

Investigación Operativa y la Toma de Decisiones – una Experiencia

Nelson Maculan

Profesor Titular – Universidad Federal de Río de Janeiro

Desde 1969 he sido atraído por los estudios de los problemas de decisiones en distintos sectores de las actividades humanas. Esos estudios me llevaron a trabajar con modelos matemáticos que buscan soluciones óptimas o que mejoran algún o algunos criterios (objetivos). Es evidente que para solucionar esos modelos de optimización, el uso de los algoritmos de programación matemática (programación lineal, entera, no lineal, grafos, etc.) es necesario. Mi especialización académica es la programación matemática. La simulación discreta es otra técnica que he utilizado.

De Julio de 1969 a Julio de 1971 trabajé en una empresa de computación y análisis de datos (STAD) en Paris. Era un ingeniero técnico-comercial. En la STAD había una computadora “muy grande” UNIVAC 1108 (12 lectores de cintas magnéticas, tambores: “FASTRAND” de dos toneladas – 136 millones de bytes y una instalación en 500m²). Allí había *softwares* para cálculo de estructura metálica y de hormigón en tres dimensiones: elementos finitos; éramos pioneros así como MIT, IBM. Desarrollamos también programas para Programación Lineal (PL), PL entera y grafos (transportes). La STAD fue creada para vender tiempo de CPU! Creo que el costo de un segundo era 2,00FF (francos franceses); Ya se hacía mucha cosa con un segundo!

Uno de nuestros clientes tenía su oficina en la ciudad de Orleáns y yo iba algunas veces de tren de Paris hasta Orléans, volviendo a Paris el mismo día. En uno de esos viajes había en mi compartimento una persona que era técnico en construcción civil e tenía problema de decisión para elegir las barras de acero de una viga de hormigón armado: había distintas posibilidades factibles (todas combinatorias). Las barras de acero están en el mercado con diámetros predefinidos en milímetros o pulgadas. La solución de un cálculo de dimensionamiento de una sección de una viga de hormigón indica el área que debe ser de acero y muestra también la distribución espacial de esas barras de acero. Tomé sus resultados de un cálculo de resistencia de los materiales y creé un programa de enumeración implícita (“*branch-and-bound*”) para solucionar un modelo de programación lineal 0-1. Pasé todos los resultados a ese técnico; algún tiempo después él me dijo que logró una economía de 15%. Ese fue un primer trabajo en investigación operativa o de teoría de la decisión. En esa época parisiense he participado de la construcción de los grandes *softwares* para programación lineal y entera, cuyos mayores interesados eran las empresas petroleras. He aprendido mucho con los matemáticos, analistas numéricos, ingenieros. Éramos todos analistas de sistemas, ingenieros y programadores.

En la STAD he hecho cálculos de torsión (modelos de Saint Venant) para estructuras metálicas y de hormigón armado (¡modelos de ecuaciones

diferenciales no lineales!), un sistema de pago de salarios, cálculos científicos, de gestión, de contabilidad, y los primeros sistemas de reservas en hoteles ("Vacances 2000"). Fueron dos años muy interesantes para mi formación (de los 26 a los 28 años).

Al regresar a Brasil, en Julio 1971, empecé a trabajar en la Facultad de Postgrado de Ingeniería – COPPE, de la Universidad Federal de Río de Janeiro: de Agosto 1971 hasta Marzo 1973, en el Programa de Ingeniería de Producción y, desde esa fecha hasta hoy, en el Programa de Ingeniería de Sistemas y Computación. Pero mis clases de grado las he hecho en el Instituto de Matemática y en la Escuela Politécnica de la misma Universidad.

Mi primer trabajo de aplicación en un problema de toma de decisión en Brasil fue a fines de 1971 y está asociado a un modelo matemático de optimización, con el objetivo de estudiar las políticas de transporte para el Nordeste de Brasil. Debíamos proponer una distribución de 14 productos del nordeste, considerando demandas y ofertas, tanto locales como no locales. El modelo consideraba 2000 variables y una centena de restricciones. La selección de polos de trasbordo fue política, esto causó grandes discusiones debido a la fuerte tendencia regional. Consideramos también una formulación dinámica con las proyecciones del crecimiento de demandas y de ofertas, utilizando modelos cronométricos. A algunos de los gestores les gustaba imponer costos en la función objetivo, tales que sus deseos fueran atendidos. En la reunión final para entrega del trabajo, llevamos todos los datos y *softwares* utilizados en un disco magnético. Uno de los gestores responsables quería también las tarjetas perforadas, quería todo el producto.

De 1972 a 1973 desarrollé cuatro "grandes" modelos matemáticos (carbón, gas, petróleo, hidráulica) para la matriz energética de Brasil. Había muy pocos profesionales que conocían los *softwares* (MPS) de programación matemática. La "matriz energética" era un proyecto estratégico para Brasil en una época de dictadura militar. No he podido ser contratado como ingeniero (consultor): el temido servicio nacional de informaciones (SNI) había dicho que yo era un elemento subversivo. Gracias a la creatividad de los que me querían contratar, he sido contratado como técnico en computación de nivel medio. He aprendido a generar datos en formato MPS. He pasado muchas noches y madrugadas al lado de la computadora.

