

Enfoque Conceptual de la Optimización Simultánea de Layout y Diseño de las Instalaciones mediante GDP Considerando el Riesgo Tecnológico

A Conceptual Approach of the Simultaneous Optimization of Layout and Facilities Design through GDP Considering Technological Risk

Presentación: 4 y 5 de octubre de 2022

Doctorando:

Santiago Orellano

Centro de Aplicaciones Informáticas y Modelado en Ingeniería (CAIMI), Facultad Regional Rosario, Universidad Tecnológica Nacional - Argentina
santiago.orellano93@gmail.com

Director:

Nicolás José Scenna

Codirector:

Néstor Hugo Rodríguez

Resumen

Un adecuado diseño del layout de planta contribuye a reducir costos y el riesgo tecnológico. En las últimas décadas surgieron modelos de optimización de layout basados en programación matemática buscando minimizar costos o el riesgo (o bien restringiéndolo). El denominador común de estas formulaciones es que el diseño interno de las instalaciones es conocido previo a la optimización del layout. En esa secuencia de diseño surgen un conjunto de trade off no evaluados que afectan tanto al costo total como al riesgo. En este trabajo, se desarrolla un marco general para optimizar el diseño de las instalaciones en simultáneo con el layout general de planta. Un modelo general en su forma GDP es propuesto con esta finalidad. El acople de los modelos es aplicado a un caso de estudio particular, optimizando el diseño del almacenamiento de GLP y el layout de un parque de tanques.

Palabras clave: Optimización de layout, Riesgo, QRA, MILP, GDP

Abstract

An adequate design of the plant layout contributes to reduce costs and technological risks. In recent decades different layout optimization models based on mathematical programming have been proposed to minimize costs and/or risks (or constraining it). The common denominator of these formulations is that the internal design of the facilities is known prior to layout optimization. In this design sequence, a set of unassessed trade-offs arise that affect both total cost and risk. In this work, we seek to develop a general framework to optimize the internal design of the facilities simultaneously with the general plant layout. A general model in its GDP form is developed for this purpose. The simultaneous execution of both models is applied to a particular study case for the optimization of the LPG storage and the layout of a set of flammable substances in a tank farm.

Keywords: Layout optimization, Risk, QRA, MILP, GDP

Introducción

En el diseño de plantas, la técnica de ejecución actual en prácticamente todas las organizaciones consiste en potenciar la conexión entre las etapas de diseño, buscando la interacción de ingeniería en las primeras etapas del proceso para evitar problemas posteriores (Mannan, 2005). En este proceso secuencial, desde el diseño conceptual de las instalaciones (proceso, almacenamiento, entre otros), hasta el diseño/optimización del layout, el impacto de las decisiones tomadas en etapas tempranas puede manifestarse en términos económicos, o bien en el riesgo en etapas posteriores. En este contexto, surge la necesidad de desarrollar estrategias tendientes a acoplar las etapas de diseño, buscando obtener diseños óptimos de las distintas etapas en simultáneo. A partir de esto, el objetivo de este trabajo consiste en el desarrollo y presentación conceptual de la vinculación de la optimización del layout y del diseño interno de las instalaciones que lo componen. A continuación, presentamos un modelo GDP para la optimización del layout general de planta (blockout) y una sistematización del acople de modelos de toma de decisiones asociadas al diseño conceptual de las instalaciones.

Desarrollo

La programación disyuntiva generalizada (GDP) constituye una valiosa herramienta para modelar problemas de optimización discreta-continua (Raman & Grossmann, 1994). Los modelos GDP pueden reformularse como modelos MILP (o MINLP) o resolverse con algoritmos especializados (Vecchietti et al., 2003). A continuación, se presenta el modelo de optimización de layout considerando distancias de separación fijas en su forma GDP.

