

Aplicaciones de programación lineal, entera y mixta

Applications of linear, mixed and integer programming

Yeicy Bermúdez Colina

Palabras Clave: programación lineal, programación lineal entera y mixta

Key words: linear programming, integer linear programming, mixed and integer linear programming

RESUMEN

La presente investigación se corresponde con una de tipo documental informativa; aborda la revisión de información divulgada por la comunidad científica internacional en temas relacionados con la programación lineal, programación lineal entera y programación lineal entera mixta, específicamente aplicaciones asociadas a esta temática en las diversas organizaciones a nivel mundial. Se revisaron 122 publicaciones entre los años 2002 y 2010, en los diferentes medios de divulgación científica y se seleccionaron aquellas inherentes o afines con la ingeniería industrial. De la exploración de esta información se evidencia, que los modelos de optimización basados en programación lineal, entera y mixta son ampliamente utilizados en problemas reales para formular modelos que contribuyen eficientemente en la toma de decisiones en todos los niveles organizacionales, lo cual tiene extensa contribución en la reducción de costos operativos, un ejemplo que se detalla más adelante en las aplicaciones de planificación de producción es el modelo de planeación en el cual se incrementó la productividad, se redujeron los costos, con un mejor

aprovechamiento de la capacidad y reducción de inventarios en el horizonte de planificación. La aplicación de estas herramientas se enmarca en diversas organizaciones dentro de las áreas de producción, servicios, ambiente, logística, mercadeo, proyectos, finanzas, salud, etc., todas con la finalidad de mejorar la productividad, aprovechar eficientemente los recursos, reducir costos de gestión, satisfacer a los clientes, todo ello a la par con el desarrollo sostenible.

ABSTRACT

This research corresponds to an informative documental, deals with the review of information disseminated by the international scientific community on issues related to linear programming, integer linear programming and mixed integer linear programming, specifically applications associated with this topic in different organizations worldwide. We reviewed 122 publications between 2002 and 2010, in the different media of scientific and selected those inherent or related to industrial engineering. Exploration of this information is evidence that optimization models based on linear

programming, mixed integer and are widely used in real problems to formulate models that contribute effectively in decision-making at all organizational levels, which has extensive contribution in reducing operating costs, an example which is detailed later in planning applications is the production planning model in which increased productivity, reduced costs, better capacity

El mundo vive un proceso de cambio día a día, lo que hace cada vez más difícil para las organizaciones competir y mantenerse en el mercado. Dicho cambio como lo refieren Niebel y Freivalds (2009), incluye la globalización del mercado y de la manufactura, el crecimiento del sector servicios, el uso de computadoras en todas las operaciones de la empresa. Esto ha impulsado a las compañías al estudio de los sistemas de planificación y gestión de la producción, para lograr una potencial fuente de ventajas competitivas y por tanto un factor determinante en la ardua tarea de deleitar al cliente, integrando las necesidades del usuario a las funciones de la organización (Sellie, 1996), con la ineludible reducción de costos que debe ir de la mano con el crecimiento sostenido en el mercado. En este sentido, la ingeniería industrial se le conoce en la industria, comercio y gobierno de todo el mundo, como la más amplia de todas las funciones de administración moderna (Ferrel, 1996). Esta rama de la ingeniería trata del diseño, análisis, medición, control, adecuación y mejoramiento de los procesos que componen un sistema productivo o de operaciones para lograr la producción de bienes o servicios, de

utilization and inventory reduction in the planning horizon. The application of these tools is part of various organizations within the areas of production, services, environment, logistics, marketing, projects, finance, health, etc., All in order to improve productivity, leverage resources efficiently, reduce costs management, satisfy customers, all at par with sustainable development.

manera que no sólo satisfagan las expectativas del consumidor sino también permita a las organización competir y permanecer en el mercado (Linares, Ramos, Sánchez, Sarabia y Victoriano, 2001). En el diseño, establecimiento y mantenimiento de los sistemas administrativos y productivos para una operación eficiente, los ingenieros y otros profesionales en las organizaciones utilizan herramientas de la investigación de operaciones como medio de optimización, esto estrechamente relacionado con el hecho de que las empresas están resolviendo la reducción de costos y el aumento de la calidad a través de la mejora de la productividad (Niebel y Freivalds, 2009).

El objetivo de esta investigación es presentar aplicaciones reales de la programación lineal, lineal entera y entera mixta en diversas partes del mundo como herramientas ampliamente usadas por los profesionales de la ingeniería y en especial por la Ingeniería Industrial en su afán por mejorar los sistemas administrativos y productivos y lograr una operación eficiente desde el punto de vista económico, ambiental y social.

Este documento inicia con una breve contextualización de conceptos relacionados con la investigación de operaciones y se finaliza con ejemplos de casos empresariales donde esta disciplina ha sido beneficiosa en lo que respecta a reducción de costos, garantizar suministros, minimizar recursos, balancear cargas, entre otros. Se pretende presentar una revisión de los problemas correspondientes a las ramificaciones de la figura 1 que culminan en la programación lineal, programación lineal con variable enteras y programación lineal entera mixta.

DESARROLLO

La tarea de optimización y la ingeniería

La investigación de operaciones como herramienta de optimización utilizada en aspectos relacionados a la administración eficiente de procesos en todos los ámbitos de la economía durante cuarenta años, se ha convertido en práctica habitual en la ciencia, las ingenierías y los negocios especialmente en la ingeniería industrial, muchos aspectos de la optimización se desarrollaron en los siglos XVIII y XIX con los trabajos de Lagrange y Euler (D'Armas, 2005); sin embargo, según Caballero y Grossmann (2007) el indudable desarrollo de la programación se le debe a Kantorovich y Dantzing en los años cuarenta, pero no es hasta los años 70 cuando la computación apoya los cálculos y comienza a ser usada ampliamente esta herramienta. Como se puede observar en Hiller y Libermann (2002) la aplicación es

en áreas como: programación de producción, transporte, salud, investigación de mercado, logística, finanzas, lo cual coloca a la programación lineal como herramienta ineludible en la toma de decisiones.

