-Oriented Simulation with Hierarchical, Modular Models. Academic Press
- 249. ZELENY, M. (1982): Multiple Criteria decision-making, McGraw-Hill, New York.
- 250. ZHANG, H. AND L. ALTIN. (1994) Computarized Manufacturing Process Planning Systems. Chapman & Hall. USA.
- 251. ZILL G.(2004): Differential Equations with Modeling Applications, Brooks/Cole Publishing, 6th ed. ISBN 0-534-95574-6.
- 252. ZIMMERMANN, H. J. (1985): Fuzzy sets and its applications. Dordrecht: Publicaciones Kluwer Nijhoff.