

**ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERS
INDUSTRIALS DE BARCELONA (UPC)**
Departament d'Enginyeria Química

**CONTRIBUCION AL ESTUDIO DE
PLANTAS QUIMICAS
MULTIPRODUCTO DE PROCESO
DISCONTINUO**

Autor: Antonio España Camarasa

Barcelona, septiembre de 1994

Agradecimientos

Deseo hacer constar mi agradecimiento a todas las personas e instituciones que directa o indirectamente han contribuido en la elaboración de esta tesis doctoral:

- En primer lugar debo agradecer el apoyo, la comprensión, el cariño y sobre todo la paciencia de mi familia, especialmente de mi esposa Isabel y de mis padres y hermano Paquita, Manolo y Alberto.
- El trabajo que aquí se refleja se ha realizado bajo la dirección y supervisión del Dr. Ingeniero Industrial Luis Puigjaner Corbella. Las horas de debate que me ha dedicado, sus sugerencias, sus consejos y su constante empuje han contribuido de forma decisiva a mejorar el nivel de esta tesis.
- Debo reconocer el privilegio que ha supuesto poder contar con los comentarios y la experiencia del Dr. Ingeniero Industrial Manuel Lázaro Meléndez y del Profesor G. V. Reklaitis.
- El ambiente de trabajo y colaboración creado por todos mis compañeros del *Departament d'Enginyeria Química de la U.P.C.* sin duda ha propiciado la resolución de los problemas que se han planteado durante la elaboración de esta tesis. Por otro lado, merecen especial mención las aportaciones de Gustau Santos, Moisès Graells y Alfred Abad en la implementación y comprobación del funcionamiento de algunos de los algoritmos aquí presentados sobre diferentes casos académicos e industriales, y de Jordi Mauri, Joaquim Vallés y Domingo Olmos en la elaboración de sistemas de diálogo con el usuario.
- Se ha contado con la colaboración de un gran número de empresas y sociedades que han aportado información referente a sus instalaciones y su experiencia para probar, criticar y mejorar los diferentes procedimientos de cálculo propuestos en esta tesis. Entre estas empresas cabe destacar:
 - *Indústries Valls 1, S.A. (Punto Blanco).*
 - *Courtaulds España, S.A.*
 - *International Business Machines, S.A.E.*
 - *Sandoz España, S.A.E.*
 - *Consorti Concessionari d'Aigües per als Ajuntaments i Indústries de Tarragona.*
 - *Sistemes e Instrumentación, S.A.*
- Además de los medios con que he contado en el *Departament d'Enginyeria Química de la U.P.C.*, imprescindibles para el desarrollo de esta tesis, debo reconocer igualmente el soporte económico recibido de diversas instituciones. Algunas actividades relacionadas con la elaboración de esta tesis han sido parcialmente financiadas por:

- El *Ministerio de Educación y Ciencia*, a través del programa de Formación de Personal Investigador.
- La *Comissió Interdepartamental de Recerca i Innovació Tecnològica* de la Generalitat de Catalunya, a través de varias acciones que han subvencionado parcialmente estudios, viajes y la implantación de aplicaciones industriales de los procedimientos propuestos (programas AR87, EE92 y RDIT93).
- La *Associació d'Enginyers Industrials de Catalunya*, a través de la "VI Convocatòria de Beques per a la realització de tesis doctorals de la carrera d'Enginyer Industrial".
- La *Universitat Politècnica de Catalunya*, a través de diferentes bolsas de viaje.

Sin duda, esta lista no está completa. Durante estos años, muchas personas de diferentes grupos de investigación, empresas e instituciones han contribuido, con sus comentarios, críticas y sugerencias a mejorar los resultados de este estudio. A todos ellos, mi más sincero agradecimiento.

Todos los errores son míos.