Tal como lo refieren González y Ríos (1999), aplicaciones de investigación de operaciones se encuentran en todo tipo de industria o todo lo nivel organizacional. Las empresas buscan tomar decisiones que les produzcan beneficios económicos y no económicos, y normalmente, estas decisiones se encuentran restringidas de forma muy compleja y por ello deben basarse en herramientas que faciliten este proceso como lo es la investigación de operaciones, la cual les ha generado un importante impacto que se ha convertido en ganancias (o ahorros) multimillonarias en los diversos ramos industriales, en este aspecto el ingeniero industrial contribuye con uso de modelos computacionales para el estudio y optimización de los métodos y procesos de producción y los servicios en el sector industrial, comercio, distribución, agroindustria, energía, servicios financieros, informática, educativo, etc. La optimización de procesos y/o servicios va de la mano con el desarrollo sostenible, si se entiende este último como aprovechar los recursos existentes y tratar de satisfacer las necesidades presentes sin comprometer las posibilidades de satisfacer las necesidades futuras (Gómez, 2002), esto es plenamente congruente con los retos actuales de las organizaciones de transparencia, integridad y sostenibilidad entendida esta última en sus tres

vertientes: económica, ambiental y social (Forética, 2008).

Los modelos de optimización se pueden clasificar de acuerdo con (Linares, Ramos, Sánchez, Sarabia y Victoriano, 2001) en métodos clásicos el cual buscan garantizar un óptimo local (entre los que se encuentran la optimización lineal, lineal entera mixta, estocástica, dinámica); y métodos metaheurísticos para alcanzar un óptimo global (incluyen métodos como algoritmos evolutivos y método del recorrido simulado).

La figura 1 presenta una adaptación de la clasificación de los problemas de optimización planteada por Caballero y Grossmann (2007), la cual refleja que las variables discretas o continuas llevan a problemas de programación lineal y no lineal, además problemas que contengan ecuaciones diferenciales se pueden discretizar por varios métodos y dar lugar a problemas de programación no lineal o de programación no lineal entera.

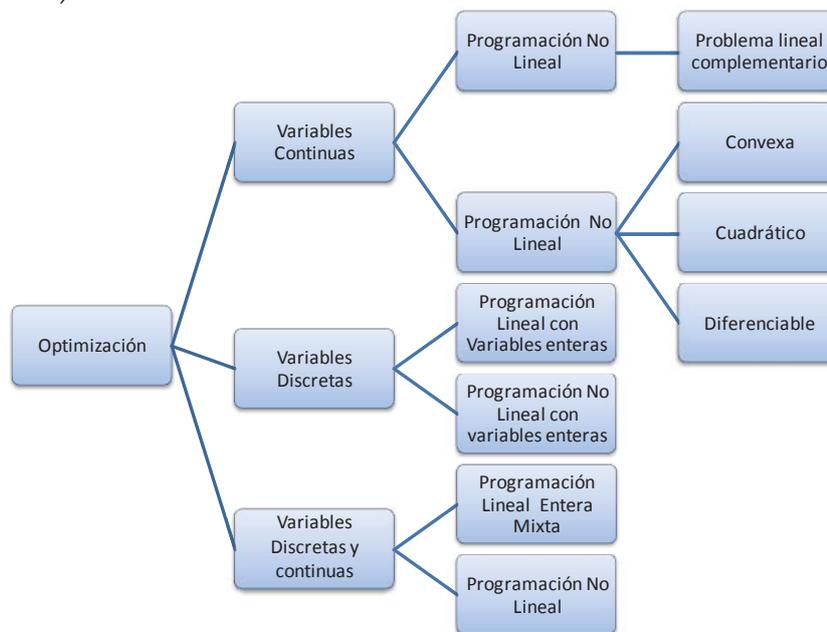


Figura 1. División de la optimización

En la presente investigación se muestran casos de organizaciones en los cuales la investigación operativa haya sido un factor clave en la creación de competitividad y para el desarrollo sostenible, al contribuir directamente con el aumento de los ahorros y la eficiencia en el uso de los recursos en todos los ámbitos organizacionales. Tal como lo

plantean Gómez (2002), el reto actual es un modelo de desarrollo que de manera simultánea satisfaga las necesidades de calidad de vida y conserve el ambiente tal y como se encuentra, lo cual es plenamente consistente con la competencia del Ingeniero Industrial que lo orienta a optimizar los procesos, hacer uso eficiente de los recursos y por ende aumentar tanto los beneficios

económicos como los no económicos. En concordancia con Mulder, K (2007), hoy día se percibe que la actuación de nuestra sociedad industrial está en proceso de cambio, pues la forma de operar ya no es sostenible, lo cual está amenazando las oportunidades de desarrollo de los menos privilegiados y de las generaciones futuras. En este proceso de cambio los

ingenieros desarrollan un papel fundamental y por ello cada vez más su capacitación científica debe orientarse a aspectos sociales y a la forma en que los problemas sociales y ambientales impactan en la tecnología, es decir debe aprender a pensar estratégicamente en el desafío que plantea el cambio tecnológico a la sostenibilidad.

METODOLOGÍA

La presente investigación es una revisión tipo documental informativa; se pretende presentar información relevante de diversas fuentes confiables sobre el tema en estudio. Está basada en la revisión y análisis de fuente impresas (libros, revistas, tesis doctorales, enciclopedias, etc.) y de fuentes electrónicas como bases de datos, revistas en línea, páginas Web, entre otras fuentes (Alfonzo, 1994). La recolección de información se basó en el análisis documental, así como la técnica de síntesis para el análisis de datos (Arias, 2006). Se revisaron 122 publicaciones sobre aplicaciones para la optimización, las cuales posteriormente se filtraron para mostrar las diversas aplicaciones de la programación lineal y lineal entera mixta en diversos ámbitos organizacionales.

Programación lineal, programación lineal entera y entera mixta

Cornejo (2005) define un modelo de programación lineal entera como aquel donde las variables son números enteros no negativos. En las situaciones reales, el analista se enfrenta a “decisiones sí o no”,

las que pueden representarse con variable denominadas binarias. Cuando sólo es necesario que algunas de las variables sean enteras y el resto continuas, el modelo recibe el nombre de problema de Programación Lineal Entera Mixta. Esta clasificación incluye modelos que además de tener variables enteras no negativas y variables continuas, tienen también variables binarias (Hillier y Lieberman, 2002).

Los problemas de programación con enteros se formulan de la misma manera que los problemas de programación lineal, pero agregando la condición de que al menos alguna de las variables de decisión debe tomar valores enteros.