Modelo de Optimización de Layout

En este modelo de optimización de layout, el objetivo es minimizar los costos asociados a la interconectividad de las unidades (C^C) y los costos del terreno ocupado (C^A) -Ec. 1-. La estimación del costo del terreno ocupado incluye la bilinealidad del producto de los lados. Se linealiza según los planos que describen la envoltura de McCormick -Ecs. 2 y 3-. Los costos de interconectividad son estimados según las Ecs. 4, 5, 6 y 7. Donde, c_{ij}^{conec} representa el costo de interconexión entre las unidades i y j por unidad de longitud, bc_{ij} es un parámetro que adquiere el valor uno si las unidades i y j están conectadas o cero de otro modo. Las ecuaciones 5 a 7 fueron propuestas por Papageorgiou & Rotstein, (1998) para evitar el uso del valor absoluto o la inclusión de variables binarias. Las variables r , l , a y b son positivas; como la función objetivo tiende a minimizar los costos de interconexión, dos de ellas se harán cero.

Se definen los límites del terreno a partir de las Ecs. 8, 9, 10 y 11. La posibilidad de rotación de las instalaciones se incorpora mediante la disyunción 12, donde P_i es una variable booleana. La disyunción 13 se incorpora para evitar el solapamiento de las instalaciones, y la garantía de una distancia mínima entre las unidades i y j ($dmin_{ij}$).

$$\text{Min } C = C^A + C^C \quad (1)$$

$$\text{s.t. } C^A = c_t W \quad (2)$$

$$\left[\begin{array}{c} Y_1 \\ xt_1^{lo} \leq xt \leq xt_1^{up} \\ W - xt_1^{lo} yt + xt yt^{lo} - xt_1^{lo} yt^{lo} \geq 0 \\ W - xt_1^{up} yt + xt yt^{up} - xt_1^{up} yt^{up} \geq 0 \\ W - xt_1^{lo} yt + xt yt^{up} - xt_1^{lo} yt^{up} \leq 0 \\ W - x_1 yt^{lo} + xt_1^{up} yt - xt_1^{up} y^{lo} \leq 0 \end{array} \right] \vee \dots \vee \left[\begin{array}{c} Y_m \\ xt_m^{lo} \leq xt \leq xt_m^{up} \\ W - xt_m^{lo} yt + xt yt^{lo} - xt_m^{lo} yt^{lo} \geq 0 \\ W - xt_m^{up} yt + xt yt^{up} - xt_m^{up} yt^{up} \geq 0 \\ W - xt_m^{lo} yt + xt yt^{up} - xt_m^{lo} yt^{up} \leq 0 \\ W - x_m yt^{lo} + xt_m^{up} yt - xt_m^{up} y^{lo} \leq 0 \end{array} \right] \quad (3)$$

$$C^C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij}^{conec} l_{ij} bc_{ij} \quad (4)$$

$$r_{ij}^c - l_{ij}^c = x_i - x_j \quad \forall i, j \in N / i < j \quad (5)$$

$$a_{ij}^c - b_{ij}^c = y_i - y_j \quad \forall i, j \in N / i < j \quad (6)$$

$$l_{ij} = r_{ij}^c + l_{ij}^c + a_{ij}^c + b_{ij}^c \quad \forall i, j \in N / i < j \quad (7)$$

$$X_i \geq x_i + 0,5lh_i + dlim_i \quad \forall i \in N \quad (8)$$

$$x_i \geq 0,5lh_i + dlim_i \quad \forall i \in N \quad (9)$$

$$Y_i \geq y_i + 0,5lv_i + dlim_i \quad \forall i \in N \quad (10)$$

$$y_i \geq 0,5lv_i + dlim_i \quad \forall i \in N \quad (11)$$

$$\left[\begin{array}{c} P_i \\ lh_i = a_i \\ lv_i = b_i \end{array} \right] \vee \left[\begin{array}{c} \neg P_i \\ lh_i = b_i \\ lv_i = a_i \end{array} \right] \quad \forall i \in N \quad (12)$$

