

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Facultad de Ingeniería Química

División de Estudios de Posgrado



**Localización Óptima de Instalaciones Industriales Considerando
Simultáneamente Aspectos Económicos y de Seguridad.**

TÉSIS presentada por:

Juan Martinez Gomez

A la División de Estudios de Posgrado de la

Facultad de Ingeniería Química como

requisito parcial para obtener el

grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

EN

INGENIERÍA QUÍMICA

Asesor: Doctor en Ciencias en Ingeniería Química José María Ponce Ortega

Co-Asesor: Doctor en Ciencias en Ingeniería Química Fabricio Nápoles Rivera

Morelia, Michoacán

Agosto de 2014

RESUMEN

LOCALIZACION ÓPTIMA DE INSTALACIONES INDUSTRIALES CONSIDERANDO SIMULTANEAMENTE ASPECTOS ECONOMICOS Y DE SEGURIDAD.

Por

Juan Martinez Gomez

Agosto del 2014

Maestría en Ciencias en Ingeniería Química

Dirigida por: Dr. José María Ponce Ortega y Dr. Fabricio Nápoles Rivera

El costo y el riesgo son factores primordiales que deben ser considerados en la distribución de las instalaciones en una planta industrial. En el presente trabajo se desarrollaron metodologías, las cuales abordan el problema de la distribución de las instalaciones, considerando la seguridad y el costo de la instalación. La primera metodología propuesta es para determinar la localización óptima de instalaciones, tiene como principal contribución la reubicación de múltiples instalaciones existentes, las cuales se encuentran a distancias poco seguras. La metodología propuesta también permite la adición de múltiples instalaciones nuevas, esto considerando un conjunto de instalaciones ya existentes en una porción de terreno dado. Esta metodología propuesta fue analizada a través de un caso de estudio referente a la destilación de hexano, en el cual BLEVE y VCE fueron identificados como accidentes potenciales. La segunda metodología presentada en este trabajo, debe su aportación a que esta considera la distribución óptima de instalaciones industriales en una planta química, garantizando la ubicación óptima de las unidades a diferentes periodos de tiempo considerando el riesgo y el costo simultáneamente. La aplicación del modelo es mostrada a partir de un caso de estudio referente a la instalación de una planta de óxido de etileno. El riesgo es evaluado considerando accidentes tipo dominó ocasionados por explosiones tipo BLEVE.

Palabras Clave: Seguridad, Optimización, Económico, Localización, Reajuste.

Abstract

The industrial layout traditionally has been addressed accounting for the unit distribution and installation since the first day of operation of the plant; this is, without considering future expansions that involve additional units in the future operation years. This way, this paper proposes a mathematical programming formulation for the optimal unit sitting and reallocation in an industrial facility accounting for future expansions and involving simultaneously economic and safety objectives. The proposed formulation is based on a multi-annual framework and this corresponds to a multi-objective mixed integer linear programming problem. The proposed optimization approach was applied to a case study for the unit sitting in an ethylene oxide plant. The economic objective function involves the minimization of the total annual cost accounting for the value of the money through the time and the safety objective function involves the minimization for the accumulated risk over the operation time. Results show the applicability of the proposed approach.

Keywords: Retrofit; Facility location, Multi-objective optimization; Facility layout; Risk minimization.

INDICE

LISTA DE TABLAS.....	1
LISTA DE FIGURAS.....	1
NOMENCLATURA	2
AGRADECIMIENTOS	5
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	6
1.2 Justificación.....	8
1.3 Hipótesis.....	8
1.4 Objetivo general	9
1.5 Objetivos específicos.....	9
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	10
2.1 Antecedentes	14
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.....	16
3.1 Localización óptima de instalaciones industriales considerando simultáneamente aspectos económicos y de seguridad.	16
3.1.1 Declaración del problema.....	16
3.1.2 Formulación del modelo.....	17
3.1.2.1 Reformulación.....	18
3.1.2.2 Restricciones	19
3.1.2.3 Interconexión.....	20
3.1.2.4 Funciones Objetivo	21
3.1.2.4.1 Función Objetivo Económica.....	21
3.1.2.4.2 Función Objetivo Riesgo.....	21
3.2 Localización y reubicación óptima de instalaciones en una planta industrial, considerando un enfoque multi-anual así como aspectos económicos y de seguridad.	23
3.2.1 Declaración del problema.....	23
3.2.2 Formulación del modelo.....	23
3.2.2.1 Reformulación.....	25
3.2.2.2 Restricciones	27
3.2.2.3 Costos	27
3.2.2.4 Funciones objetivo	28

3.2.2.4.1 Función objetivo costo	28
3.2.2.4.2 Función objetivo riesgo.....	29
3.3 Estrategia de solución.....	29
4.1 Planteamiento del primer caso de estudio y discusión de resultados.....	31
4.1.1 Calculo de los parámetros de riesgo.....	33
4.1.2 Discusión de resultados.....	38
4.1.2.1 Escenario A	38
4.1.2.2 Escenario B	40
4.2 Definición del segundo caso de estudio y discusión de resultados	44
CONCLUSIONES	57
BIBLIOGRAFÍA.....	58
APÉNDICES.....	63
A.11 Código en GAMS del modelo para la solución del primer problema titulado; Localización óptima de instalaciones industriales considerando simultáneamente aspectos económicos y de seguridad.	63
A.12 Código en GAMS, para la solución del segundo modelo titulado; Optima localización y reubicación de instalaciones en una planta industrial, considerando un enfoque multi-anual así como aspectos económicos y de seguridad.	74