Se considera pertinente usar la estructura didáctica mostrada por Castillo, Conejo, Pedregal, García, y Alguacil (2002) para la clasificación de las investigaciones reales que fueron seleccionadas en este documento, dividiendo según el tipo de problema con el cual guarda relación enmarcados siempre en la programación lineal, lineal entera y entera mixta. Es decir, se agrupan de acuerdo con el

problema de transporte, el problema de la planificación de la producción, el problema de la dieta, el problema de trasbordo, el problema de la cartera de valores, problema de la mochila, identificación de síntomas relevantes, problema de academia de ingeniería, problemas de horarios y problemas de localización de planta, con independencia del tipo de programación (lineal, entera y mixta) aplicada en cada caso. Resaltando el hecho de que los problemas prácticos pueden enmarcarse en uno o varios de estos tipos de problemas típicos, así también estar representados por aplicaciones combinadas de estos casos. Enseguida se muestran solo las aplicaciones consideradas de interés en algunos de estos grupos.

Aplicaciones relacionadas al problema de transporte

Tal como lo establece la Comunidad económica Europea (2001) en el Libro Blanco sobre las políticas europeas de transporte de cara al 2010, el transporte es un factor clave en las economías modernas. Existe una contradicción permanente entre la sociedad, que exige cada vez más movilidad, y la opinión pública, que cada vez es más intolerante con las demoras crónicas y la mala calidad de algunos servicios de transporte. Como la demanda de transporte sigue aumentando, la respuesta de la Comunidad no puede ser sólo para construir nuevas infraestructuras y abrir los mercados, por consiguiente, el sistema de transporte debe ser optimizado para

satisfacer dichas exigencias así como el desarrollo sostenible, pues según Mulder (2007) uno de los principios básicos de la sostenibilidad es que el consumo de recursos debería minimizarse. Un sistema de transporte moderno debe ser sostenible desde un punto de vista económico, social y ambiental.

El transporte es tan sólo una parte de todo el sistema de distribución de la organización; se requiere de una constante atención para incorporar los cambios que constituyan y una difícil tarea para cualquier grupo de investigaciones de negocios. Por ser el transporte un componente importante y costoso de la cadena de suministro de las organizaciones, el cual puede representar un alto porcentaje del costo logístico total, deben diseñarse casi a diario las rutas con las cuales se atiende la demanda de los clientes finales o intermedios de la cadena. Es relevante tener en cuenta que el problema de transporte no siempre puede aislarse y resolverse dentro de sus propios límites.

Tal como lo plantea Moreno (2006), el problema del transporte es el clásico modelo en investigación de operaciones. Tiene la forma de un programa lineal, y se resuelve con algoritmo del transporte que mejora el desempeño del método simplex usual en programación lineal. En este documento, se revisan los antecedentes de la modelación del autotransporte tanto para pasajeros como para carga, y presenta las diferencias básicas entre ambos, así como la comparación de los aspectos metodológicos relevantes, con la

finalidad de abordar la modelación del autotransporte de carga con mejores posibilidades de lograr representaciones adecuadas, que sustenten pronósticos y estimaciones razonables y útiles del comportamiento de los flujos, y sus impactos en la Sociedad. De la investigación de Moreno (2006) se considera pertinente resaltar: a) para el caso del transporte de carga, la modelación resulta más complicada que para el caso del movimiento de pasajeros. El rasgo básico del movimiento de carga es que su generación no se determina por un único agente, como en el caso de los pasajeros, sino por una diversidad de actores (productores, consumidores, cargadores, transportistas, autoridades viales, etc.) que usualmente persiguen objetivos distintos, y en ocasiones hasta opuestos, b) la literatura sobre modelos de transporte de carga, es relativamente menos abundante que la de pasajeros, c) una forma de abordar el modelado del transporte de carga que ha resultado de utilidad en el ambiente de ingeniería, es el enfoque sistémico, d) una imagen panorámica del sistema de transporte de carga, denominado por Moreno (2006), como diagrama de "imagen enriquecida" para el transporte de carga, es la base para identificar los elementos relevantes al objetivo de modelación, así como las variables numéricas que naturalmente se prestan para medir el desempeño de cada componente.

En este mismo orden de ideas, Baldacci, Bartolini, y Laporte (2009), publican un problema generalizado Ruteo de

Vehículos (GVRP) como una extensión del clásico problema de Ruteo de Vehículos (VRP) en la que el conjunto de vértices se divide en grupos y de los vehículos debe visitar exactamente una (o al menos uno) de vértices por racimo. El GVRP proporciona un marco útil para modelar una amplia variedad de aplicaciones. En este documento se proporcionan ejemplos de este tipo de aplicaciones y modelos, incluyen el Viajante con ganancias, varias extensiones VRP, el problema de ruteo.

En el ámbito agroindustrial López, Fernández y Plá (2004), presentan una propuesta de solución al problema de la minimización del costo del transporte de la caña de azúcar, cosechada en diferentes campos cañeros y transportados hasta un central azucarero para su procesamiento. Pretenden determinar la combinación óptima de medios de transporte (ferroviario y automotor) para minimizar los costos de transporte, y garantizar el abastecimiento horario y diario de la central azucarera. Los medios de corte, la cantidad de caña en los campos, la disponibilidad de los medios de transporte y corte, cambian frecuentemente. El modelo matemático que se plantea tiene en cuenta todos estos aspectos, lo que puede sugerir la creación de un sistema multicriterio; sin embargo, el problema puede ser resuelto con el empleo de sólo una función objetivo, controlándose el resto de los parámetros a través de las restricciones y el coeficiente de oportunidad, que se introduce en la función objetivo. La solución muestra como no siempre la transportación directa

se prefiere, pues no todas las restricciones de este grupo fueron suficientemente satisfechas y por tanto, la máxima cantidad por día no se satisface completamente. Lo más trascendente de este modelo es que le permite al directivo que realiza la planificación, elaborar los planes de transporte basándose en criterios objetivos o de aquellos que ha adquirido en su experiencia profesional, sólo que ahora, sin descuidar el costo del traslado.

En otro orden de ideas, la investigación mostrada por Montoya (2003), resalta la importancia de diferenciar el enrutamiento con la planificación del transporte. Montoya, plantea que el enrutamiento de vehículos y la planeación del transporte son dos problemas igualmente importantes, pero independientes, en la gestión de sistemas de producción automatizados. Enfatiza que a pesar de ello, éstos no han sido estudiados de manera separada en la literatura para esa fecha, e incluso este último ha sido considerado como trivial al momento de proponer métodos de solución para el enrutamiento de vehículos en sistemas relativamente pequeños. Además, en estos trabajos no se presentan ni algoritmos de enrutamiento ni técnicas asociadas para evitar los problemas de gestión de tráfico (congestión, bloqueo de rutas o colisiones entre vehículos). Estos problemas podrían ser resueltos de manera relativamente fácil en configuraciones sencillas de taller; pero se convierten en problemas graves al momento de considerar sistemas de

producción complejos (i.e. fabricación de semiconductores, donde el movimiento del trabajo en proceso es de tipo cíclico). Por lo anteriormente planteado, Montoya (2006) recomienda a los futuros investigadores focalizarse en la modelización y resolución de configuraciones particulares de la red de transporte al interior de los sistemas productivos. Otra dirección de investigación interesante sería la búsqueda de algoritmos que consideren los problemas de enrutamiento y planeación del transporte de manera simultánea. Una forma de hacerlo sería desarrollando un serie de rutas para los transportadores que serían utilizadas para establecer la planificación de los vehículos a las tareas que van a realizar. La estrategia contraria también es perfectamente válida: determinar las rutas a partir de un plan de trabajo dado.

