

Consideración de Variables Estocásticas en la Optimización del Block Layout.

Consideration of Stochastic Variables in Block Layout Optimization.

Presentación: Octubre 2023

Constanza Morbidoni:

CAIMI Centro de Aplicaciones Informáticas y Modelado en Ingeniería, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario, Zeballos 1346, S2000BQA Rosario, Argentina.

constanzamorbidoni@gmail.com

Resumen

En el contexto de la instalación de una planta química, la planificación del layout tiene un alto impacto tanto en los costos como en el riesgo tecnológico. En las últimas décadas surgieron distintos modelos para optimizar el layout de procesos y el block/site layout. Dichos modelos aún presentan numerosas deficiencias. Entre ellas, la complejidad para considerar el entorno del block layout, ya que en este se evalúan los eventos accidentales catastróficos; y, el análisis de estos requiere, en general, la realización de un análisis cuantitativo de riesgos (ACR), demandando el abordaje de variables estocásticas involucradas. En este trabajo pretendemos desarrollar herramientas para la incorporación en una metodología de Diseño Basada en Riesgos, reformulando un modelo MILP -mixto entero lineal- para optimizar el block layout de una refinería de petróleo utilizando el método Montecarlo en la realización del ACR. En la función objetivo se consideran los costos de interconectividad y el riesgo como restricción.

Palabras clave

Optimización de layout, método Montecarlo, ACR.

Abstract

Layout planning has a high impact on both costs and technological risk in the context of chemical plant installation. In the last decades, several models designed to optimize process and block/site layout have emerged. These models still have many deficiencies. Among them, the complexity to consider the surroundings in the block layout, since it evaluates catastrophic accidental events; and, the analysis of major events requires, in general, the performance of a quantitative risk analysis (QRA) demanding the approach of the involved stochastic variables. In this work we intend to develop tools that will be incorporated into a Risk Based Design methodology, reformulating a MILP model to optimize the block layout of a refinery using the Montecarlo method in the realization of the QRA. The objective function considers interconnectivity costs and risk as a constraint.

Key words

Layout optimization, Montecarlo method, QRA.

Introducción

En el contexto del diseño de plantas de procesos, los enfoques de diseño basado en riesgos (Risk Based Design -RBD-) y de diseño inherentemente más seguro (Inherently Safer Design -ISD-) son conceptos que han sido abordados frecuentemente durante las últimas décadas (Gao et al., 2020). La principal diferencia entre ambos radica en que el ISD está guiado sólo por un enfoque de consecuencias mientras que el RBD requiere una evaluación tanto de la frecuencia como de las consecuencias de los potenciales eventos accidentales. El núcleo de esta última metodología es el análisis cuantitativo de riesgos (ACR).

Dentro de las etapas de diseño de planta, el diseño del layout constituye una etapa de vital importancia en el riesgo. La optimización del layout de planta comienza a tomar más relevancia luego de la explosión de Flixborough en Lincolnshire, Inglaterra en 1974. Previo al accidente se realizaron modificaciones en la planta sin evaluar completamente las posibles consecuencias dejando como resultado la muerte de 28 trabajadores y 36 heridos. Como resultado de este acontecimiento,

surgió la directiva Seveso II de la Unión Europea, la cual tiene como objetivo la prevención de accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas y la limitación de sus consecuencias para las personas y el medio ambiente (Khakzad y Reniers, 2015).

A partir de ésta, en las últimas décadas han surgido trabajos orientados a abordar esta problemática, y particularmente, han surgido una serie de trabajos tendientes a optimizar el layout de los procesos considerando el riesgo. Aun así, muchos aspectos del modelado para el diseño o la optimización del layout aún no han sido abordados (Moran, 2017).

En este trabajo se pretenden incluir conceptos del RBD y del ISD en la optimización del layout general de planta (block layout), y desarrollar los modelos matemáticos necesarios para tal fin. En las unidades de layout que involucran sustancias poco inflamables (no tóxicas), que potencialmente desencadenarían en un evento accidental, se podría aplicar la filosofía de diseño inherentemente más seguro (ISD), buscando características de diseño tendientes a eliminar o reducir lo más posible el riesgo (Athar et al., 2019). En el caso de que se encuentren involucrados gases licuados inflamables (y tóxicos), esta metodología se volvería impracticable dado que las distancias de seguridad resultantes serían del orden de los miles de metros. En consecuencia, se hace necesaria la limitación del riesgo sobre los receptores considerando la naturaleza estocástica de las variables ambientales, teniendo en cuenta con qué probabilidad estas variables toman un determinado valor e incorporando herramientas del diseño basado en riesgos (RBD).