LISTA DE TABLAS

Tabla 4.1 . Tamaño de las Instalaciones.....	32
Tabla 4.2. Población de las instalaciones.....	35
Tabla 4.3. Comparación de los escenarios.	43
Tabla 4.4. Proyección de instalación de nuevas unidades en el proceso de producción de etileno.	44
Tabla 4.5. Masa en Kg de las unidades involucradas en el accidente domino.....	46
Tabla 4.6. Comparación entre las soluciones obtenidas de la curva Pareto.....	52

LISTA DE FIGURAS

Figura 4. 1. Diagrama de flujo del proceso de destilación de hexano.	31
Figura 4. 2. Ubicación de las instalaciones en el terreno.....	33
Figura 4. 3. Porcentaje de afectación debido a muerte por hemorragia pulmonar.....	36
Figura 4. 4. Árbol de eventos.	37
Figura 4. 5. Curva pareto para el escenario A.	39
Figura 4. 6. Distribución final para la solución 2, escenario A.	40
Figura 4. 7. Curva pareto escenario B.	41
Figura 4. 8. Distribución final para la solución j, escenario B.....	42
Figura 4. 9. Diagrama de flujo para la producción de óxido de etileno.	45
Figura 4. 10. Ubicación de las unidades ya existentes en el terreno (periodo inicial).....	45
Figura 4. 11. Probabilidad de daño estructural.....	48
Figura 4. 12. Porcentaje de lesiones para una capacidad de 65%.....	48
Figura 4. 13. Porcentaje de lesiones para una capacidad de 100%.	49
Figura 4. 14. Curva pareto.....	50
Figura 4. 15. Configuración para el periodo 1, solución A.	51
Figura 4. 16. Configuración para el periodo 2, solución A.	51
Figura 4. 17. Configuración para el periodo 3, solución A.	53
Figura 4. 18. Configuración para el periodo 1, solución B.	53
Figura 4. 19. Configuración para el periodo 2, solución B.	54
Figura 4. 20. Configuración para el periodo 3, solución A.	55
Figura 4. 21. Configuración para el periodo 1, solución D.	55
Figura 4. 22. Configuración para el periodo 2, solución D.	56

NOMENCLATURA

Subíndices

i, i' coordenada para el centro de cada grid (m), $i' \neq i$.

j, j' coordenada para el centro de cada grid (m), $j' \neq j$.

e, e' nueva instalación $e' \neq e$.

Conjuntos

I, I' conjunto para los componentes i, i' .

J, J' conjunto para los componentes j, j' .

E, E' conjunto para los componentes e, e' .

FE conjunto para las instalaciones fijas.

Parámetros

$\delta_{i,j}$ distancia mínima de separación (m).

$UNIT_{e,t}^{exist}$ parámetro binario asociado a la existencia de la unidad e en el tiempo t .

$IBU_{e,e',t}$ parámetro binario asociado a la existencia de la interconexión.

$UIC_{i,j,e}$ costo de interconexión entre instalaciones nuevas y existentes (\$).

$UIC_{i,j,e,t}$ costo de interconexión de la unidad e en el tiempo t .

$UECost_{i,j,e,t}$ costo total de instalación.

$UL_{i,j,e}$ costo del terreno (\$).

$ULC_{i,j,e,t}$ costo del terreno de la unidad e en el tiempo t .

$UR_{i,j,e}$ riesgo de instalación (Fatalidades).

$UICInt_{i,j,e,i',j',e'}$ costo de interconexión entre las nuevas instalaciones (\$).

m_{TNT} masa equivalente de TNT.

η	eficiencia empírica de explosión.
m	masa de hidrocarburo.
ΔH_C	energía de explosión de gas flamable (energía/masa).
E_{TNT}	energía de explosión del TNT.
P_{BLEVE}	probabilidad de ocurrencia de BLEVE debido a fuga.
P_{VCE}	probabilidad de ocurrencia de VCE debido a fuga.
$UR_{i,j,e,t}$	riesgo de instalación de la unidad e en el tiempo t .
$URI_{i,j,e,i',j',e',t}$	riesgo de interconexión entre las nuevas unidades en el tiempo t .
$UIC_{i,j,e,i',j',e',t}$	costo de interconexión entre las unidades en el tiempo t .
$k_{f(t)}$	factor de anualización.
P	sobrepresión (N/m^2).
Y	valor Probit asociado a daños a personas por impacto.
J	impulso específico ($N s/m^2$).
r	distancia entre la instalación peligrosa con respecto a cada grid.

Variables

$Y_{i,j,e}$	variable booleana asociada a la existencia de la nueva instalación.
$y_{i,j,e,t}$	existencia de la unidad (e) en las coordenadas (i,j) en el tiempo t .
$Int Cost_e$	costo de interconexión de las instalaciones nuevas (\$).
$Land Cost_e$	costo del terreno (\$).
$ECost_{e,t}$	costo de interconexión entre las unidades en el tiempo t .
$Risk_e$	riesgo de instalación (Fatalidades).
$ERisk_{e,t}$	riesgo de instalación de la unidad e en el tiempo t .