Otra aplicación muy interesante del problema de transporte es la presentada Fry y Ohlmann (2009), la cual se debe al hecho de que el Congreso (de los Estados Unidos) aprobó en 2002, la Ley de Ayuda a América a Votar, donde las juntas electorales deben actualizar sus sistemas de votación utilizando nuevas tecnologías para el año 2006. Este cambio aumenta la complejidad operativa y logística de la administración electoral en muchas áreas. Debido a preocupaciones de seguridad y el gran tamaño de algunas máquinas de votación, que deberán ser entregadas a cada centro de votación durante el día y la hora especificada. Por lo tanto, para generar las posibles rutas de distribución

rentables, las juntas electorales deben resolver un problema difícil, la conducción de vehículos. Se diseñaron rutas para entregar las máquinas a los lugares de votación de las elecciones desde mayo de 2006. El método de solución y análisis de sensibilidad de los costos de la ruta en tiempo y las limitaciones de días de entrega. Con el análisis de sensibilidad se identificaron estrategias costo-ahorro que la Junta Electoral utiliza para negociar un protocolo de programación con los trabajadores electorales; este protocolo refleja un compromiso entre capacidad horarios de los trabajadores electorales y reducir el costo de entrega de las máquinas de votación. La Junta de Elecciones ha aplicado con éxito este nuevo método, lo que permitió una mayor flexibilidad de asignación, para la elección de mitad de período noviembre 2006.

Otra investigación de utilidad es la presentada por Ghiani, Laporte, y Semet (2006), en la cual presentan la modelación de dos problemas en secuencia, el mantenimiento de aeronaves y en el diseño de redes de telecomunicaciones, que pueden ser resueltos a través de la misma metodología. El primer problema consiste en determinar una secuencia de vuelo para las aeronaves con un límite máximo para el número de despegues y aterrizajes, así como sobre el número de horas de vuelo entre las dos conexiones sucesivas de mantenimiento. El problema de las telecomunicaciones es el diseño de redes de supervivencia utilizando la tecnología SONET con límites superiores

tanto en el número de enlaces y la longitud de la cadena entre las oficinas consecutivas. Estos investigadores, muestran que ambos problemas pueden ser vistos como una variante del famoso problema del vendedor de viaje con dos tipos de vértices (blanco y negro) y límites sobre la longitud de la cadena y el número de vértices en blanco entre dos vértices consecutivos negro. Proponen una metodología de solución de gran alcance capaz de resolver problemas de dimensiones realistas. El mismo enfoque se puede utilizar para resolver algunos casos de un problema de Ruteo de Vehículos que frecuentemente surgen en la gestión de la distribución.

En esta misma línea, Goos y Corné (2008), presentan una investigación aplicada entre los años 2004 y 2005, en la empresa Coca-Cola Enterprises (CCE). Esta organización puso en ejecución el software ruta de vehículos ORTEC. Hoy en día, más de 300 despachadores CCE utilizan este software para planificar las rutas de aproximadamente 10.000 camiones diarios. Además de manejar las restricciones no estándar, la aplicación se caracteriza por su transición progresiva de la práctica empresarial previa. CCE ha reportado un ahorro de costo anual de \$ 45 millones y grandes mejoras en el servicio al cliente. Este enfoque ha tenido tanto éxito que Coca-Cola ha extendido más allá de CCE a otras empresas embotelladoras de Coca-Cola y distribuidores de cerveza.

Como último trabajo de investigación asociado al problema de transporte, está el presentado por López y Arana (2002), lo resaltante de este trabajo, es que deja ver numerosos programas lineales que simulan problemas económicos que no guardan relación con el problema de transporte y tienen la misma estructura formal, así como otro tipo de problemas, con una estructura diferente, pero que realizándoles transformaciones se pueden lograr programas lineales cuya estructura es análoga al programa lineal que simula el problema de transporte y en consecuencia pueden ser resueltos aplicando los métodos propios del problema de transporte. Adicionalmente, esta investigación describe dos casos de aplicaciones económicas de la dualidad, es decir todo programa lineal llamado primal, lleva asociado un programa dual, de manera que al resolver el programa lineal original se obtiene una solución para su problema dual, por lo que si un problema económico puede formularse mediante un problema de programación lineal, existe otro problema económico relacionado con el inicial, que corresponde al problema dual.

Aplicaciones sobre el problema de planificación de producción

Tal como lo establece Galindo (2006), el desarrollo de las técnicas de investigación de operaciones con todas sus herramientas, y la tecnología computacional moderna, pone a la comunidad científica, técnica y empresarial, en capacidad de optimizar

los procesos productivos de manera de conseguir un buen aprovechamiento de los recursos, y un bajo costo de producción, para que los beneficios lleguen a todos, y los productos sean de un relativo bajo costo de adquisición. Este desarrollo se demuestra al observar la existencia de una extensa aplicación de estas técnicas en la planificación de la producción para infinidad de situaciones reales. En este sentido a continuación se presentan algunos de estos casos de interés en esta área.

Para Viveros y Salazar (2010), la planeación de la producción es un proceso continuo para establecer de manera anticipada aquellas decisiones que permitan optimizar el uso de los recursos productivos. Estos autores plantean un modelo de programación lineal para la planeación de la producción en un sistema multiproducto con múltiples líneas de producción de la industria de fabricación de medios de acero para la molienda de minerales. Dicho modelo se basa en el pronóstico de ventas, los inventarios iniciales de productos terminados y materias primas, la capacidad de producción instalada, así como de las rutas alternativas de producción de los productos. El modelo permite que el déficit de productos pueda suplirse en periodos posteriores cuando exista disponibilidad de recursos, entregar las tasas de producción por línea de producción, la utilización de la capacidad instalada, el balance de inventario de productos y materias primas y la planificación de las adquisiciones de

materias primas, en un horizonte de planificación anual dividido en periodos mensuales. Resultando ser una herramienta útil en la administración de producción, debido a la obtención planes de producción factibles y que no contradicen las buenas prácticas, además que a través de datos reales se determinó que el sistema es capaz de incrementar la productividad operativa en un 3,6 %, con una reducción de costos en un 5 %, esto debido al mejor uso de la capacidad y de la disminución de los inventarios a lo largo del horizonte de planificación.