El modelo se aplica a un caso de estudio particular, la optimización del block-layout de una refinería considerando al terreno definido (de forma irregular).

Metodología

Descripción del Problema

El problema abordado podría enunciarse del siguiente modo.

Dadas:

- Localización y dimensiones del terreno de instalación de la planta.
- Dimensiones de las instalaciones a localizar en el block layout.
- Interconectividad entre instalaciones y costos de interconectividad.
- Localización de los asentamientos de personas en las inmediaciones de la planta.

Se quiere determinar:

- La localización y orientación de todas las instalaciones de planta.

Para

- Minimizar los costos totales del layout de planta limitando el riesgo sobre la población.

Modelo

El modelo desarrollado en este trabajo surge a partir del presentado por Orellano y Scenna (2022) donde se exhibe un modelo en forma GDP (programación disyuntiva generalizada) para la optimización de layout considerando distanciamientos mínimos entre unidades. La principal modificación de la formulación aquí presentada radica en la posibilidad de considerar variables estocásticas. En otras palabras, si las distancias mínimas entre unidades surgen de limitar el riesgo, entonces la distancia en cada dirección es variable y, por lo tanto, se requiere una formulación acorde. Dicho modelo fue transformado a MILP (Mixto Entero Lineal) mediante la reformulación BigM.

A través de las ecuaciones (1) y (2) se considera la rotación de las unidades. Siendo, l_i^H , l_j^H los lados horizontales y l_i^V , l_j^V los lados verticales. Los parámetros a_i y b_i son las dimensiones de la unidad i y q_i es la variable binaria que será igual a 1 cuando el lado a del equipo i se ubica en la dirección x .

$$l_i^H = a_i q_i + b_i (1 - q_i) \quad \forall i \in N \quad (1)$$

$$l_i^V = a_i + b_i - l_i^H \quad \forall i \in N \quad (2)$$

Se plantea la disyunción (3) para evitar el solapamiento de las unidades y exigir la existencia de una distancia mínima entre los mismos. Ésta contempla cuatro variables booleanas (Y) para cada par de unidades (i, j), de las cuales una será verdadera cuando se cumplan las restricciones del término de la disyunción. Siendo x_i , x_j , y_i , y_j , los puntos correspondientes al centro de cada unidad.

Por ejemplo, se cumplirá Y^{2ij} si la distancia entre las unidades i y j , medida desde el borde de éstas y estando i a la izquierda de j , supera a la distancia mínima en esa dirección ($dmin_{ij2}$).

$$\left[x_i \geq x_j + \frac{l_i^H + l_j^H}{2} + dmin_{ij1} \right] \vee \left[x_j \geq x_i + \frac{l_i^H + l_j^H}{2} + dmin_{ij2} \right] \quad (3)$$

$$\vee \left[y_i \geq y_j + \frac{l_i^V + l_j^V}{2} + dmin_{ij3} \right] \vee \left[y_j \geq y_i + \frac{l_i^V + l_j^V}{2} + dmin_{ij4} \right] \quad \forall i, j \in N / i \neq j$$

Esta disyunción es modelada mediante la reformulación BigM, obteniéndose las restricciones (4) a (8). Donde λ_{ij}^k son las binarias asociadas a las booleanas de la disyunción (3).

$$x_i - x_j - \frac{l_i^H + l_j^H}{2} - dmin_{ij1}^1 \geq M(1 - \lambda_{ij}^1) \quad \forall i, j \in N / i \neq j \quad (4)$$

$$x_j - x_i - \frac{l_i^H + l_j^H}{2} - dmin_{ij2}^2 \geq M(1 - \lambda_{ij}^2) \quad \forall i, j \in N / i \neq j \quad (5)$$

$$y_i - y_j - \frac{l_i^V + l_j^V}{2} - dmin_{ij3}^3 \geq -M(1 - \lambda_{ij}^3) \quad \forall i, j \in N / i \neq j \quad (6)$$