TAC	costo total anual (\$/año).
$IntCost_{e,e'}$	costo de interconexión entre las nuevas unidades (\$).
$DIntCost_{i,j,e}$	variable desagregada asociada al costo de interconexión (\$).
$DLandCost_{i,j,e}$	variable desagregada asociada al costo del terreno (\$).
$DIntCost_{i,j,e,i',j',e'}$	variable desagregada asociada al costo de interconexión (\$).
$DIntCost_{i,j,e,i',j',e'}$	variable desagregada de interconexión entre nuevas unidades.
$DERisk_{i,j,e,t}$	riesgo desagregado.
$DExCost_{i,j,e,t}$	costo de interconexión desagregado.
$DLandCost_{i,j,e,t}$	costo de terreno desagregado.
$IntRisk_{e,e',t}$	riesgo de interconexión entre las unidades t .
$IntCost_{e,e',t}$	costo de interconexión entre las unidades en el tiempo t .
$DIntRisk_{i,j,e,i',j',e',t}$	riesgo de interconexión desagregado.
$DIntCost_{i,j,e,i',j',e',t}$	costo de interconexión desagregado.
m_{TNT}	masa equivalente de TNT.
Z_e	distancia escalada.
Y	valor Probit asociado a la muerte por hemorragia pulmonar.
P	porcentaje de afectación debido a BLEVE o VCE.
$TRisk$	riesgo total asociado a la interconexión (Fatalidades).
$z_{i,j,e,i',j',e'}$	variable booleana asociada a la existencia de interconexión.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer en primer lugar a mis padres; Josefina Gómez Medina y José Antonio Martínez González, por todo el apoyo y comprensión que me han otorgado durante todo este tiempo, lo cual me ha ayudado a cumplir cada una de mis metas que me he planteado, además les agradezco por los valores inculcados así como el sentido de responsabilidad y respeto, que gracias a su ejemplo he podido adquirir.

A mis hermanos y hermanas; Anai, Antonio, Esmeralda, Gil, Gloria y Guadalupe, por su compañía, apoyo y comprensión que me han brindado en estas etapas tan importantes, su apoyo me han dado fortaleza y coraje para seguir adelante con cada uno de los retos que he encontrado durante este camino.

A mi asesor el Dr. José María Ponce Ortega, primeramente por darme la oportunidad de trabajar con él y por depositar su confianza en mí, secundamente por el apoyo total y constante durante la realización de este proyecto de investigación, asimismo le agradezco el haber podido realizar una estancia de investigación en el extranjero y por ayudarme a crecer profesionalmente mediante la motivación y conocimiento que día con día me fue brindando, finalmente hay dos cosas muy importantes que quiero agradecerle, la primera por guiarme y apoyarme en la toma de decisiones más difíciles, las cuales han sido acertadas gracias a sus consejos, la segunda por ayudarme a definir el área en la cual quiero especializarme y en la cual he avanzado significativamente, gracias al apoyo total que me ha brindado.

A mi Co-Asesor el Dr. Fabricio Nápoles Rivera, por su constante ayuda durante la realización de este trabajo, gracias por ayudarme a resolver las innumerables dudas que se fueron suscitando, gracias por brindarme nuevos conocimientos y herramientas para mi desarrollo, cada objetivo cumplido se debe a su valioso apoyo, asimismo gracias por la confianza depositada y por todos los consejos brindados.

Al Dr. Medardo Serna González, quien me proporciono todo tipo de apoyo durante la realización del presente proyecto, además de que sus observaciones y consejos ayudaron a mejorar el presente trabajo.

A mis sinodales el Dr. Agustín Castro Montoya y al M.C. Gabriel Martínez Herrera, por todos sus comentarios y revisión, lo cual ayudaron a mejorar el presente proyecto.

Al Dr. Mahmoud El-Halwagi, por todas las atenciones y apoyo durante la realización de la estancia de investigación.

A mis amigos Marcos Noé Tirado, Griselda García, Marcela Saraí Gutiérrez, Manuel Rivera, Denis Aidé Cabrera, Marlen Salgado, Karla María Rangel, Tania Méndez, Eduardo Murillo, Guadalupe Rojas; les agradezco por su compañía, apoyo y comprensión durante todo este tiempo, su apoyo me ha servido para superar y alcanzar mis objetivos.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por la beca otorgada.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan los antecedentes bibliográficos de las metodologías, que se han desarrollado para resolver el problema de la localización óptima de las instalaciones industriales considerando aspectos de seguridad. Además, se presenta una descripción del contenido y la estructura de la Tesis.

1.1 Generalidades

Anteriormente, las metodologías desarrolladas para encontrar la distribución de las instalaciones en una planta química sólo consideraban el costo como factor determinante en la elección de una configuración óptima (ver por ejemplo Georgiadis y Macchietto, 1997; Jayakumar y Reklaitis, 1994; Jayakumar y Reklaitis, 1996). Actualmente, la instalación y distribución de las unidades en una nueva planta de proceso es una tarea que exige el desarrollo de nuevas metodologías, las cuales consideren simultáneamente la evaluación del riesgo y el costo asociado a la distribución de éstas, así como la posibilidad de realizar una estimación de las consecuencias que puede ocasionar un incidente industrial. De esta manera, encontrar la mejor distribución de las unidades de proceso no resulta una tarea trivial, debido a que el costo y el riesgo son dos criterios que se contradicen entre sí, debido a que una mayor separación entre las instalaciones lleva consigo un mayor costo (incluyendo bombeo, tuberías, entre otros), pero a su vez un menor riesgo puesto que las instalaciones se encuentran más separadas disminuyendo el riesgo de resultar dañadas, en caso de que suceda un accidente en instalaciones cercanas que sean consideradas de peligro. Aunado a este conflicto entre costo y riesgo se tiene un problema en el cual se tiene que escoger una distribución óptima de un gran conjunto de soluciones posibles, lo cual está fuertemente ligado al número de instalaciones a distribuir (Armour y Buffa, 1963).