Para coordinar el uso de vehículos en el área de despacho, Barrietos, San Martín, Rey y Etchepareborde (2007) plantean en primer lugar una caracterización del sistema de despacho, para detectar los principales problemas relacionados con una utilización no eficiente de los camiones. Posteriormente desarrollan una estrategia que pretende minimizar los recursos (camiones) a usar para cada jornada, considerando que la empresa tiene una flota fija de camiones por lo que era indispensable coordinar adecuadamente los despachos en el día. El modelo planteado se resolvió mediante la hoja de cálculo Excel® de Microsoft® y más particularmente con la herramienta computacional Solver®, la cual, por su fácil aplicación, se escogió conjuntamente con la gerencia de la empresa para no dar un paso demasiado grande y correr el riesgo de que el nuevo sistema de despacho no sea aceptado por los operadores. En la evaluación del sistema se compararon los resultados del modelo

con la operación real. La mejor asignación de los camiones permite un ahorro significativo que alcanza los 38,6% en el caso modelado. El modelo es muy sensible respecto a los tiempos de carga y descarga; es decir, pequeños cambios en estos tiempos pueden producir grandes modificaciones en la elección del número de camiones asignados a una faena.

Otra aplicación ejecutada con la finalidad de optimizar la planificación y la programación de la producción y mejorar la productividad, es el trabajo presentado por Bellabdaoui y Teghem (2006), donde a través de un modelo formulado con programación entera mixta se realiza la programación de la producción de colada continua para la producción de acero. La planificación de procesos se caracteriza por una serie de consideraciones: el grupo de trabajo, la interdependencia tecnológica, no hay tiempo muerto dentro de un mismo grupo de puestos de trabajo y el tiempo de procesamiento de puestos de trabajo. Este documento también presenta algunos ejemplos para ilustrar esta aplicación.

Siguiendo en el área de manufactura de acero, Cornejo y Mejía (2005) en un trabajo que trata sobre la aplicación de la programación lineal entera mixta como herramienta para la planificación de la importaciones en el contexto de una empresa dedicada a la manufactura y venta de componentes de acero. Construyen un modelo matemático que se adapta a las características de los procesos de importación de la empresa, y cuyo objetivo será decidir cuál es el plan de

importaciones con régimen aduanero definitivo que tiene costos totales mínimos. Adicionalmente, presentan los resultados del modelo comparándolo con la metodología de importación que actualmente aplica la empresa ABC S.A. El modelo propuesto muestra la posibilidad de expresar la complejidad del comportamiento de los costos en importaciones con régimen aduanero definitivo, así como los costos fijos, variables y de comportamiento mixto

Como última aplicación en el área de planificación de la producción, se presenta la investigación desarrollada por Sila, Halit, Easwaran y Burcu (2009). Este trabajo describe la investigación realizada para mejorar las actividades de la cadena de suministro de Frito-Lay, al mismo tiempo la optimización de su inventario y las decisiones de transporte. Motivado por la práctica de Frito-Lay, en primer lugar desarrollar una formulación de programación entera mixta a gran escala, con la integración de: (1) costos de inventarios, carga de camiones y los gastos de envío y los costos de millaje, (2) la producción, el almacenamiento y capacidad de camiones, y (3) las consideraciones de entrega directa (de planta a la tienda) e intercalan (de planta a planta). En segundo lugar, se presenta solución iterativa en la que descomponen el problema en el inventario y los componentes de enrutamiento. Los resultados demuestran el impacto de las entregas directas sobre los costos de distribución y demostrar que las entregas directas y eficientes de inventario y las

decisiones de enrutamiento pueden ofrecer oportunidades importantes ahorros comparado con otros modelos. La implementación del modelo permite evaluar la estrategia, el análisis de archivos de salida, y la transferencia de tecnología. Esta aplicación es especialmente útil en la evaluación de posibles lugares de entrega directa y la reducción de inventarios a lo largo de la cadena de suministro

Aplicaciones de problema de la dieta

Según Vitoriano (2009), el problema por excelencia de programación lineal es el de asignación óptima de recursos, siendo el problema de la dieta un caso particular de éste, debido a que consiste en determinar la composición de la dieta de mínimo costo que satisface las necesidades específicas de nutrientes.

Para Galindo (2006), la producción moderna de alimentos busca desarrollar y crear productos que cumplan con los requisitos nutricionales, a la vez que debe conseguirlo mediante el aprovechamiento de recursos cada vez más limitados. La programación lineal se ha empleado desde hace muchos años en la formulación de alimentos para la FAO (Organización de la Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación), y otras entidades como la UNESCO (organización de la naciones unidas para la educación, la ciencia y la cultura), para paliar el hambre en áreas desoladas por guerras, conflictos étnicos y sequías. El desarrollo de las técnicas de investigación de operaciones, permite optimizar los procesos

productivos para el aprovechamiento de los recursos y permitiendo que los costos de adquirir los productos sean bajos.

Entre las investigaciones consultadas, se encuentra Martínez (2009), el cual presenta un estudio cuyo fin es evaluar la influencia del sistema de valoración de alimentos y de necesidades nutritivas en el costo y características nutricionales de raciones para caballos estabulados, sin acceso a pastos, en diferentes estados fisiológicos (gestación, lactación, crecimiento y ejercicio ligero). Este trabajo se apoya en la programación lineal para optimizar veinticuatro raciones a un mínimo costo con uno de tres forrajes (heno de alfalfa, paja de cereales o una combinación de ambos al 50%) y catorce materias primas comúnmente usadas en España para la incorporación a concentrados granulados para caballos.

Aplicaciones relacionadas al problema de asignación de horarios

Con la finalidad de adaptar la capacidad productiva a las fluctuaciones de la demanda, a través de la mano de obra de las empresas, Muñoz y Pastor (2007), desarrollan en su trabajo modelo matemático de programación lineal entera y mixta como herramienta que permite replanificar de horarios de trabajo a partir de una planificación inicial y de los nuevos acontecimientos o previsiones, un contexto de jornada anualizada. Se concluye que dicho modelo puede ayudar a valorar económicamente los acuerdos entre patronal y representantes de los trabajadores. En cuanto al costo

económico, cada empresa deberá estudiar el costo de la replanificación y las pérdidas que le puede ocasionar no replanificar.