Indice General

Agradecimientos	i
Indice General	v
Indice de Figuras	viii
Indice de Tablas	x
1. Sumario	1
2. Introducción al proceso discontinuo	3
2.1. Justificación e importancia de los procesos discontinuos	3
2.2. Definiciones y clasificación	5
2.3. Objetivos	7
2.4. Conceptos básicos para el estudio de sistemas discontinuos	8
2.4.1. Generalidades	8
2.4.2. Tareas y recetas	9
2.4.3. Características estructurales	13
2.4.4. Estrategias de transferencia de material entre tareas	17
2.5. La línea de producción y sus elementos. Cálculos básicos	19
2.5.1. Dependencia entre las etapas discontinuas y las semicontinuas .	20
2.5.2. Tiempo de proceso	20
2.5.3. Combinación de tareas	21
2.5.4. Utilización de equipos de almacenaje intermedio	23
2.5.5. Recursos compartidos	25
2.6. Otros modelos empleados	26
3. Síntesis y dimensionamiento de plantas multiproducto	29
3.1. Definición del problema	30
3.2. Antecedentes	33
3.3. Hipótesis iniciales	36
3.4. Fabricación de un producto único	37
3.5. El caso multiproducto	41
3.5.1. Resolución mediante sistemas comerciales	43
3.5.2. Cálculo del tiempo de producción	45
3.5.3. Optimización del tamaño de los equipos	45
3.5.4. Factores que afectan a la eficiencia de la optimización	48
3.5.5. Unidades en paralelo	50
3.6. Remodelación de plantas existentes	53
3.6.1. Introducción	53
3.6.2. Antecedentes	54
3.6.3. Aplicación del sistema de cálculo propuesto al caso de remodelación	56
3.7. Almacenaje intermedio	61

3.7.1.	Definición del problema	62
3.7.2.	Antecedentes	63
3.7.3.	Planteamiento del problema	65
3.7.4.	Localización de la situación óptima	67
3.7.5.	Cálculo de la capacidad de los equipos de almacenaje intermedio	69
3.7.6.	Coste del almacenaje	71
3.7.7.	Estrategia global de solución	72
3.7.8.	Mejora de la solución obtenida	73
3.8.	Ejemplos de aplicación	75
3.8.1.	Caso A1. Ejemplo propuesto por Robinson y Loonkar	75
3.8.2.	Caso A2. Basado en un ejemplo propuesto por Flatz	81
3.8.3.	Caso A3. Ejemplo propuesto por Modi y Karimi	95
3.8.4.	Caso A4. Planta de producción de penicilina	103
3.8.5.	Caso A5. Ejemplo propuesto por Vaselenak y colaboradores . .	120
4.	Planificación de la producción y secuenciación de tareas	131
4.1.	Introducción	131
4.2.	El problema de planificación	131
4.3.	Clasificaciones	132
4.4.	Antecedentes	134
4.4.1.	Sistemas multiproducto con unidades en serie	134
4.4.2.	Redes de producción compuestas por una única etapa limitante con varias unidades de proceso en paralelo para realizarla	136
4.4.3.	Sistemas serie con unidades en paralelo	137
4.4.4.	Aplicación a casos industriales	138
4.4.5.	Conclusiones	140
4.5.	Enfoque del problema	141
4.6.	Modelos de planificación	144
4.6.1.	Modelo utilizado	145
4.7.	Sistema general de planificación y secuenciación	147
4.7.1.	Generación y análisis de campañas	148
4.7.2.	Obtención de un plan inicial	154
4.7.3.	Mejora del plan	155
4.8.	Planificación con almacenaje intermedio	157
4.9.	Modificaciones manuales sobre el plan	159
4.10.	Actualización del plan	161
4.11.	Fabricación integrada por ordenador (CIM)	167
4.12.	Ejemplo de aplicación. Caso B1. Planta de producción de fibra acrílica	171
5.	Diseño integrado: Incorporación de la planificación en el proceso de diseño	199
5.1.	Introducción	199
5.2.	Antecedentes	200
5.3.	Descripción del la solución propuesta	202

5.4. Flexibilidad e incertidumbre	207
5.5. Ejemplos de aplicación	210
5.5.1. Caso C1. Basado en un ejemplo propuesto por Birewar y Grossmann	210
5.5.2. Caso C2. Basado en la planta propuesta por Robinson y Loonkar	218
6. Conclusiones	227
6.1. Sugerencias para desarrollos posteriores	229
Bibliografía	233
Notación	243