Varias son las causas de accidentes; sin embargo, la inadecuada distribución de las instalaciones industriales ha sido responsable de varios de los accidentes históricos con mayores pérdidas humanas así como económicas, un ejemplo claro es el caso de la explosión ocurrida en la planta de polietileno en Pasadena, Texas en 1989, la cual causó 23 muertes así como pérdidas económicas estimadas en \$715,000,000. La inadecuada separación entre las instalaciones de proceso fue señalada como la causa de estas cuantiosas pérdidas (Dole y Scannell, 1990). Las consecuencias de las catástrofes industriales han mostrado que una distribución adecuada de las

instalaciones de proceso es un elemento clave a fin de evitar o minimizar las consecuencias de éstos. La implementación de medidas adecuadas que nos ayuden a evaluar el riesgo desde la etapa de planeación de cualquier proceso químico es una de las principales enseñanzas que hemos obtenido de los accidentes de alto impacto que han ocurrido. Dentro de este contexto, conocer las consecuencias que originan las grandes catástrofes históricas nos conducirá a la necesidad de implementar nuevas normas, prácticas así como tecnologías que nos permitan reducir el riesgo (Mannan y col., 2007). En el presente trabajo, se aborda el problema de la distribución de las instalaciones en una planta industrial considerando problemas multi-objetivo, donde los objetivos a minimizar son el costo y el riesgo. En el Capítulo 2, se presentan las definiciones y conceptos claves utilizados para el desarrollo de las metodologías presentadas, así como las herramientas utilizadas para la solución de los problemas resultantes, también en el Capítulo 2 se presenta una descripción de algunos trabajos de investigación los cuales sirvieron de guía para la elaboración de las presentes metodologías.

La metodología utilizada para la formulación de los modelos de optimización, así como el desarrollo de dos modelos de optimización relacionados con la distribución de instalaciones mostrada en el Capítulo 3. . El primero es modelo de optimización general, el cual permite encontrar la distribución óptima de un conjunto de nuevas instalaciones, éste permite también la reubicación de instalaciones existentes instaladas en ubicaciones poco seguras. El segundo modelo consiste en encontrar la distribución final de las instalaciones de una industria a diferentes periodos, esto con la finalidad de considerar futuras ampliaciones ocasionadas por el aumento en la capacidad de producción, lo cual trae como consecuencia la adición de nuevas unidades al proceso. De esta manera, en este problema es necesario considerar el cambio del costo y riesgo con respecto del tiempo.

La discusión de los resultados es mostrada en el Capítulo 4, en éste se hace un análisis detallado del conjunto de soluciones obtenidas. Los resultados muestran la importancia de considerar problemas multi-objetivo debido a que la elaboración de curvas Pareto proporciona un conjunto de soluciones equilibradas entre costo y riesgo.

1.2 Justificación

Para la distribución y localización de un conjunto de instalaciones de un proceso industrial, la mayoría de las metodologías existentes abordan el problema sólo considerando el costo, es decir, la menor distancia de separación debido a que esta metodología permite disminuir los costos asociados a tuberías y bombeo. Sin embargo, actualmente debido a las catástrofes ocasionadas por los accidentes industriales donde se producen graves consecuencias económicas y la pérdida invaluable de vidas humanas, los aspectos de seguridad han tomado una gran importancia. La problemática anterior nos conduce a desarrollar nuevas metodologías, las cuales incluyan el costo y el riesgo como criterios de valoración, para obtener una distribución económica y segura de las instalaciones. Por otra parte, los enfoques existentes que abordan el problema de la distribución de instalaciones considerando el riesgo y el costo simultáneamente presentan ciertas limitaciones en cuanto a su aplicación práctica, debido a que estas metodologías sólo consideran el problema cuando se requiere instalar una nueva planta de procesamiento donde todas las instalaciones son nuevas; sin embargo, en la práctica la mayoría de las plantas de procesamiento ya se encuentran instaladas y sus instalaciones distribuidas, esto nos conduce a considerar ahora el problema de tener la posibilidad de además de agregar múltiples nuevas instalaciones poder reubicar las unidades existentes, con la finalidad de minimizar el riesgo asociado a una mala distribución de las instalaciones de proceso minimizando simultáneamente el costo asociado a este reajuste. Por otra parte, de la experiencia se sabe que la gran mayoría de las plantas tienden a sufrir modificaciones durante su tiempo de vida, tales como: aumento de su capacidad de producción así como la adición de nuevas unidades al proceso, de esta manera, resulta útil el desarrollo de metodologías que proporcionen distribuciones óptimas, tomando en cuenta estos cambios que pudieran ocurrir en cada periodo de operación.

1.3 Hipótesis

Los modelos matemáticos que se desarrollarán permitirán obtener soluciones óptimas para la distribución de las instalaciones en las industrias, estos modelos propuestos ayudaran a disminuir el riesgo así como el costo asociado a la distribución de instalaciones en una planta industrial.

1.4 Objetivo general

El objetivo general de este proyecto consiste en la elaboración y aplicación de estrategias de modelación y programación para la localización óptima de instalaciones industriales, considerando simultáneamente aspectos económicos y de seguridad.

1.5 Objetivos específicos

- Formular un modelo de programación disyuntiva multi-objetivo, el cual permita encontrar la distribución y/o reubicación óptima de las instalaciones considerando el costo y el riesgo simultáneamente.
- Incluir la variable tiempo, mediante el desarrollo de un modelo de optimización multi-periodo para considerar la proyección de la producción de la planta así como su costo y riesgo acumulado durante su vida útil.
- Seleccionar y resolver casos de estudio representativos para mostrar la aplicación de las metodologías desarrolladas.
- Elaborar un análisis cuantitativo del riesgo, para determinar los accidentes potenciales que pueden ocurrir en los casos de estudio seleccionados.
- Desarrollar una estrategia para la cuantificación del riesgo asociado a la ubicación de las nuevas instalaciones, así como a la reubicación de las existentes.
- Generar los programas en la plataforma GAMS para encontrar las soluciones de los modelos obtenidos, y que estos programas estén disponibles para otras aplicaciones.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

