

EMPRESAS

[+]  
E-BOOK  
GRATIS

# LOGÍSTICA DE PRODUCCIÓN

MODELOS Y MÉTODOS  
DE PROGRAMACIÓN DE OPERACIONES



Universidad de  
La Sabana



tirant lo blanch

JAIRO RAFAEL MONTOYA TORRES

## ACCESO AL E-BOOK GRATIS

- [+] Diríjase a la página web de la editorial [www.tirant.com/mex](http://www.tirant.com/mex)
- [+] En *Mi cuenta* vaya a Mis promociones <https://www.tirant.com/mex/mispromociones>
- [+] Introduzca su mail y contraseña, si todavía no está registrado debe registrarse
- [+] Una vez en Mis promociones inserte el código oculto en esta página para activar la promoción

Código Promocional



Rasque para visualizar

No se admitirá la devolución de este libro si el código promocional ha sido manipulado



# **LOGÍSTICA DE PRODUCCIÓN**

**Modelos y métodos de programación de operaciones**

## COMITÉ CIENTÍFICO DE LA EDITORIAL TIRANT LO BLANCH

**MARÍA JOSÉ AÑÓN ROIG**

*Catedrática de Filosofía del Derecho de la  
Universidad de Valencia*

**ANA BELÉN CAMPUZANO LAGUILLO**

*Catedrática de Derecho Mercantil de la  
Universidad CEU San Pablo*

**JORGE A. CERDIO HERRÁN**

*Catedrático de Teoría y Filosofía de Derecho  
Instituto Tecnológico Autónomo de México*

**JOSÉ RAMÓN COSSÍO DÍAZ**

*Ministro de la Suprema Corte  
de Justicia de México*

**OWEN M. FISS**

*Catedrático emérito de Teoría del Derecho de la  
Universidad de Yale (EEUU)*

**LUIS LÓPEZ GUERRA**

*Juez del Tribunal Europeo de Derechos  
Humanos  
Catedrático de Derecho Constitucional de la  
Universidad Carlos III de Madrid*

**ÁNGEL M. LÓPEZ Y LÓPEZ**

*Catedrático de Derecho Civil de la  
Universidad de Sevilla*

**MARTA LORENTE SARIÑENA**

*Catedrática de Historia del Derecho de la  
Universidad Autónoma de Madrid*

**JAVIER DE LUCAS MARTÍN**

*Catedrático de Filosofía del Derecho y Filosofía  
Política de la Universidad de Valencia*

**VÍCTOR MORENO CATENA**

*Catedrático de Derecho Procesal de la  
Universidad Carlos III de Madrid*

**FRANCISCO MUÑOZ CONDE**

*Catedrático de Derecho Penal de la  
Universidad Pablo de Olavide de Sevilla*

**ANGELIKA NUSSBERGER**

*Jueza del Tribunal Europeo de Derechos  
Humanos. Catedrática de Derecho Internacional  
de la Universidad de Colonia (Alemania)*

**HÉCTOR OLASOLO ALONSO**

*Catedrático de Derecho Internacional de la  
Universidad del Rosario (Colombia) y Presidente del  
Instituto Ibero-Americano de La Haya (Holanda)*

**LUCIANO PAREJO ALFONSO**

*Catedrático de Derecho Administrativo de la  
Universidad Carlos III de Madrid*

**TOMÁS SALA FRANCO**

*Catedrático de Derecho del Trabajo y de la  
Seguridad Social de la Universidad de Valencia*

**JOSÉ IGNACIO SANCHO GARGALLO**

*Magistrado de la Sala Primera (Civil) del  
Tribunal Supremo de España*

**TOMÁS S. VIVES ANTÓN**

*Catedrático de Derecho Penal de la  
Universidad de Valencia*

**RUTH ZIMMERLING**

*Catedrática de Ciencia Política de la  
Universidad de Mainz (Alemania)*

Procedimiento de selección de originales, ver página web:

<http://www.tirant.net/index.php/editorial/procedimiento-de-seleccion-de-originales>

# LOGÍSTICA DE PRODUCCIÓN

Modelos y métodos de programación  
de operaciones

**JAIRO RAFAEL MONTOYA TORRES**

*Escuela Internacional de Ciencias  
Económicas y Administrativas  
Universidad de La Sabana  
Chía, Colombia*



Universidad de  
**La Sabana**

**tirant lo blanch**

México D.F., 2015

Copyright © 2015

Todos los derechos reservados. Ni la totalidad ni parte de este libro puede reproducirse o transmitirse por ningún procedimiento electrónico o mecánico, incluyendo fotocopia, grabación magnética, o cualquier almacenamiento de información y sistema de recuperación sin permiso escrito del autor y del editor.