$$y_j - y_i - \frac{l_i^V + l_j^V}{2} - dmin_{ij4}^4 \geq -M(1 - \lambda_{ij}^4) \quad \forall i, j \in N / i \neq j \quad (7)$$

$$\sum_k \lambda_{ij}^k \geq 1 \quad \forall i, j \in N / i \neq j \quad (8)$$

Se plantea la disyunción (9), de manera similar a (3) forzando a que la distancia entre los equipos y las zonas pobladas supere las distancias de seguridad. En este caso, las variables booleanas son N, S, E y O. Por ejemplo, se cumplirá la disyunción N_{ip} si la distancia vertical en dirección norte entre el asentamiento de personas p , y el borde de la unidad i supera la distancia mínima.

$$\left[y_p - \left(y_i + \frac{l_i^V}{2} \right) \geq dp_i^1 \right] \vee \left[\left(y_i - \frac{l_i^V}{2} \right) - y_p \geq dp_i^2 \right] \quad (9)$$

$$\vee \left[\left[x_p - \left(x_i + \frac{l_i^H}{2} \right) \geq dp_i^3 \right] \vee \left[\left(x_i + \frac{l_i^H}{2} \right) - x_p \geq dp_i^4 \right] \right] \quad \forall i \in N \wedge p \in P$$

Al igual que la disyunción (3), ésta se convierte a MILP mediante la reformulación BigM.

Las distancias de seguridad desde los tanques de sustancias inflamables -a excepción de los tanques de GLP (gas licuado de petróleo)- se calculan a partir de un modelo reducido para la estimación de distancias de seguridad dado un pool fire desarrollado en el centro de investigación según se presenta en la ecuación (10). En este caso solo se contempla al pool fire como posible evento accidental ya que para tanques atmosféricos esta es la única consecuencia por considerar.

$$L = 0.3179(I^{-0.7913} - 0.0395)^{0.6889} (HRR^{0.5798} - 0.3698)D^{0.4175} \quad (10)$$

Donde HRR es la tasa de desprendimiento de calor (kW/m^2) y el término I representa a la intensidad de radiación soportada por el receptor (kW/m^2).

Las distancias de seguridad desde los tanques de GLP se estiman a partir del método desarrollado por Kraft et al. (2023), el cual tiene en cuenta la aleatoriedad de las condiciones atmosféricas mediante la aplicación del método Montecarlo. La idea del método radica en realizar un ACR considerando un número elevado de escenarios generados aleatoriamente por el

método Montecarlo y obtener así las curvas de isoriesgo. Al limitar el riesgo, la distancia mínima en cada dirección puede ser obtenida. Esto es necesario ya que, para el caso de los tanques de GLP, al ser tanques esféricos y encontrarse a altas presiones no solo es posible que ocurra un pool fire sino que se pueden dar múltiples escenarios accidentales. Los costos de tuberías tienen en consideración tanto los costos de material como de instalación, y se calculan en función de la longitud de las tuberías y el precio unitario, obteniendo su valor a partir de la ecuación (11) (Wu et al., 2020). Los costos de bombeo, que consideran principalmente a los costos de energía, se calculan con la ecuación (12) (Wu et al., 2020).

$$PIC = \frac{1}{T} \sum (A_1(644.3D_{int}^2 + 72.5D_{int} + 0.4611) + A_2D_{ext}^{0.48} + A_3 + A_4D_{ext})L \quad (11)$$

$$POC = CEH \sum \frac{Qfv^2L}{2\eta D_{int}} \quad (12)$$

Caso de Estudio

En primer lugar, se localizó la planta a analizar y se dimensionó el terreno considerado, este se muestra en la figura 1. Los asentamientos de personas se diagramaron alrededor del terreno. En la figura 2 se visualiza la disposición de estos, que fueron los incluidos en el modelo como puntos.



Figura 1. Localización de la planta.

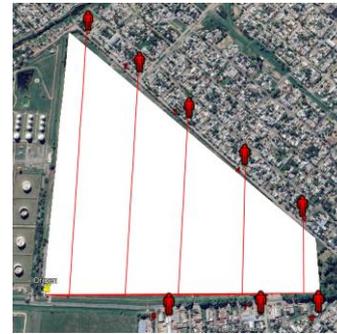


Figura 2. Asentamientos de personas.