En el área educativa, Miranda (2010) desarrolla una investigación encaminada a resolver la coyuntura que se presenta al desarrollar programas de cursos. Las complejidades de aumento en las inscripciones y cursos manejado a través de un proceso manual de los horarios se hacía imposible de manejar. Todo esto causaba horarios inflexibles e incomodidad y descontento entre los instructores y estudiantes, por lo que se plantea la necesidad de sistema más eficiente de asignación. Considerando que los cursos varían en duración, que oscila entre 15 y 30 semanas, la fecha de inicio del curso se distribuyen en el año académico y que la fecha de inicio de cada curso es flexible y debe caer dentro de una ventana definida por la primera y la última fecha de comienzo, se presenta un sistema automatizado de cálculo que genera los horarios óptimos y tareas de todas las unidades del curso, y reduzca al máximo los costes de explotación y conflictos de horario. Al comparar los horarios generados con el modelo con los obtenidos manualmente de la unidad, se encontró que el sistema dio un ahorro medio de 35 por ciento y, además, redujo los tiempos de ejecución (para la generación de horarios) de dos semanas a menos de 30 minutos.

En esta misma línea de investigación, Saldaña, Oliva y Pradena (2007), con el objeto de minimizar la asignación en

periodos no deseados y balancear la carga de trabajo diaria para cada grupo de alumnos, formulan dos modelos de programación lineal entera para un problema de programación de horarios para Universidades y se presentan dos estrategias de solución para cada uno de ellos. Se aplicaron varios métodos; el primero asigna directamente los cursos a periodos y aulas (Timetabling), mientras que, el segundo asigna los cursos a periodos y Tipos de Aulas que posteriormente, mediante un algoritmo, realiza las asignaciones de Tipos de Aulas a Aulas específicas que pertenecen a cada Tipo (Timetabling con Tipos de Aulas). Estos permiten resolver problemas satisfaciendo un Nivel de Calidad deseado pero en un alto Tiempo Computacional. Por esta razón, se propusieron otros dos métodos que no garantizan obtener soluciones óptimas e incluso encontrar solución, estos se basan en relajar en una primera etapa restricciones que aumentan la complejidad del problema, obteniendo soluciones que permiten fijar variables y resolver en una segunda etapa problemas más pequeños para cada día. Igualmente, un método incluye asignar directamente a cada aula (Timetabling con Estrategia de Relajación) y otro, asigna inicialmente a Tipos de Aulas (Timetabling con Tipos de Aulas y Estrategia de Relajación). Con estos nuevos métodos se encontró una solución en un Tiempo Computacional razonable y satisfaciendo un Nivel de Calidad deseado.

Al comparar los métodos que incluyen una estrategia de Relajación de

Restricciones, no se puede asegurar que un método es mejor que otro en cuanto al Nivel de Calidad y Tiempo computacional, pero se puede concluir que si se dispone tiempo computacional para resolver un problema, se pueden restringir los criterios de término para obtener un mayor nivel de calidad de solución. Si se desea obtener una solución en un bajo tiempo computacional, se pueden relajar los criterios de término obteniendo una solución de un menor nivel de calidad deseado.

Aplicaciones relacionadas al problema de asignación

En este ámbito Lopez, Aronson, Carstensen y Smith (2008) presentan una investigación para resolver la problemática presentada al ofrecer proyectos de alto diseño para aproximadamente 300 personas. Los patrocinadores proporcionan a la universidad proyectos para estudiantes potenciales, tres a seis estudiantes de diferentes disciplinas deben colaborar en cada proyecto. Los estudiantes de la universidad dan una jerarquización de sus proyectos preferidos. El director del programa a continuación, selecciona un subconjunto de los proyectos, asigna a los estudiantes a los proyectos según sus preferencias, y gestiona otros requisitos, como la equiparación de los patrocinadores. La tarea de asignar a los estudiantes a los proyectos utilizados consume incontables horas al de resolverla manualmente. Algunos estudiantes estaban descontentos porque

no entendía por qué habían sido asignados a proyectos menos deseables. En este trabajo se examina un programa pragmático entera mixta para optimizar la solución a este problema. Con esta aplicación, se prestó un beneficio práctico a la Universidad, al cubrir los desafíos de modelado y los aspectos desde el diseño

hasta las aplicaciones que fueron necesarias para asegurar la implementación correcta del sistema, los cuales incluyen pruebas, la interacción con los procesos empresariales, interfaces de usuario, y la integración.

CONCLUSIONES

-Los modelos de optimización deben ser manejables, resolubles y representativos de la situación original. Según las necesidades del investigador, estas condiciones a menudo compiten entre sí, y por ello generalmente este debe sacrificarse el tiempo de procesamiento del modelo para mejorar la calidad de los resultados. Para un ingeniero industrial en muchos casos es irrelevante mejorar el tiempo de procesamiento si los resultados son eficientes en otras palabras si los resultados presentan beneficios desde el punto de reducción de costos, minimización del uso de recursos, balanceo de cargas, etc.

-Los modelos de optimización pueden representar de manera exacta los problemas reales permitiendo de esta manera implementar procedimientos exactos para la programación de la producción, programación de distribución, ruteo de vehículos, localización y distribución de planta, gestión de proyectos, gestión de proveedores, suplir nutrientes a una población con mínimo costo, entre otros.

-Con el planteamiento de los diversos modelos de optimización se pueden tomar decisiones acertadas, oportunas y con una eficiencia considerable en todos los niveles de las organizaciones, lo cual contribuye en una herramienta a considerar en el sistema de gestión en cualquier organización. En este documento se presenta solo aplicaciones de programación lineal, entera y mixta, es relevante resaltar la vigencia de estos modelos en la resolución de problemas asociados al ahorro y aprovechamiento de recursos, sin embargo, algunos casos o situaciones reales obligan a utilizar algoritmos más complejos dentro de la optimización.

Algunas investigaciones demuestran que problemas NP-difícil son resueltos con una mejor calidad de la solución si se aplican algoritmos distintos a los de programación lineal (como por ejemplo los evolutivos).

Los problemas de flujo de red incluyen el problema de transporte, el problema de asignación, el problema de camino más corto, el problema de flujo máximo, el problema de flujo de costo mínimo.