En caso de erratas y actualizaciones, la Editorial Tirant lo Blanch México publicará la pertinente corrección en la página web <http://www.tirant.com/mex>

La utilización o mención en esta obra de marcas registradas o términos similares, incluso si estos son identificados como tales, no significa expresión alguna de la opinión del autor en cuanto estén sujetos o no a derechos de propiedad intelectual o comercial.

**Montoya Torres, Jairo Rafael**

**Logística de producción: modelos y métodos de programación de operaciones / Jairo Rafael Montoya Torres – México: Universidad de La Sabana – Tirant lo Blanch, 2015. 160 pp.; 17 x 24 cm.**

**Incluye bibliografía**

**ISBN: 978-84-9086-653-5 (e-book)**

**1. Logística en los negocios. 2. Administración de la producción. 3. Producción industrial. I. Montoya Torres, Jairo Rafael. II. Universidad de La Sabana (Colombia) III. Tit. IV. Serie.**

**CDD 658.5**

**Co-ChULS**

Colección dirigida por:

**ANA BELÉN CAMPUZANO Y MARCELO PASCUAL**

© Jairo Rafael Montoya Torres

- © TIRANT LO BLANCH MÉXICO  
EDITA: TIRANT LO BLANCH MÉXICO  
Leibnitz 14  
Colonia Nueva Anzures  
Delegación Miguel Hidalgo  
CP 11590 MÉXICO D.F.  
Telf.: (55) 65502317  
[infomex@tirant.com](mailto:infomex@tirant.com)  
<http://www.tirant.com/mex/>  
<http://www.tirant.es>  
ISBN: 978-84-9086-652-8  
MAQUETA: Tink Factoría de Color
- © Universidad de La Sabana  
Campus del Puente del Común  
Km 7 Autopista Norte de Bogotá  
Chía, Cundinamarca, Colombia  
Tel. (57-1) 8615555 Ext. 45001  
<http://publicaciones.unisabana.edu.co>  
[publicaciones@unisabana.edu.co](mailto:publicaciones@unisabana.edu.co)

Si tiene alguna queja o sugerencia, envíenos un mail a: [atencioncliente@tirant.com](mailto:atencioncliente@tirant.com). En caso de no ser atendida su sugerencia, por favor, lea en [www.tirant.net/index.php/empresa/politicas-de-empresa](http://www.tirant.net/index.php/empresa/politicas-de-empresa) nuestro Procedimiento de quejas.

# Índice

Acerca del autor .....	11
Prefacio .....	13
Agradecimientos .....	15
Consideraciones para la lectura y uso del libro .....	17

## Capítulo 1 Introducción

1.1. Definición de logística y de logística de producción .....	19
1.2. Definición de programación de operaciones.....	23
1.3. La programación de tareas en la empresa de manufactura .....	24
1.4. Notación matemática.....	26
1.5. Clasificación de problemas de programación de operaciones.....	27
1.5.1. Configuración del sistema: campo $\alpha$ .....	28
1.5.2. Características y restricciones de las tareas: campo $\beta$ .....	31
1.5.3. Medidas de desempeño: campo $\gamma$ .....	32
1.6. Determinación del programa: algoritmo de programación.....	34
1.7. Representación gráfica de un programa: diagrama de Gantt .....	35
1.8. Programación en contexto estático <i>versus</i> contexto dinámico.....	36
1.9. Organización del libro .....	37
1.10. Comentarios .....	38
Referencias del capítulo .....	39

## Capítulo 2 Complejidad computacional

2.1. Introducción .....	41
2.2. Las clases $P$ y $NP$ .....	42
2.2.1. Cálculo del número de pasos de un algoritmo .....	44
2.2.2. Reducción (transformación) polinomial .....	45
2.2.3. Algunos problemas $NP$ -completos .....	47
2.3. Reducción entre problemas de programación de tareas.....	50
2.4. Resolución de problemas de programación de operaciones .....	50
2.5. Comentarios .....	52
Referencias del capítulo .....	53



*Capítulo 3*  
**Modelos de una máquina**

3.1. Minimización del <i>makespan</i> : $1    C_{\max}$ y $1   r_j   C_{\max}$ .....	56
3.2. Minimización del tiempo total de terminación.....	56
3.2.1. Minimización del tiempo total de terminación con fechas de llegada idénticas.....	57
3.2.2. Minimización del tiempo total de terminación cuando $r_j \geq 0$ .....	59
3.3. Relaciones de precedencia: algoritmo de Lawler.....	63
3.4. Problema $1, h    \sum C_j$ : con periodo de indisponibilidad de la máquina.....	67
3.5. Funciones objetivo con fechas de entrega.....	70
3.6. Consideración de tiempos de preparación ( <i>set up times</i> ): $1   S_{jk}   C_{\max}$ .....	71
Referencias del capítulo.....	75