$$\left[\begin{array}{c} R_{ij} \\ x_i \geq x_j + \frac{lh_i + lh_j}{2} + dmin_{ij} \end{array} \right] \vee \left[\begin{array}{c} L_{ij} \\ x_j \geq x_i + \frac{lh_i + lh_j}{2} + dmin_{ij} \end{array} \right] \quad (13)$$

$$\vee \left[\begin{array}{c} U_{ij} \\ y_i \geq y_j + \frac{lv_i + lv_j}{2} + dmin_{ij} \end{array} \right] \vee \left[\begin{array}{c} D_{ij} \\ y_j \geq y_i + \frac{lv_i + lv_j}{2} + dmin_{ij} \end{array} \right] \quad \forall i, j \in N / i < j$$

Si bien la disyunción 13 es presentada aquí mediante cuatro variables booleanas (R_{ij} , L_{ij} , U_{ij} y D_{ij}), esta ha sido reformulada a través de la relajación BigM mediante la utilización de sólo dos variables binarias según lo propuesto por Papageorgiou & Rotstein, (1998) puesto que en este caso en particular ha mostrado una mejor performance que otras reformulaciones como el BigM tradicional, la reformulación hull y el método de planos de corte extendido (extended cutting plane) que combina las ventajas de los últimos dos métodos.

El modelo presentado hasta aquí considera similares parámetros de entrada y variables de salida que los modelos de optimización de layout existentes. La propuesta de este trabajo implica la inclusión del modelo de optimización interna de las instalaciones según se indica en el siguiente apartado.

Modelo de Optimización del Diseño Interno de las Instalaciones

Consideremos las instalaciones correspondientes al almacenamiento de sustancias peligrosas. Las variables que conectan el diseño de una instalación de almacenamiento y el layout general de la planta son las dimensiones y la distancia mínima desde esta unidad hacia las demás. En el modelo de layout presentado previamente, a , b y $dmin_{ij}$ eran parámetros que ingresaban al modelo. En este caso son variables determinadas por el diseño de la unidad en particular. Si para la unidad q existen M_q diseños factibles, entonces podríamos incluir su diseño a través de la disyunción 14. Obsérvese que a partir de la inclusión de ésta en el modelo de optimización de layout y del costo del diseño (c_q) en la función objetivo, es posible optimizar en simultáneo el layout de la planta y el diseño de la instalación en cuestión (q).

Donde D_{qm} es una variable Booleana que es verdadera si la unidad q es diseñada satisfaciendo las restricciones del término m de la disyunción. \underline{x}_q es el conjunto de variables que definen el diseño de la unidad q . $\Psi_{qm}^{w'}$ representa al conjunto de restricciones que relacionan las variables de diseño (ecuaciones de diseño, normativas/reglamentaciones, entre otras). En el caso que sean lineales, podrían ser representadas por $A_{qm} \underline{x}_q \geq \varepsilon_{qm}$. a_q y b_q son los lados de la instalación q que pueden ser determinados a través de las funciones f_{qm}^u y g_{qm}^v .

$$\forall_{m \in M_q} \left[\begin{array}{l} D_{qm} \\ \psi_{qm}^{w'}(\underline{x}_q) \geq \varepsilon_{qm} \\ a_q \geq f_{qm}^u(\underline{x}_q) \\ b_q \geq g_{qm}^v(\underline{x}_q) \\ dmin_{qj} \geq h_{qmj}^w(\underline{x}_q) \\ dlim_q \geq e_{qm}^z(\underline{x}_q) \\ \forall Y_{qmt} \\ c_q = \gamma_{qm}(\underline{x}_q) \end{array} \right] \quad q \in Q \quad (14)$$