Dentro de una planta de proceso existen una gran variedad de peligros, de los cuales los de carácter mecánicos (equipos en movimiento) y químicos (incluyen fuego y explosión así como liberación de sustancias tóxicas), son los más comunes y estos son aquellos que deben ser disminuidos o eliminados. En este sentido, se han propuesto metodologías que ayudan a minimizar el nivel de riesgo asociado a los procesos químicos desde la etapa de diseño. Sin embargo, es necesario mencionar que el riesgo cero no existe, es decir, siempre que exista un proceso determinado existirá un peligro y con éste un riesgo. De esta manera, cuando se reduce el riesgo en un determinado proceso, se habla de que el riesgo de este proceso fue reducido hasta un riesgo aceptable, pero no eliminado totalmente. El concepto llamado “seguridad inherente”, el cual fue introducido por primera vez en diciembre de 1977 por Trevor Kletz (ver AICHE₁₀₀), es el enfoque más cercano a un riesgo cero. La principal filosofía de este concepto se debe a que en lugar de controlar el riesgo se debe evitar; “Lo que no tienes no se puede fugar”, es el principal lema de esta filosofía. Como la seguridad perfecta no puede ser alcanzada, en la práctica es común hablar acerca de un diseño inherentemente seguro. Los cuatro principios de este concepto son:

- 1.- **Minimizar:** Reducir la cantidad de materiales peligrosos presentes en cualquier momento.
- 2.- **Substituir:** Reemplazar un material con otro menos peligroso, por ejemplo, limpiar con agua y detergente y no con un solvente inflamable.
- 3.- **Moderar:** Reducir la potencia de un efecto, por ejemplo, usar un líquido frío en vez de un gas a alta presión, o usar un material de forma diluida y no concentrada.
- 4.- **Simplificar:** Diseñar para evitar los problemas más que agregar equipo o características adicionales para manejarlos. Integrar opciones y usar procedimientos complejos sólo si ellos son realmente necesarios.

Cabe mencionar que el enfoque considerado en el desarrollo de los modelos para la minimización del riesgo se encuentra dentro de este concepto, debido a que se propone un modelo que minimice el riesgo desde la etapa de diseño.

El riesgo es uno de los criterios considerados dentro de la metodología, para seleccionar la ubicación óptima de las instalaciones de una planta química, para la cuantificación de éste existen diferentes metodologías, de las cuales la metodología Probit (ver Crowl and Louvar) fue la utilizada para cuantificar las consecuencias derivadas de accidentes. Esta metodología se basa en la cuantificación probabilística de la vulnerabilidad de personas e instalaciones ante efectos físicos de una magnitud determinada que se suponen conocidos.

La vulnerabilidad de las personas se expresa como el número de individuos que previsiblemente pueden resultar afectados con un cierto nivel de daño a causa de un accidente (riesgo social). Por otra parte, la vulnerabilidad de instalaciones se puede cuantificar utilizando magnitudes económicas, aunque el análisis se reduce a estimaciones de daños en estructuras y roturas de cristales. El método permite determinar la proporción de población u otros elementos que resultarán afectados a consecuencia del accidente en un punto dado.

Los modelos propuestos en el presente proyecto son modelos formulados como problemas multi-objetivo, en los cuales la minimización simultanea del costo y riesgo es requerida. Un problema de optimización multi-objetivo es un problema de decisión que puede ser descrito como un conjunto de objetivos, los cuales se pretenden maximizar o minimizar, sujetos a igualdades y desigualdades; la ecuación 1 ilustra la formulación de este tipo de problemas.

$$\begin{aligned} \min \text{ o } \max (\text{Obj } 1, \text{Obj } 2, \dots, \text{Obj } n) \\ g(x) \leq R \\ s(x) = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

Las soluciones que proporcionen el mejor compromiso entre los objetivos son denominadas soluciones eficientes, óptimas de Pareto o no dominadas. En la literatura existen varios métodos para solucionar problemas multi-objetivo. Los métodos son clasificados como métodos de pre-asignación, interactivos y de selección posterior.

Los métodos de pre-asignación posterior (*Goal Programming*) requieren la asignación de valores esperados a los objetivos. Éstos tienen la ventaja que requieren bajo esfuerzo computacional, lo que los convierte en uno de los más usados con fines prácticos, la desventaja que poseen estos métodos se debe a que estos requieren información precisa del problema analizado.

Los métodos multi-objetivo interactivos son algoritmos o métodos basados en una secuencia de procedimientos de cálculo computacional y decisiones del analista a fin de orientar la búsqueda de las soluciones.

Estos métodos no son usados con mucha frecuencia, debido a que éstos requieren alto requerimiento de interacción con el programa. Los métodos de asignación de pesos “*e-constraint*” y el “Weighted Sum Method” tienen como objetivo encontrar un conjunto de soluciones no dominadas del problema, de las cuales será seleccionada la solución que sea considerada como la más atractiva. La principal desventaja de este método consiste en el elevado esfuerzo y tiempo de cómputo para la evaluación del conjunto de soluciones. El método utilizado, para la solución de los modelos multi-objetivo desarrollados en el presente proyecto, fue el método “*e-constraint*”, debido a que éste permite compensar adecuadamente los objetivos contradictorios.

El método *e-constraint*, consiste en la transformación de un problema multi-objetivo en un conjunto de problemas con un sólo objetivo, en este problema uni-objetivo reformulado, se selecciona un objetivo que requiere ser minimizado o maximizado, dejando los demás objetivos como restricciones. En caso concreto, para fines de este proyecto, en los modelos planteados se tienen dos funciones objetivo, la función costo y la función riesgo, para la aplicación de este método, se selecciona la función del costo como la función a minimizar, tomando la función del riesgo como restricción. La Figura 1.1 ilustra la aplicación del método *constraint* aplicado al problema en cuestión. En esta figura se ilustra también la forma en la que fueron obtenidas las curvas Pareto mediante este método.