Se dimensionaron además las plantas de proceso, así como los tanques de almacenamiento con sus correspondientes endicamientos, y a partir de esto, se fijaron los caudales de trabajo.

Se tuvieron en cuenta 3 tanques de crudo interconectados entre sí, y con su correspondiente unidad de procesamiento mediante un mezclador, y, por otro lado, 3 tanques de GLP, 2 tanques de nafta y uno de diésel, interconectados con una segunda planta por medio de sus correspondientes mezcladores. En las tablas 1 y 3 se expresan los valores utilizados en el caso de estudio. En esta última, las unidades 4, 8 y 12 corresponden a los mezcladores.

Tabla 1. Dimensiones del terreno y las plantas de procesamiento.

Dimensionamiento	Área (m ²)
Terreno	724212.34
Planta 1	384,72 x 71,02
Planta 2	165,06 x 143,55

Las distancias de seguridad calculadas ante eventos de pool fire para los distintos tanques considerando como receptores a tanques atmosféricos, bajo presión y a las personas se muestran en la tabla 3. En la tabla 2 se encuentran los valores de los parámetros utilizados para el cálculo de distancias de seguridad para los tanques de crudo, nafta y diésel.

Tabla 2. Parámetros del modelo para el cálculo de distancias de seguridad.

Límite impacto (I)	Valor [kW/m ²]	HRR	Valor[kW/m ²]
Equipos a presión	40	Crudo	1900
Equipos atmosféricos	15	Nafta	2400
Personas	2	Diesel	1400

Tabla 3. Distancias de seguridad obtenidas.

Tanque	Volumen (m ³)	Caudal (m ³ /s)	Distancia Presurizados (m)	Distancia Atmosféricos (m)	Distancia Personas (m)
1 – Crudo	1600	0.097	10,08	32,11	121,69
2 – Crudo	13500	0.077	9.66	30.76	116.59
3 – Crudo	16000	0.1	10.07	32.06	121.51
5 – GLP			N 57.88	N 157.93	N 140.00
6 – GLP	1500	0.009	S 59.90	S 160.00	S 189.11
7 – GLP			E 58.36	E 149.28	E 180.00
			O 58.37	O 159.72	O 204.44
9 – Nafta isomerizada	2072	0.012	7.5	23.86	90.45
10 – Nafta Virgen	9309	0.054	10.27	32.69	123.9
11 – Diesel	4706	0.027	6.52	20.77	78.72

En el caso de los tanques de GLP, se ha contemplado el método Montecarlo para la generación de condiciones ambientales aleatorias y con la posterior obtención de mapas de isorriesgo para el cálculo de las distancias de seguridad que se tienen en cuenta en el modelo de optimización. En la figura 3 se muestra el mapa de isorriesgo para el caso de los receptores atmosféricos. A partir de la gráfica del riesgo en función de la distancia, Figura 4, se puede visualizar cómo disminuye el riesgo al aumentar las distancias en las distintas direcciones.

Además, se trazan rectas en los valores de riesgo límites considerados, que fueron $2,5 \cdot 10^{-7}$ muertes/año para las personas y $3 \cdot 10^{-7}$ muertes/año para receptores atmosféricos y presurizados.

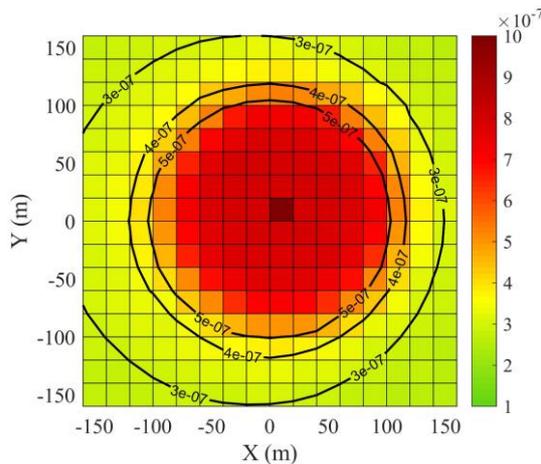


Figura 3. Mapas de isorriesgo receptores atmosféricos.