En principio, entre las funciones $\psi_{qm}^{w'}$, f_{qm}^u y g_{qm}^v debe incluirse una referenciación en el plano de las unidades que lo componen. Existen ciertas sustancias que, dadas sus características (líquidos inflamables -volátiles o no-) pueden ser modeladas como un único bloque, y ser resuelto su diseño mediante un enfoque de asignación, sin necesidad de una referenciación directa en el plano. En ese caso, es posible considerar al conjunto dentro de un endicamiento, facilitando el desarrollo de las alternativas de diseño. En trabajos anteriores (en proceso de publicación) hemos desarrollado tal modelo para líquidos poco volátiles. En este caso, el objetivo es presentar una generalización del enfoque, y aplicarlo a un caso particular (almacenamiento de gases licuados), donde el endicamiento es virtualmente irrelevante y, por lo tanto, la referenciación en el plano de la división de inventario no resulta directa. De hecho, el diseño de esta unidad requiere del desarrollo de un modelo de optimización de layout interno de la unidad similar al presentado anteriormente. Este podría modelarse a través de un enfoque de asignación considerando un conjunto de estructuras predefinidas -esta metodología de modelado será analizada en trabajos futuros-.

Las funciones h_{qmj}^w y e_{qm}^z representan modelos de estimación de distancias de seguridad desde la unidad q hacia la unidad j considerando el diseño m . Este puede ser representado mediante un modelo de evaluación de consecuencias donde pueda explicitarse la distancia hacia donde se manifiesta un determinado nivel de impacto ante un evento accidental, o bien un modelo que incluya la estimación cuantitativa del riesgo hacia la unidad j . Estas funciones han sido desarrolladas en trabajos previos para los eventos pool fire, BLEVE, entre otros. En este trabajo, los distanciamientos mínimos serán considerados según reglamentaciones internacionales.

Las disyunciones $\forall Y_{qmt}$ representan las disyunciones que se requerirán para el diseño interno (m) de la unidad q . La variable c_q refiere al costo del diseño de la unidad q que puede ser representado mediante una función γ_{qm} .

Una de las variables de diseño más influyentes en las dimensiones y en la distancia de seguridad es el número de unidades en que se almacena cierta sustancia. Considerando esto, aplicaremos el modelo general desarrollado a un caso en particular para ejemplificar su uso.

Caso de Estudio

Se requiere optimizar el layout de un conjunto de tanques atmosféricos de sustancias inflamables, según la Tabla 1 y, en simultáneo el layout y diseño del almacenamiento de un volumen de 2000 m^3 de GLP en tanques esféricos.

Tabla 1. Tanques del caso de estudio

Sustancia (número)	D (m)	h (m)	Lado menor (m)	Lado mayor (m)	Vol. tanque (m^3)	$dmin$ atmosf. (15 kW/m^2)	$dlim$ (5 kW/m^2)
Crudo (3)	20	11,35	47	140	3565,71	27,67	60,18
Diesel (2)	18	10,25	40	80	2608,31	21,54	46,84
Etanol	10	11,3	23	23	887,50	8,00	17,41
Fuel Oil	15	11,3	35	35	1996,87	21,72	47,24
Kerosene	9	10,67	20	20	678,80	16,12	35,05

Las principales variables que definen el diseño del almacenamiento de LPG son: el número de tanques, el volumen de cada tanque, su diámetro y sus coordenadas. La aplicación de la disyunción 14 al caso en particular podría

representarse a partir de las siguientes ecuaciones. El conjunto de restricciones $\Psi_{qm}^{w'}$, representa al conjunto de ecuaciones que definen el diseño cuando m tanques son escogidos, incluyendo a las Ecs. 15 a 21. Obsérvese que las restricciones de igualdad pueden ser representadas mediante dos desigualdades, y que las Ecs. 15 a 21 pueden representarse según la forma genérica presentada ($\Psi_{qm}^{w'}$).