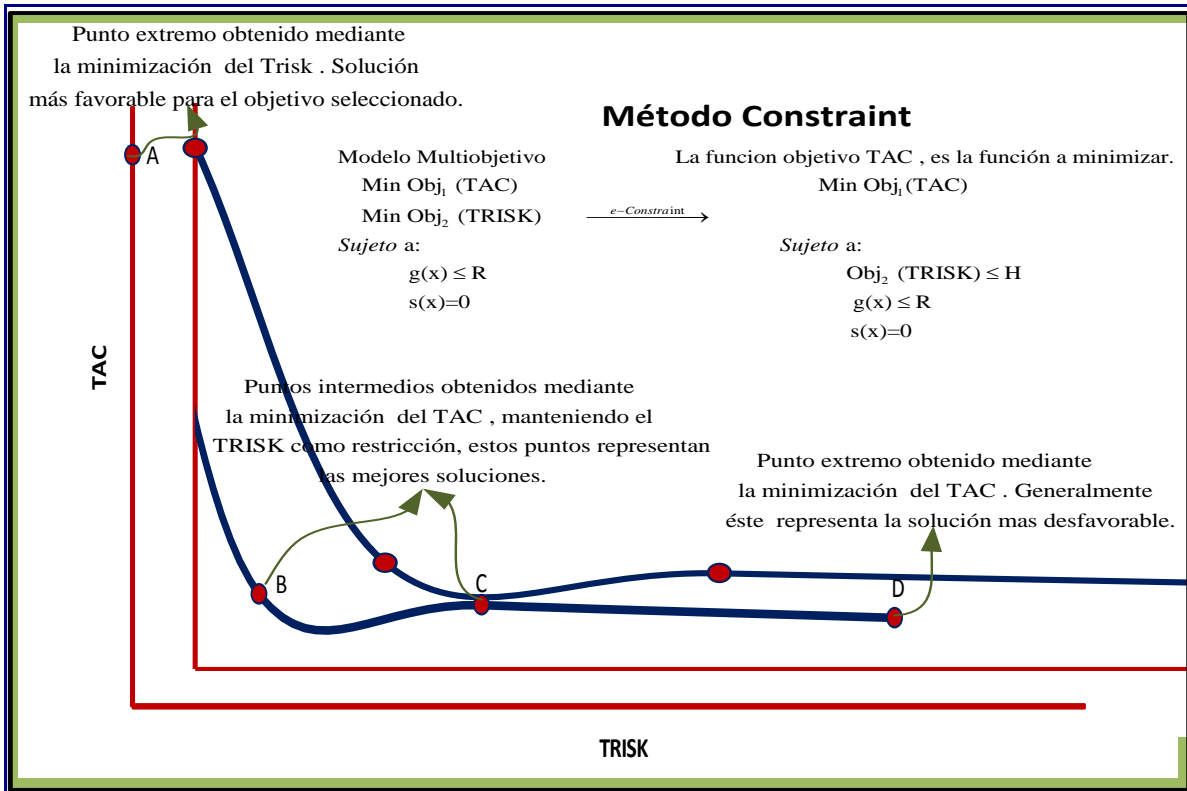


Figura 1. 1 Representación gráfica del método e-constraint.

El algoritmo para la aplicación de este método es el siguiente:

- 1.- Enumerar y listar todos los objetivos del problema.
- 2.- Seleccionar uno de los objetivos a minimizar y utilizar los restantes como restricciones.
- 3.- Resolver el problema de un sólo objetivo.
- 4.- Resolver el problema uni-objetivo para diferentes valores de los objetivos tomados como restricciones, esto para generar la curva Pareto.
- 5.- Repetir el procedimiento para los objetivos restantes.

2.1 Antecedentes

Recientemente se han propuesto varias metodologías que consideran el problema de la localización de las instalaciones considerando el riesgo asociado.

En este sentido, Díaz-Ovalle y col. (2010) propusieron un enfoque para abordar el problema referido a la búsqueda de la distribución de las instalaciones considerando un conjunto de unidades ya instaladas en un terreno, en donde consideran la adición de múltiples nuevas instalaciones, tomando como criterios para la ubicación segura de las instalaciones el peor escenario y suponiendo la incertidumbre de parámetros meteorológicos. Al mismo tiempo, Jung y col. (2010) propusieron una metodología que considera la localización óptima de un conjunto de nuevas instalaciones considerando un mapeo del riesgo. En el mismo ámbito, Vázquez-Román y col. (2010) consideraron un enfoque estocástico para resolver el problema de la ubicación de las instalaciones, incorporando el efecto de la velocidad y dirección del viento en la dispersión de gases. Por otra parte, dentro de la distribución de las unidades de proceso, es necesario considerar la interacción de las instalaciones evaluando el riesgo y costo de interconexión; en este sentido, Han y col. (2010) propusieron una metodología para integrar el análisis cuantitativo del riesgo en una red de distribución de gas natural, con el objetivo de evaluar el riesgo asociado a esta red de suministro. La integración de un enfoque conceptual a las metodologías actuales permite decidir los mejores procedimientos a seguir para la distribución de las instalaciones (Paterson y col., 2000; Sanders, 2003). Existen además metodologías que consideran la evaluación del riesgo en la distribución de instalaciones, considerando la propagación de un evento “efecto dominó”, en el cual un accidente o evento inicial puede ocasionar otros accidentes o explosiones, incrementando de esta manera las consecuencias del accidente inicial. Accidentes como el ocurrido en san Juan Ixhuatepec en 1984 es un ejemplo claro de accidentes tipo dominó. Fuego y explosión son los accidentes más frecuentes que originan el efecto dominó (Abdolhamidzadehet y col., 2010). Los trabajos realizados por Cozzani y col. (Cozzani y Salzano, 2004^{a,b}; Cozzani y col., 2005; Salzano y Cozzani, 2005; Cozzani y col., 2006; Cozzani y col., 2006; Cozzani y col., 2007; Landucci y col., 2008) se concentran en la cuantificar el riesgo y los daños ocasionados por la sobrepresión generada en una explosión con efecto dominó. Sin embargo, aunque las metodologías existentes consideran el riesgo y el costo dentro de sus formulaciones, éstas no garantizan distribuciones

óptimas en el caso de tener una expansión futura, es decir a la adición de nuevas instalaciones al proceso.