*Capítulo 4*  
**Máquinas paralelas**

4.1. Minimización del <i>makespan</i> en máquinas idénticas.....	78
4.1.1. Problema $Pm    C_{\max}$ .....	78
4.1.2. Problema $Pm   prmp   C_{\max}$ .....	80
4.1.3. Problema $Pm   prec   C_{\max}$ .....	81
4.2. Minimización del tiempo total de terminación en máquinas idénticas....	82
4.3. Máquinas paralelas no homogéneas.....	83
4.4. Consideración de fechas de entrega.....	88
4.5. Consideraciones de tiempos de preparación.....	88
Referencias del capítulo.....	91

*Capítulo 5*  
**Talleres en serie: *flowshops***

5.1. Talleres de tipo <i>flowshop</i> : problema $Fm    C_{\max}$ .....	93
5.1.1. Algoritmo de Johnson para $F2    C_{\max}$ .....	96
5.1.2. Extensión a tres máquinas.....	98
5.1.3. Problema de <i>flowshop</i> con dos trabajos.....	99
5.2. Minimización del tiempo de flujo en <i>flowshops</i> .....	101
5.2.1. Casos particulares.....	104
5.2.2. Algoritmos heurísticos.....	105
5.2.3. Cotas inferiores.....	110
5.3. Metaheurísticos para talleres de tipo <i>flowshop</i> .....	111
5.3.1. Procedimiento de recocido simulado para el FSSP.....	112
5.3.2. Algoritmo genético para el FSSP.....	114
5.4. <i>Flowshop</i> híbrido con minimización del <i>makespan</i> .....	116
Referencias del capítulo.....	121

## Capítulo 6

**Jobshop y openshop**

6.1. <i>Jobshop</i> con minimización del <b>makespan</b> .....	123
6.1.1. Grafo disyuntivo para $J_m \parallel C_{\max}$ .....	124
6.1.2. <i>Jobshop</i> con dos máquinas: $J_2 \parallel C_{\max}$ .....	127
6.1.3. Reglas de despacho .....	128
6.2. Algoritmo Shifting Bottleneck .....	129
6.3. Programación en talleres tipo <i>openshop</i> .....	134
Referencias del capítulo .....	135

## Capítulo 7

**Programación de proyectos sin limitaciones de recursos**

7.1. Análisis de un proyecto con el método PERT/CPM .....	139
7.2. Representación gráfica de un proyecto .....	141
7.2.1. Diagrama de Gantt .....	141
7.2.2. Representación de un proyecto en forma de red .....	142
7.3. Análisis de la ruta crítica .....	146
7.4. Formulación de un proyecto como un programa lineal .....	149
7.5. Intercambios entre tiempos y costos .....	151
7.6. Consideración de incertidumbre en los tiempos de las actividades .....	155
Referencias del capítulo .....	159



## Acerca del autor

Jairo R. Montoya Torres es Profesor Titular de la Escuela Internacional de Ciencias Económicas y Administrativas de la Universidad de La Sabana, Chía (Colombia). Entre 2007 y 2009, se desempeñó como director del programa de Administración de Mercadeo y Logística Internacionales; entre 2009 y 2010, lideró el diseño y la apertura del programa de Maestría en Gerencia de Operaciones de la Universidad de La Sabana, del cual fue director entre julio de 2010 y marzo de 2013. Entre los meses de marzo y octubre de 2013 fue Investigador Visitante en la Universidad de Leeds, Reino Unido, bajo la figura de Marie Curie International Incoming Fellow financiado en el marco de las Acciones PEOPLE del Séptimo Programa Marco de la Unión Europea. También ha sido Profesor Visitante en la École Nationale d'Ingénieurs de Metz y en la École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne (Francia). En noviembre de 2011 defendió satisfactoriamente el diploma posdoctoral de Habilitación para Dirigir Investigaciones (HDR, *Habilitation à Diriger des Recherches*) en la especialidad de Logística e Investigación de Operaciones ante el Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon y la Université Claude Bernard de Lyon (Francia). Se graduó en noviembre de 2005 como Doctor (*Magna Cum Laude*) en la especialidad de ingeniería industrial de la École Nationale Supérieure des Mines y de la Université Jean Monnet, Saint-Étienne (Francia). Posee también los títulos de Master of Science in Industrial Engineering and Management del Institut National Polytechnique de Grenoble (Francia) (2002); y de ingeniero industrial (con honores) de la Universidad del Norte, Barranquilla (Colombia) (2000). Sus intereses en investigación se centran en las áreas de simulación y optimización de operaciones logísticas y de producción, evaluación ambiental, social y económica de decisiones logísticas y gestión sostenible de cadenas logísticas. Ha trabajado en empresas de manufactura y de servicios en Colombia y Francia, ejerciendo cargos con énfasis tanto investigativos como administrativos. Sus intereses en docencia incluyen la programación de operaciones y la optimización y simulación de sistemas logísticos y de producción. Ha sido Profesor Catedrático o Profesor Invitado en las universidades: École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne – Centre Microélectronique de Provence, Gardanne (Francia); Institut Universitaire de Technologie (IUT) de Saint-Étienne (Francia); Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los Garza (México); École Centrale Paris (Francia); Universidad de los Andes, Bogotá; Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá; Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá; Universidad del Norte, Barranquilla (Colombia). En 2010, hizo parte del grupo de coeditores de los *Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference* (Baltimore, USA) y es coeditor del libro *Hybrid Algorithms for Computing, Service and Manufacturing Systems: Routing and Scheduling Solutions*, publicado por IGI Global (Estados Unidos). También ha sido editor-invitado para las revistas académicas *Annals of*