$$v^{LPG} = \frac{4}{3} \pi (D^{LPG})^3 \quad (15)$$

$$vop^{LPG} = \chi^{LPG} v^{LPG} \quad (16)$$

$$n^{LPG} vop^{LPG} = Vt^{LPG} \quad (17)$$

$$n^{LPG} = \eta_m^{LPG} \quad (18)$$

$$x_l^{LPG} \geq 0,5 D^{LPG} \quad \forall l \in L_m \quad (19)$$

$$y_l^{LPG} \geq 0,5 D^{LPG} \quad \forall l \in L_m \quad (20)$$

$$dmin_{ls}^{LPG} = dt(v^{LPG}, D^{LPG}) \quad (21)$$

Donde v^{LPG} es el volumen total de cada tanque, D^{LPG} el diámetro, vop^{LPG} el volumen operativo, χ^{LPG} el grado de llenado, n^{LPG} el número de tanques y η_m^{LPG} un parámetro que asocia el término de la disyunción con el número de tanques correspondiente. x_l^{LPG} e y_l^{LPG} representan las coordenadas del centro geométrico del tanque l respecto al vértice inferior izquierdo del bloque “tanques de LPG”, siendo L_m el conjunto de tanques adoptados. La función $dt(v^{LPG}, D^{LPG})$ representa la distancia mínima entre tanques, adoptada según el código del GLP (NFPA 58, 2017).

El conjunto de restricciones $f_m^{u,LPG}$ y $g_m^{v,LPG}$ incluye las Ecs. 22 y 23. En este caso, las disyunciones $\forall Y_{mls}^{t,LPG}$ incluyen a la disyunción de no solapamiento, garantizando un distanciamiento entre los tanques, similar a la Ec. 13.

$$a^{LPG} \geq x_l^{LPG} + 0,5 D^{LPG} \quad \forall l \in L_m \quad (22)$$

$$b^{LPG} \geq y_l^{LPG} + 0,5 D^{LPG} \quad \forall l \in L_m \quad (23)$$

El conjunto de restricciones $h_m^{w,LPG}$ es extraído de NFPA 58, (2017), siendo $dmin_{j,LPG} \geq h_m^{w,LPG}(v^{LPG})$. Las restricciones $dlim^{LPG} \geq e_m^{z,LPG}(x^{LPG})$ fueron incluidas de igual manera que la anterior (NFPA 58, 2017).

La contribución al costo de la alternativa seleccionada puede representarse a través de la Ec. 24.

$$c^{LPG} = \alpha (v^{LPG})^\beta n \quad (24)$$

Obsérvese que una de las principales causas del trade off entre el costo del diseño y el costo del layout surge del parámetro β . En general, este parámetro es menor a 1, por lo que, al aumentar el número de tanques para almacenar un volumen dado, el costo la instalación tiende a aumentar. Sin embargo, la división del inventario implica la posibilidad de utilizar distanciamientos menores entre las unidades en el layout general de la planta y, por lo tanto, una disminución en los costos del terreno ocupado y las conexiones. En general, las correlaciones para el costo de los tanques esféricos presurizados propuestas por diversos autores coinciden en la utilización de un exponente $\beta=0.71-0.78$, existiendo variación en el parámetro α . En este caso, será utilizada una relación entre los parámetros α y c_t de 100 ($c_t=15 \text{ USD}/m^2$; $\alpha=1500 \text{ USD}/m^3$).

Los distanciamientos mínimos entre los tanques atmosféricos fueron calculados considerando que ante un pool fire (único evento final), no se supere la intensidad de radiación de $15 \text{ kW}/m^2$ (prevención del efecto dominó). De igual manera se procedió para la estimación de los distanciamientos mínimos a los límites de planta.

El modelo presentado aquí se fundamenta en la segregación de las sustancias en el área de almacenamiento, basada tradicionalmente en la clasificación de las sustancias según su punto de inflamación (NFPA 30 Standard, 1977), la contención secundaria, la clasificación de áreas peligrosas (HAC) y las medidas de protección contra incendios (Mannan, 2005). Este criterio heurístico es de suma importancia en el desarrollo de modelos de optimización de layout de parques de tanques puesto que permite agrupar unidades, y reducir la complejidad del modelo matemático a resolver.