Muchas situaciones reales fácilmente son reconocidas como redes y la representación del modelo es mucho más compacta que el lineal, pudiendo ser modeladas como una red y usar algoritmos para la solución del problema de optimización más eficiente que el programa lineal

-El ingeniero industrial, cada día con más vigencia, es un profesional orientado a la optimización de los procesos y servicios con el uso de la técnicas de la investigación de operaciones, las cuales enmarcan plenamente como herramientas que contribuyen cada día más al desarrollo sostenible de las organizaciones, al hacer énfasis al aprovechamiento óptimos de los recursos disponibles en lugar de incurrir en consumos adicionales. Esto hace que su actuación este en consonancia con la tendencia actual de hacer negocios “el planeta verde”, lo cual al final del día se traduce en beneficios económicos y no económicos para todas las partes involucradas y para el ambiente. Es relevante recordar la frase anónima que reza “la tierra no la heredamos de nuestros padres sino que la tenemos prestada de nuestros hijos” es el gran reto que nos exige la sociedad actual.

-El ingeniero industrial como cualquier ser humano debe tener presente que el desarrollo sostenible es una cuestión moral que debe asumirse, para esto no existe una ruta única. La investigación de operaciones puede considerarse una disciplina cuyos métodos están alineados

con la sostenibilidad, si se considera que su basamento es el principio de la sostenibilidad que reza “el consumo de los recursos debe minimizarse”, siendo este uno de los fines más relevantes de la optimización.

-El uso de los recursos naturales así como las actividades propias del sector agropecuario, vienen de la mano con una gran diversidad de problemas de optimización por lo que es indispensable incentivar las investigaciones en estas áreas. Las investigaciones reflejan que existen países donde las políticas gubernamentales para el desarrollo sustentable se basan en metodologías científicas fuertemente apoyadas por investigadores en el área de investigación de operaciones. Sería de interés que en Venezuela se incentivaran estas iniciativas.

-La aplicación de modelos de optimización tiene una amplia contribución a la reducción de costos y al ahorro de recursos en todo tipo de organizaciones a nivel mundial, lo cual le da cada día más relevancia entre la comunidad científica internacional.

-El punto de vista europeo sobre el transporte de carga, ha estado fuertemente ligado a la tarea de armonizar los sistemas de transporte de los países de la Unión Europea, y como consecuencia de esto el ambiente europeo ha identificado tres áreas emergentes de innovación relacionadas con modelación del transporte de carga: la liga entre la economía y el movimiento de carga, el

modelado de la conducta logística y las redes y los viajes de carga. En estos aspectos las nuevas técnicas avanzadas de recolección de los datos tendrán mucha influencia en las modelaciones futuras.

-Las investigaciones evidencias que en modelado de carga existe una variedad de áreas y/o aspectos que no están debidamente representadas en los modelos. Se deben profundizar las investigaciones a nivel de las redes de muchas interacciones asimétricas entre los movimientos de carga y los de pasajeros

-Hoy día, con la aplicación de los modelos de optimización que ofrece la investigación de operaciones, es posible pensar en integrar la cadena de suministros, para optimizar la producción

en las diferentes plantas y minimizar de esta forma el costo de producción y transporte desde el inicio hasta el fin de dicha cadena.

-Muchos programas lineales que simulan problemas económicos y que no guardan relación con el problema de transporte se pueden resolver resueltos aplicando los métodos propios del problema de transporte, realizándoles transformaciones con las cuales se logren programas lineales cuya estructura es análoga al programa lineal que simula el problema de transporte. Esto hace que el problema de transporte tenga cada día más aplicaciones reales, teniendo o no relación con el propio problema.

REFERENCIAS

- Machado, C., Berti, Z., y Caraballo L. (2004). *Balance Social para la Empresa Venezolana. Modelo de la Fundación Escuela de Gerencia Social (FECS)*. Caracas, Venezuela: Fundación Escuela de Gerencia Social. Ediciones FECS.
- Server, R. y Capó, J (2009). *La Responsabilidad Social Empresarial en un contexto de crisis. Repercusión en las Sociedades Cooperativas*, CIRIEC-España, Revista de Economía Pública, Social y Cooperativa, Núm. 65, pp. 7-31. Recuperado el 26 de enero de 2011, de <http://redalyc.uaemex.mx/pdf/174/17412326002.pdf>
- Alfonzo, I. (1994). *Técnicas de investigación bibliográfica*. Caracas: Contexto Ediciones.
- Arias, F. (2006). *El proyecto de Investigación. Introducción a la Metodología Científica*. Caracas: Editorial Episteme.
- Baldacci, R., Bartolini, E., y Laporte, G. (2009). *Some applications of the generalized vehicle routing problem*. Journal of the Operational Research Society, Vol. 61, pp. 1095-1103.
- Barrietos, A., San Martín, R., Rey, P. y Etchepareborde, E. (2007). *Diseño de una Estrategia de Despacho que Permita un Aumento de Producción y Colocación a Través de una Mejor Utilización de los Camiones*. Santiago de Chile: Repositorio Académico Universidad de Chile. Recuperado el 16 de agosto de 2010, de http://www.cybertesis.cl/tesis/uchile/2007/etchepareborde_ee/html/index-frames.html
- Bellabdaoui, A. y Teghem, J. (2006). *A mixed integer linear programming model for the continuous casting planning*. International Journal of Production Economics, Vol. 104, pp. 260-270.