Generalmente, cuando se requiere instalar una nueva planta industrial, se realiza una proyección en cuanto a las ventas y demandas que va a tener el producto, esto con la finalidad de determinar su viabilidad económica así como para determinar el tamaño de las instalaciones y la capacidad a utilizar en los diferentes periodos de operación (Peters y col., 2003).

De esta manera, tanto la cantidad de materia prima a utilizar y la cantidad de productos a obtener se incrementarán con el tiempo, de tal manera que el riesgo será diferente para cada periodo en el cual existe un incremento en la capacidad de operación de la planta, simultáneamente el costo será diferente en el caso que sea requerida la adición de nuevas unidades.

Existen propuestas que se centran en el reajuste de plantas industriales, las cuales tienen como uno de sus objetivos principales, dada una planta existente, acondicionarla de tal manera que pueda ser aumentada la capacidad de procesamiento considerando el factor tiempo, (Montagna-Marcelo, 2003; Pinto y col., 2005; Sujo-Nava, 2008; Wei y col., 2012; Dedieu, 2003; Chainho y col., 2013; Brown y col., 2005; Liu y Jobson, 2003; Garcia-Ayala y col, 2012), los resultados de estas metodologías proporcionan información relacionada a la cantidad de material a procesar por periodos así como de la infraestructura que debe ser adicionada para satisfacer los requerimientos de producción .

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

La primera de las dos partes en la que fue dividida esta sección aborda el problema de la distribución de las instalaciones a un sólo periodo, esto considerando aspectos económicos así como de seguridad además de la posibilidad de reubicar instalaciones previamente instaladas. En la segunda sección, el problema de la distribución se centra en considerar la instalación de las unidades a diferentes periodos, esto con el propósito de poder adicionar nuevas unidades en un tiempo determinado, proporcionando una ubicación económica y segura de las nuevas unidades, para lo cual, el costo y el riesgo son factores considerado en la formulación de la metodología, en donde éstos son evaluados a diferentes periodos de operación. Los principales puntos abordados en las metodologías son la declaración del problema a resolver, la formulación del modelo matemático así como la estrategia de solución.

3.1 Localización óptima de instalaciones industriales considerando simultáneamente aspectos económicos y de seguridad.

3.1.1 Declaración del problema

Anteriormente las metodologías para la distribución de las instalaciones industriales sólo consideraban el costo como criterio a evaluar, sin considerar los aspectos de seguridad (ver por ejemplo Georgiadis y Macchietto, 1997; Jayakumar y Reklaitis, 1994; Jayakumar y Reklaitis, 1996), distribuyendo de forma poco segura las instalaciones, además de que utilizaban un enfoque heurístico (ver Mannan, 2005; Mecklenburgh, 1973; Patsiatzis y Papageorgiou, 2002). A fin de corregir esta problemática, nuestro problema consiste en considerar la reubicación de múltiples instalaciones ya instaladas, las cuales se encuentran a distancias inseguras, cercanas a las instalaciones de alto peligro, considerando el costo y el riesgo simultáneamente como criterios de optimización, al mismo tiempo se considera la adición de múltiples nuevas instalaciones. Para propósitos de este trabajo, el terreno es dividido en grids discretos de forma rectangular con coordenadas (i,j) para el centro de cada grid (Ozyurt y Realff, 1999; Penteadó y Ciric, 1996) como se puede apreciar en la Figura 3.1. En esta figura se muestra un conjunto de instalaciones existentes en un terreno, las cuales pueden ser reubicadas a diferentes grids que representen posiciones más seguras con respecto a su posición anterior.

Por otra parte, en la misma Figura 3.1 podemos observar también un conjunto de nuevas instalaciones que pueden ser adicionadas considerando los mismos criterios, además de considerar el costo de interconexión entre las nuevas instalaciones. El problema general se define de la siguiente manera: dado una porción de terreno, el cual contiene un conjunto de unidades ya instaladas, dentro de las cuales existen instalaciones que pueden ser consideradas de peligro, debemos encontrar las coordenadas (i,j) en las cuales se agregara un conjunto de nuevas instalaciones o donde se reubicaran un conjunto de instalaciones existentes al menor costo de interconexión y riesgo de instalación.

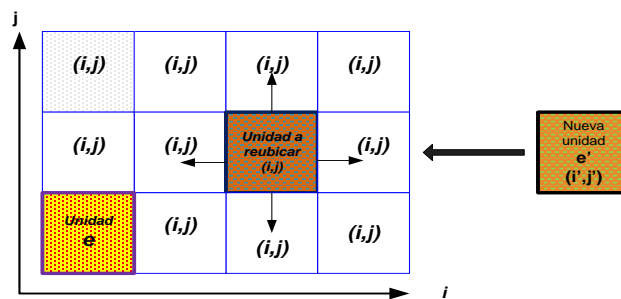


Figura 3. 1. Representación esquemática del problema.