Resultados

Mediante la ejecución simultánea de los modelos de optimización propuestos, el número óptimo de tanques de LPG fue seis. El layout óptimo puede observarse en la Figura 1. El modelo fue implementado en GAMS y resuelto con el solver cplex en cuatro iteraciones (que surgen de la relajación de McCormick) en un tiempo total de 9 minutos.

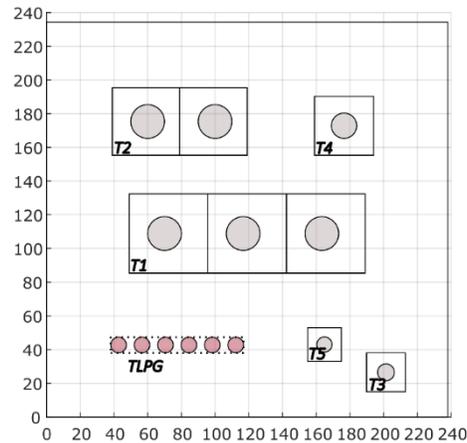


Figura 1. Layout óptimo de la planta

La reformulación MILP del modelo GDP de optimización de layout contiene elevada simetría. En futuros trabajos se evaluarán alternativas para romper ésta tanto en el modelo GDP como en la reformulación MILP. Se evaluará la aplicación de “basic steps” para obtener un modelo más cercano a su forma DNF, buscando mejorar la performance.

Conclusiones

A través de este trabajo se presentó un modelo general para la optimización del layout general de planta y del diseño interno de las instalaciones. El mismo fue aplicado al caso particular del almacenamiento de un volumen fijo de LPG, y en simultáneo, el layout general de la playa de almacenamiento. El modelo aquí propuesto constituye una base para el desarrollo de una jerarquía general para resolver modelos de optimización de layout más complejos. Un modelo similar podría ser incluido en etapas siguientes para optimizar la zona de almacenamiento dentro del layout general de planta. La complejidad del modelo obtenido resulta el limitante puesto que los modelos de optimización de layout constituyen NP-hard problems. En este contexto, será necesario desarrollar criterios tendientes a reducir la complejidad. Se evaluarán en futuros trabajos, distintos métodos para la ejecución secuencial de los modelos de optimización. Por ejemplo, si la zona de almacenamiento debiera ser incluida en el layout general de la planta, podría ejecutarse este modelo parametrizando la relación de los lados (a/b), éstos constituirían un conjunto de diseños factibles de la zona de almacenamiento en su conjunto pudiéndose resolver luego el layout general de la planta y la selección de la alternativa de diseño óptima recién desarrollada (de manera similar a lo desarrollado en la disyunción 14). El criterio heurístico para el desarrollo de tal estrategia de agrupamiento lo constituye la segregación de las sustancias (Mannan, 2005). Con cualquier estrategia jerárquica-secuencial que se implemente, la globalidad de la solución óptima no podrá ser garantizada. Sin embargo, dadas las limitaciones de los métodos actuales para la optimización de layout, representa una herramienta de valiosa utilidad industrial.

Referencias

- Mannan, S. (2005). *Lee's loss prevention in the process industries* (3rd ed.). Elsevier.
- NFPA 30 Standard. (1977). National Fire Protection Association. *Flammable and Combustible Liquids Code*, Quincy, MA.
- NFPA 58. (2017). *LP-Gas Code Handbook*. NFPA 58.
- Papageorgiou, L. & Rotstein, G. (1998). “Continuous-Domain Mathematical Models for Optimal Process Plant Layout”. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 37, 3631–3639.
- Raman, R., & Grossmann, I. E. (1994). “Modelling and computational techniques for logic based integer programming”. *Computers & Chemical Engineering*, 18(7), 563–578.
- Vecchiotti, A., Lee, S., & Grossmann, I. E. (2003). “Modeling of discrete/continuous optimization problems: Characterization and formulation of disjunctions and their relaxations”. *Computers & Chemical Engineering*, 27, 433–448.