*Operations Research, Int., Journal of Information Systems and Supply Chain Management, Journal of Intelligent Manufacturing, Int. Journal of Industrial and Systems Engineering, Journal of Cleaner Production, Int. Journal of Productivity and Performance Management* y *Logistique et Management*. También ha publicado numerosos artículos de investigación en revistas académicas internacionales, varios capítulos de libros editados y artículos en memorias de conferencias internacionales de alto prestigio. Ha sido invitado como evaluador-par de artículos de investigación para revistas académicas internacionales y miembro de Comités Científicos Internacionales de Programa (IPC) y organizador y presidente de sesión en conferencias internacionales prestigiosas sobre simulación, logística y gestión de operaciones. También se encuentra en la lista de evaluadores-pares del Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (Colciencias) de Colombia.

## Prefacio

El contexto económico competitivo hace que las empresas de manufactura, pero también las de servicio, se vean confrontadas a la implementación constante de procedimientos formales que les permitan optimizar sus procesos. En particular, en lo referente a las operaciones de manufactura, la logística de producción juega un papel importante en cuanto al uso eficiente de los recursos. Esta eficiencia es comúnmente medida en términos monetarios a nivel estratégico, pero también en términos de indicadores globales de desempeño, a nivel táctico, o incluso en tasas de utilización de los recursos, a nivel operativo. Es en este nivel de toma de decisiones que se focaliza este libro, y en particular en los procesos de la logística de producción relacionados con la programación de actividades de producción. La programación de operaciones (*scheduling* en la literatura anglófona) consiste en la asignación óptima, o cuasi-óptima, de recursos para la realización de un conjunto de actividades. Fruto de las aplicaciones iniciales en problemas de manufactura, los recursos son comúnmente llamados "máquinas" y las actividades se llaman "tareas", "trabajos" u "órdenes de producción". Los modelos y procedimientos desarrollados para la programación de operaciones se han visto beneficiados por el auge y el desarrollo de los computadores.



## Agradecimientos

La idea de escribir un libro en español sobre logística de producción, y en particular sobre programación de operaciones, con énfasis en modelos y procedimientos de resolución, nació en el año 2000 cuando al trabajar en temas relacionados a nivel de investigación, observé que no existían libros de texto en español sobre este tema. Algunos años después del inicio del proyecto, y de varios manuscritos actualizados permanentemente a través de clases dictadas en pregrado y posgrado, la primera versión completa del manuscrito fue terminada de escribir durante una visita corta de investigación en el Center for Transportation and Logistics (CTL) del Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, USA, gracias a la invitación extendida por el doctor Edgar E. Blanco, quien actualmente es Principal Research Director y Executive Director de la red SCALE para Latinoamérica del CTL-MIT. Este borrador fue empleado como material guía de clase en los años siguientes en la asignatura “Logística de producción”. A partir de los comentarios y las sugerencias de mejoramiento recibidos por parte de los estudiantes, se presenta la versión actual del texto de clase. Así pues, la recopilación de modelos y procedimientos de resolución presentados en este libro es fruto de la experiencia docente en el área. En este sentido, agradezco el aporte y las correcciones realizadas en las versiones preliminares del manuscrito por los estudiantes.

Es necesario agradecer el aporte de algunos colegas. Entre ellos, agradezco a Mike Pinedo, Professor en Stern Business School New York University, USA, y Gonzalo Mejía, Profesor Asociado del Departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad de los Andes, Bogotá (Colombia), por compartir conmigo sus diapositivas de clase. También es necesario agradecer las ideas y sugerencias diversas de Edgar Alfonso, Profesor Asociado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de La Sabana, Chía (Colombia) y de un gran colega, Carlos Paternina, Profesor Asociado y anterior director del Departamento de Ingeniería Industrial y del programa de Maestría en Ingeniería Industrial de la Universidad del Norte, Barranquilla (Colombia), quien ha apoyado mis ideas para la enseñanza de la programación de operaciones y ha sugerido en conversaciones formales e informales algunas ideas que han contribuido a la generación de varios artículos científicos.