Indice de Figuras

2.1.	Esquema de producción. Etapa limitante del tamaño de lote	11
2.2.	Diagrama de Gantt mostrando el tiempo de proceso y el tiempo de ciclo limitante	12
2.3.	Ejemplos de adición de unidades en paralelo fuera de fase para reducir el tiempo de ciclo	14
2.4.	Ejemplo de descomposición de una tarea	15
2.5.	Ejemplo de combinación de tareas consecutivas	16
2.6.	Combinación de tareas no consecutivas	17
2.7.	Combinación de tareas no consecutivas con conflictos de tiempo	18
2.8.	Reglas de transferencia entre tareas ZW, NIS y UIS	19
2.9.	Dependencia entre las etapas discontinuas y las semicontinuas	20
2.10.	Cálculo del tiempo de ciclo al combinar tareas no consecutivas en semi-solapamiento	22
2.11.	Retraso necesario para la combinación tareas no consecutivas	24
2.12.	Utilización de equipos de almacenaje intermedio para desacoplar diferentes zonas de la línea de producción	25
3.1.	Estrategia de optimización	46
3.2.	Optimización del número de unidades en paralelo	52
3.3.	Determinación del tiempo de ciclo limitante medio	59
3.4.	Algoritmo de diseño con almacenaje intermedio	73
3.5.	Caso A1. Esquema de la planta	75
3.6.	Caso A1. Variación de tamaño de algunos equipos, función objetivo y tiempo residual durante el proceso iterativo	78
3.7.	Caso A2. Datos correspondientes al producto A	82
3.8.	Caso A2. Datos correspondientes al producto B	84
3.9.	Caso A2. Datos correspondientes al producto C	88
3.10.	Caso A2. Diagrama de flujo considerando los tres productos	89
3.11.	Caso A2. Datos correspondientes al producto B, incluyendo una etapa de purificación	92
3.12.	Caso A2. Diagrama de flujo final considerando los tres productos y la etapa de purificación de B	93
3.13.	Caso A3. Esquema de la planta	95
3.14.	Caso A4. Planta para la producción de penicilina	109
3.15.	Caso A4. Ocupación de equipos instalados	112
3.16.	Caso A4. Ocupación de equipos en caso de reutilización	117
3.17.	Caso A5. Planta inicial propuesta por Vaselenak y colaboradores	121
4.1.	Mejora de la utilización de los equipos limitantes y de la productividad por combinación de lotes de diferentes productos	149
4.2.	Mejora de la utilización de los servicios generales por combinación de lotes de diferentes productos	150
4.3.	Mejora de productividad mediante campañas multiproducto por un mejor aprovechamiento de los equipos en paralelo	151

4.4.	Evolución de la cantidad almacenada en el depósito en diferentes “puntos de parada” y de la productividad correspondiente	159
4.5.	Transferencia de información en un entorno CIM	168
4.6.	Caso B1. Planta de producción de fibra acrílica: Sección química	171
4.7.	Caso B1. Planta de producción de fibra acrílica: Sección de hilado	173
4.8.	Caso B1. Conexiones entre las líneas y los tanques de avivaje	181
4.9.	Caso B1. Asignación y secuenciación de pedidos con plazos de entrega normales	194
4.10.	Caso B1. Asignación y secuenciación de pedidos en una situación de retraso en los plazos de entrega	195
5.1.	Relación entre los módulos de Diseño y de Planificación	204
5.2.	Caso C1. Diferentes estrategias de producción	212
5.3.	Caso C1.3. Evolución de la función objetivo, de las horas necesarias y de las horas sobrantes en función del horizonte de tiempo utilizado en la etapa de diseño	216
5.4.	Caso C2.2. Evolución de la función objetivo, de las horas necesarias y de las horas sobrantes en función del horizonte de tiempo utilizado en la etapa de diseño	222
5.5.	Caso C2.2. Evolución prevista de los <i>stocks</i> de producto final con la solución propuesta	223
5.6.	Caso C2.4. Evolución de los costes de inversión en equipos de proceso y de los costes totales en función del horizonte de tiempo utilizado en la etapa de diseño	224