- Caballero, J. y Grossmann, I. (2007). *Revisión del estado del arte en optimización*. Revista Iberoamericana de Automatización e Informática Industrial, Vol. 4, pp. 5-23. Recuperado el 01 de septiembre de 2010 de http://apps.elsevier.es/watermark/ctl_servlet?_f=10&pident_articulo=90083526&pident_usuario=0&pcontactid=&pident_revista=331&ty=42&accion=L&origen=elsevier&web=www.elsevier.es&lan=es&fichero=331v04n01a90083526pdf001.pdf
- Castillo, E., Conejo, A. J., Pedregal, P., García, R. y Alguacil, N. (2002). *Formulación y resolución de modelos de programación matemática en ingeniería y ciencia*. España.
- Cornejo, C., y Mejía, M. (2005). *Formulación de un modelo de programación lineal entera mixta para la planeación de las importaciones en régimen aduanero para una empresa de producción*. Lima Perú, Industrial Data Revista de investigación. Universidad Nacional Mayor de San Marco. Recuperado el 01 de Agosto de 2010, de: <http://redalyc.uaemex.mx/pdf/816/81680209.pdf>
- D'Armas, M. (2005). *Estado de arte de la programación de operaciones con tiempos de preparación. Tema para futuras investigaciones (parte I)*. uct, vol. 9, No. 33, pp. 42-48. Recuperado el 4 de agosto de 2010, de: http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-48212005000100008&lng=pt&nrm=iso
- Comunidad Economica Europea (2001). *Libro blanco del transporte de cara al 2010*. Bruselas: CEE.
- Ferrel, M. (1996). *Historia, desarrollo y alcance de la ingeniería industrial*. En W. Hodson, Manual del Ingeniero Industrial (págs. 1.3-1.11). Mexico: Mc-Graw Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V.
- Forética, (2008). *Sistema de gestión ética y socialmente responsable*. SGE 21. Madrid: Forética. Foro para la Evaluación de la Gestión Ética.
- Fry, M. J., y Ohlmann, J. W. (2009). *Route Design for Delivery of Voting Machines in Hamilton County, Ohio*. Interfaces , 443-459.
- Galindo, M. (2006). *Producción de alimentos apoyada con programación lineal*. Guatemala Universidad Rafael Landívar: Boletín electrónico Ingeniería Primero, pp. 1-9.
- Ghiani, G., Laporte, F., y Semet, F. (2006). *The Black and White Traveling Salesman Problem*. Operation Research, Vol. 54 , pp. 366-378.
- Gómez, T. (2002). *Ecología Industrial. Producción Industrial Sostenible*. En Capuz, S y Gómez, *Ecodiseño: Ingeniería del ciclo de vida para el desarrollo de productos sostenibles* (pp. 21-42). España: Universidad Politecnica de Valencia.
- González, J., y Ríos, R. (1999). *Investigación de Operaciones en Acción: Aplicaciones del TSP en problemas de manufactura y logística*. Ingenierías, 2 (4), 19-20. Recuperado el 12 de agosto de 2010, de: <http://yalma.fime.uanl.mx/~roger/work/Papers/article/article-inge-1999.pdf>
- Goos, M. J., y Corné, A. (2008). *Coca-Cola Enterprises Optimizes Vehicle* . Interfaces , 40-50.
- Hillier, F., Lieberman, G (2002). *Introducción a la Investigación de Operaciones*. Mc. Graw.Hill. México. 7ma. Edición.
- Linares, P., Ramos, A., Sánchez, P., Sarabia y A., Begoña, V., (2001). *Modelos Matemáticos de Optimización*. Universidad Pontificia de Comillas, Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Madrid, España. Recuperado el 15 de julio de 2010 en http://www.gams.com/docs/contributed/modelado_en_gams.pdf
- López, E., Fernández, S. M., & Plá, L. M. (2004). *El problema del transporte de la caña de azúcar en cuba*. Revista de Investigación operacional. Vol 25. N° 2 , pp. 148-157.

- López, F., y Arana, G. (2002). *La Dualidad en el Problema de Transporte*. Vigo: II Conferencia de Ingeniería de Organización. IO. Pp.681-688. Recuperado el 03 de agosto de 2010, de http://adingor.es/congresos/web/uploads/cio/cio2002//metodos_cuantitativos/C081.pdf
- López, L., Aronson, M., Carstensen, G., y Smith, C. (2008). *Optimization Support for Senior Design Project Assignments*. Interfaces 38, 448-464.
- Martínez, A. (2009). *Nrc e inra para raciones de caballos de ocio basadas en forrajes secos y concentrados granulados*. Cordova España: Universidad de Córdoba. Archivos de Zootecnia 58, pp. 333-344. Recuperado el 04 de septiembre de 2010, de http://www.uco.es/organiza/servicios/publica/az/php/az.php?idioma_global=0&revista=151&codigo=1753
- Miranda, J. (2010). *eClasSkeduler: A Course Scheduling System for the Executive Education Unit at the Universidad de Chile*. Interfaces 40, 196-207.
- Montoya, J. R. (2003). *Planeación de la producción y enrutamiento de vehículos en sistemas de producción*. Panorama actual de trabajo y algunas proposiciones. Barranquilla. Colombia: Universidad del Norte, Ingeniería y desarrollo, 85-97.
- Moreno, E. (2006). *Análisis comparativo de la Modelación del Autotransporte: carga vs Pasajeros*. México: SCT. Publicación técnica N. 300. Recuperado el 01 de septiembre de 2010, de http://www.imt.mx/SitioIMT/Publicaciones/frmPublicacion.aspx?ID_CON_Seccion=4
- Mulder, K. (2007). *Desarrollo sostenible para ingenieros*. Barcelona, España: Universitat Politècnica de Catalunya. Ediciones UPC.
- Muñoz, M., y Pastor, R. (2007). *Replanificación de horarios de trabajadores en el contexto de la anualización de la jornada laboral*. Universitat Politècnica de Catalunya. Recuperado el 20 de agosto de 2010, de <http://hdl.handle.net/2099.1/5961>
- Niebel, B., y Freivalds, A. (2009). *Ingeniería Industrial. Métodos, estándares y diseño del trabajo*. México: McGraw-Hill/Interramericana Editores, S.A. de CV.
- Saldaña, A., Oliva, C., y Pradena, L. (2007). *Modelos de Programación Lineal Entera para un problema de Programación de Horarios para las Universidades*. Revista Chilena de Ingeniería, 245-259.
- Sellie, C. (1996). *Organización para la Ingeniería Industrial*. En H. William, Manual del Ingeniero Industrial (págs. 2.3-2.21). México: McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V.
- Sila, C., Halit, U., Easwaran, G., y Burcu, K. (2009). *An Integrated Outbound Logistics Model for Frito-Lay: Coordinating Aggregate-Level Production and Distribution Decisions*. Interfaces, 460-475.
- Vitoriano, B. (2009). *Modelos operativos de gestión*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid. Recuperado el 24 de Agosto de 2010, de http://www.mat.ucm.es/~bvitoria/Archivos/Apunte%20MOG_UCM.pdf
- Viveros, R., y Salazar, E. (2010). *Modelo de Planificación de Producción para un Sistema Multiproducto con Múltiples Líneas de Producción*. RIS. Revista Ingeniería de Sistemas, 89-102.

Autora

Yeicy Bermúdez Colina. Ingeniero Industrial. Magister en Ingeniería Industrial. Cursante del Programa de Doctorado en Ingeniería, área: Industrial. Docente-Investigadora del Departamento de Gerencia de la Escuela de Ingeniería Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo – Valencia, Venezuela.

E-mail: yeisybermudez@gmail.com

Recibido: 21/04/2011

Aceptado: 29/11/2011