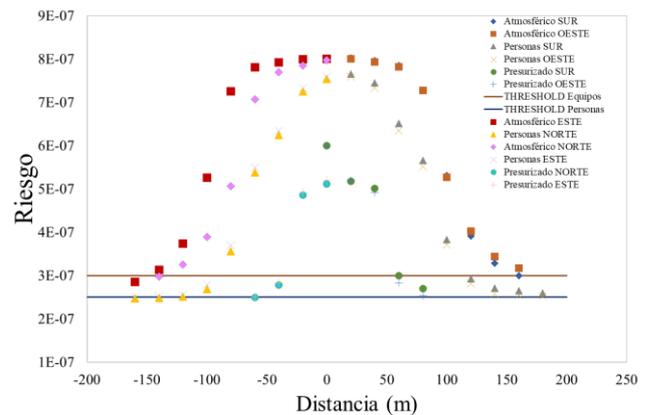


Figura 4. Riesgo vs Distancia

Los valores de los parámetros utilizados en el cálculo de los costos de tuberías y de bombeo son los utilizados por Wu, et al. 2020. El factor de fricción fue calculado mediante la ecuación de Colebrook implementada en GAMS.

Resultados

El modelo fue resuelto en GAMS con el solver CPLEX. Cuenta con 1375 ecuaciones, de las cuales 122 son igualdades y 1253 desigualdades, 1328 variables continuas y 814 variables binarias. El tiempo de ejecución fue de 379 segundos.

En la figura 5 se muestra la ubicación final de todos los tanques, mezcladores y plantas consideradas en el modelo. Además, se superponen los mapas de isorriesgo obtenidos para los tanques de GLP con lo que se puede visualizar el cumplimiento de las distancias de seguridad tanto para con las demás unidades como para los asentamientos de personas.



Figura 5. Layout óptimo.

Conclusiones

En este trabajo se ha presentado un modelo para la optimización de layout y un método para incluir el análisis cuantitativo de riesgos sin complejizar el modelo desarrollado previamente en el centro de investigación puesto que la disyunción presentada no involucra una complejidad extra al modelado ya que no agrega variables sino sólo parámetros ingresados por el usuario. En otras palabras, la definición de la hipermatriz es un trabajo de preprocesamiento, no influyendo así en la performance de los modelos de optimización.

Este modelo fue aplicado a un complejo industrial con distintos compuestos inflamables. El modelo matemático definido, arrojó como resultado las coordenadas correspondientes a cada uno de los centros geográficos de los dispositivos definidos y las distancias entre centros de tanques respetando las distancias mínimas de seguridad entre los equipos y las zonas pobladas.

Los puntos geográficos resultantes permitieron definir el layout óptimo que minimiza los costos considerando condiciones de seguridad requeridas en función de los costos de tuberías (material e instalación en función de la longitud de las tuberías y el precio unitario) y los costos de bombeo (considerando los costos de energía).

Referencias

- Athar, M., Shariff, A.M., Buang, A., (2019). A review of inherent assessment for sustainable process design. *Journal of Cleaner Production*, 233, 242–263. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.060>.
- Gao, X., Abdul Raman, A.A., Hizaddin, H.F., Bello, M.M., (2020). Systematic review on the implementation methodologies of inherent safety in chemical process. *J. Loss Prevention in the Process Industries*, 65, 104092. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104092>
- Khakzad, N., Reniers G., (2015). Risk-based design of process plants with regard to domino effects and land use planning. *Journal of Hazardous Materials*, Volume 299, 289-297, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.06.020>.
- Kraft, R.A., Orellano, S, Mores, P. L., Rodríguez, N. H., Scenna, N. J. (2023). Risk-Based Approach for Safety Distance Estimation in the Process Industry. *WCCE11 – 11th World Congress of Chemical Engineering*.
- Moran, S. (2017). *Process plant layout (Second edition)*. Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier.
- Orellano, S., Scenna, N. J., & Rodríguez, N. H. (2022). Enfoque Conceptual de la Optimización Simultánea de Layout y Diseño de las Instalaciones mediante GDP Considerando el Riesgo Tecnológico. *AJEA (Actas De Jornadas Y Eventos Académicos De UTN)*, (15). <https://doi.org/10.33414/ajea.1066.2022>
- Wu Y, Xu S, Zhao H, Wang Y, Feng X. (2020). Coupling Layout Optimization of Key Plant and Industrial Area. *Processes* 8, no 2, 185 – 203. <https://doi.org/10.3390/pr8020185>.