Indice de Tablas

3.1. Caso A1. Descripción del problema	76
3.2. Caso A1. Resultados obtenidos en el ejemplo propuesto por Robinson y Loonkar	77
3.3. Caso A1. Resultados comparativos	79
3.4. Caso A1. Resultados obtenidos a partir de diferentes puntos iniciales	80
3.5. Caso A2. Datos para el problema propuesto Flatz	86
3.6. Caso A2. Diseño óptimo en diferentes situaciones de mercado	87
3.7. Caso A2. Equipos necesarios para la elaboración de 3 productos	90
3.8. Caso A2. Diseño óptimo de la planta para tres productos, incluyendo una etapa de purificación de producto B	94
3.9. Caso A3. Datos generales	96
3.10. Caso A3. Resultados obtenidos sin almacenaje intermedio	97
3.11. Caso A3. Capacidad de producción y tiempos de proceso sin almacenaje intermedio	99
3.12. Caso A3. Aplicación del procedimiento de localización para estimar los beneficios esperados	99
3.13. Caso A3. Resultados obtenidos al analizar la presencia de un equipo de almacenaje intermedio	100
3.14. Caso A4. Datos generales	110
3.15. Caso A4. Equipos disponibles	110
3.16. Caso A4. Resultados sin reutilización de equipos	114
3.17. Caso A4. Tiempos de proceso con reutilización de equipos	118
3.18. Caso A4. Resultados con reutilización de equipos	119
3.19. Caso A5. Descripción de los productos	120
3.20. Caso A5. Datos de la planta original propuesta por Vaselenak y colaboradores	121
3.21. Caso A5. Situación de mercado	122
3.22. Caso A5. Cálculo de las condiciones de proceso iniciales	123
3.23. Caso A5. Cálculo de la mejor utilización posible de los equipos iniciales	124
3.24. Caso A5. Resultados obtenidos si el modo de operación de los equipos es el mismo para todos los productos	125
3.25. Caso A5. Condiciones de trabajo si el modo de operación de los equipos es el mismo para todos los productos	126
3.26. Caso A5. Resultados obtenidos si el modo de operación de los equipos es función del producto	129
3.27. Caso A5. Condiciones de trabajo si el modo de operación de los equipos es función del producto	130
4.1. Resumen de los resultados obtenidos para el problema de secuenciación sobre unidades en paralelo	137
4.2. Caso B1. Tiempos improductivos debidos a cambios en las condiciones de trabajo en las líneas	176
4.3. Caso B1. Condiciones de funcionamiento de las líneas	178

4.4.	Caso B1. Condiciones de funcionamiento de las líneas (cont.)	179
4.5.	Caso B1. Posibilidades técnicas de las líneas de hilado	180
4.6.	Caso B1. <i>Stock</i> de hileras	180
4.7.	Caso B1. Factores que afectan a la función objetivo	183
4.8.	Caso B1. Demandas a cubrir	188
4.9.	Caso B1. Demandas a cubrir (cont.)	189
4.10.	Caso B1. Características técnicas de fabricación	190
4.11.	Caso B1. Características técnicas de fabricación (cont.)	191
4.12.	Caso B1. Desglose de la función objetivo con plazos de entrega normales	193
4.13.	Caso B1. Desglose de la función objetivo en una situación de retraso en los plazos de entrega	196
5.1.	Ejemplo de soluciones alternativas proporcionadas por el sistema de planificación de la producción	203
5.2.	Caso C1. Descripción del problema	210
5.3.	Caso C1. Resultados obtenidos con el módulo de diseño preliminar . . .	211
5.4.	Caso C1.4. Distribución temporal de la demanda	214
5.5.	Caso C1. Influencia de las condiciones de planificación sobre los resul- tados de diseño preliminar	215
5.6.	Caso C2. Consumos de servicios generales	218
5.7.	Caso C2. Parámetros de producción de las diferentes campañas	219
5.8.	Caso C2.3. Distribución temporal de la demanda	221
5.9.	Caso C2. Resumen de los resultados de planificación para cada una de las alternativas planteadas	224
5.10.	Caso C2. Diseño final para cada una de las alternativas planteadas . . .	225