Las primeras clases que di en la Universidad Federal de Río de Janeiro fueron de Simulación Discreta, para el Programa de Magíster en Ingeniería de Producción. Había de 30 a 40 alumnos, de los cuales dos muy interesados en el estudio de simulación del flujo de la red telefónica (distribución Erlang, teoría de las colas de espera). Ellos me llevaron a conocer una central telefónica (electro-mecánica, una joya de la tecnología de los años 70) de la TELERJ (compañía telefónica de Río de Janeiro). Desde esa época he trabajado en problemas de gestión, dimensionamiento y expansión de redes de telecomunicaciones. Además de TELERJ, he desarrollado varios proyectos de investigación operativa para EMBRATEL (hoy mexicana) y France Télécom. Mi conocimiento adquirido en la generación automática de columnas en

programación lineal entera se debe a los trabajos desarrollados en las telecomunicaciones.

Entre 1976 y 1979, con colegas de TELERJ, trabajamos en distintos modelos para la gestión de esa empresa. Un problema importante estaba asociado a las pérdidas con los cortes de cables telefónicos, las demandas eran de distintos tamaños. Los cables estaban en bobinas de madera. Esas bobinas dispuestas en pilas se pudrían con el tiempo. Nuestro modelo era de bicriterio. Para su resolución, desarrollamos un algoritmo heurístico polinomial, garantizando, a priori, una distancia máxima de la solución óptima, para la búsqueda de un punto de Pareto. Los resultados obtenidos con ese modelo empezaron a ser aplicados en TELERJ en Junio de 1977; de esa fecha hasta agosto de 1979, hubo una reducción de bobinas almacenadas de 87% y TELERJ hizo una economía de US\$ 30 millones. La parte teórica de ese algoritmo nos regaló con un bello artículo en los *Annals of Discrete Mathematics*, en 1981.

Cuando yo enseñaba la asignatura Investigación Operativa (1 o 2) para los estudiantes de Ingeniería de Producción de la Escuela Politécnica de la UFRJ en los años 70, a fines de esa clase, uno de esos estudiantes me dijo: “Mi padre y yo estamos dispuestos a fabricar bolsas de papel para los supermercados y queremos minimizar las pérdidas de papel en el proceso industrial”. Era un problema de cortes en dos dimensiones, cortes guillotizados. Con algunas ideas más, desarrollamos un modelo del tipo *Gilmore-Gomory* (1961 y 1963) para cortes de dos dimensiones. Él programó y logró utilizar los resultados con éxito en el proceso industrial y obtuvo una buena economía (5%) en las pérdidas de papel.

En la grande inundación de 1986, una catástrofe, participé de un grupo de colegas que propuso soluciones logísticas para las fuertes lluvias. Utilizamos un algoritmo de camino mínimo con restricciones en los arcos (túneles, puentes, etc.).

Entre 1987 y 1988, con colegas de la Universidad Federal de Viçosa (Estado de Minas Gerais, cuya capital es Belo Horizonte), hicimos estudios de árboles de Steiner en grafos para la localización de hornos para la fabricación de carbón de eucaliptos. Todo ese carbón era para una gran siderúrgica. Nuestros modelos también proponían soluciones para el reforestamiento y un mejor cronograma para los cortes de los árboles, considerando el medio ambiente.

En 1988, una aplicación muy interesante fue desarrollada en una fábrica de papel. El director técnico de esa industria (papelera) deseaba minimizar las pérdidas de papel cuando hacía los cortes de una bobina grande para formar bobinas pequeñas (rollos de papel) para el mercado. Hicimos un modelo que necesitaba generación automática de columnas para la solución y propusimos una secuencia de esos cortes, minimizando el tiempo total de corte para toda la bobina grande (TSP – Problema del Vendedor Viajero). Cuando todo estaba solucionado de manera teórica, fuimos a visitar esa industria. Verificamos que el problema principal no fuera estudiado; había un problema de cuello de

botella, el número de las bobinas grandes que estaban en línea era pequeño. Eso no permitía un flujo continuo de fabricación, cuyas pérdidas en pesos eran mucho más grandes que las producidas por los cortes para formar rollos de papel para el comercio. Si hubiera un tiempo un poco más grande en los cortes de una bobina grande, todo el proceso industrial se pararía. Un nuevo modelo de programación lineal entera con su función objetivo formada por una combinación lineal entre dos criterios fue utilizado. La solución de ese modelo nos dio un punto de Pareto que mejoró la eficiencia del proceso industrial.

A partir del segundo semestre de 1994, con la entrada de nuevas tecnologías, propuse nuevos modelos matemáticos para la expansión de redes de telecomunicaciones de France Télécom y de EMBRATEL.

Hoy estamos aplicando modelos de programación matemática (optimización), ya utilizados en la ciudad de Fortaleza, para combatir el mosquito "Aedes aegypti", transmisor de la dengue, en la ciudad de Río de Janeiro. Desarrollamos modelos de optimización global para el estudio en tres dimensiones de las estructuras de proteínas así como para minimizar los efectos colaterales en cirugías para extracción de tumores cerebrales.

Asunción, Paraguay, 2010