3.1.2 Formulación del modelo

Para una mejor comprensión del modelo propuesto, primero los subíndices que aparecen en la Figura 3.1 serán definidos. En ese sentido, i, i', j, j' representan las coordenadas del centro de cada grid discreto, en los cuales se puede adicionar o reubicar una instalación. El subíndice e , representa las instalaciones que pueden ser agregadas o reubicadas. Basándonos en la Figura 3.1, la formulación matemática es mostrada a continuación. Si consideramos que los equipos existentes se tratan como equipos nuevos; es decir, todos se van a instalar en posiciones nuevas con la diferencia que el costo de instalación en la posición actual es cero. Tomando en cuenta lo dicho anteriormente, se formula la siguiente disyunción para modelar el problema (ver ecuación 2).

$$\vee \begin{matrix} i \in I \\ j \in J \end{matrix} \left[\begin{array}{c} Y_{i,j,e} \\ IntCost_e = UIC_{i,j,e} \\ LandCost_e = UL_{i,j,e} \\ Risk_e = UR_{i,j,e} \end{array} \right], \forall e \in E \quad (2)$$

En la disyunción anterior podemos apreciar la variable booleana $Y_{i,j,e}$, la cual está asociada a la existencia de una instalación en las coordenadas (i,j) , si ésta existe tendremos un costo de interconexión $IntCost_e$, entre las instalaciones nuevas con las existentes y el riesgo de instalación $Risk_e$; así como el costo del terreno $UIC_{i,j,e}$. Además, el parámetro $UR_{i,j,e}$, representa el número de fatalidades en las coordenadas i,j ; las cuales se esperarían considerando como accidentes potenciales, Boiling-Liquid Expanding-Vapor (BLEVE) y Vapor Cloud Explosión (VCE). El parámetro $IntCost_e$ es el costo de interconexión, el cual es calculado entre las instalaciones nuevas con las existentes, y $UL_{i,j,e}$, es el costo del terreno, el cual considera el costo de la instalación así como el del terreno. Los parámetros anteriores son calculados previos a la optimización.

3.1.2.1 Reformulación

La disyunción anterior es reformulada como un conjunto de ecuaciones algebraicas, en donde las variables Booleanas son transformadas en variables binarias. De esta manera, cuando la variable Booleana es verdadera ($y_{i,j,e}$), la variable binaria toma el valor de uno, y cuando la variable Booleana es falsa, la variable binaria es igual a cero. Se utiliza una reformulación Convex hull (Raman y Grossmann, 1994), para convertir las disyunciones en ecuaciones algebraicas. Las ecuaciones dentro de la disyunción son escritas en términos de variables desagregadas.

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} y_{i,j,e} = 1, \quad \forall e \in E \quad (3)$$

$$IntCost_e = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} DIntCost_{i,j,e}, \quad \forall e \in E \quad (4)$$

$$LandCost_e = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} DLandCost_{i,j,e}, \quad \forall e \in E \quad (5)$$

$$Risk_e = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} DRisk_{i,j,e} \quad , \forall e \in E \quad (6)$$

$$DIntCost_{i,j,e} = UIC_{i,j,e} y_{i,j,e} \quad , \forall i \in I, \forall j \in J, \forall e \in E \quad (7)$$

$$DLandCost_{i,j,e} = ULC_{i,j,e} y_{i,j,e} \quad , \forall i \in I, \forall j \in J, \forall e \in E \quad (8)$$

$$DRisk_{i,j,e} = UR_{i,j,e} y_{i,j,e} \quad , \forall i \in I, \forall j \in J, \forall e \in E \quad (9)$$

3.1.2.2 Restricciones

Las unidades que no resulte práctico reubicar, se fija su ubicación en las coordenadas (i,j) mediante la siguiente restricción.

$$y_{i,j,e} = 1, \quad \forall e \in FE \quad (10)$$

La restricción anterior establece que si existe un equipo, el cual desde el punto de vista económico y práctico no sea posible mover, se puede fijar su posición en las coordenadas en las cuales la variable binaria $y_{i,j,e}$, tomara el valor de 1.

Para considerar la distancia mínima de separación entre los equipos se introduce el parámetro binario $\delta_{i,j}$, el cual en la siguiente restricción indica que si este toma el valor de 1, no se deberá instalar una instalación en dichas coordenadas, esto con el propósito de tener un espacio entre instalaciones con la finalidad de facilitar maniobras debido a contingencias.

$$\delta_{i,j} + y_{i,j,e} \leq 1 \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall e \in E \quad (11)$$

A fin de evitar sobreposición entre las unidades nuevas, se formula la siguiente restricción, la cual indica que en las coordenadas (i,j) sólo se puede instalar una unidad.

$$\sum_e y_{i,j,e} \leq 1 \quad , \forall i \in I, \forall j \in J \quad (12)$$

Dada una instalación $y_{i,j,e}$ y otra $y_{i',j',e'}$, la variable binaria $z_{i,j,e,i',j',e'}$ se asocia a la existencia de interconexión entre ambos equipos, la siguiente restricción nos indica que si existen ambas instalaciones, entonces existirá interconexión entre ellos.

$$(2 - y_{i,j,e} - y_{i',j',e'}) + z_{i,j,e,i',j',e'} \geq 1, \forall i \in I, i' \in I, i \neq i', \forall j \in J, j' \in J, j \neq j', \forall e \in E, \forall e' \in E', e > e' \quad (13)$$

La primera disyunción sólo considera el costo de interconexión entre las nuevas instalaciones con las existentes; sin embargo, para considerar el costo de interconexión entre las unidades nuevas se formula la siguiente disyunción.

$$\vee \left[\begin{array}{l} z_{i,j,e,i',j',e'} \\ i, i' \quad IntCost_{e,e'} = UICI_{i,j,e,i',j',e'} \\ j, j' \quad RiskInt_{e,e'} = URiskInt_{i,j,e,i',j',e'} \end{array} \right], \forall e \in E, \forall e' \in E', e > e' \quad (14)$$

3.1.2.3 Interconexión

La disyunción anterior indica la interconexión existente entre las nuevas instalaciones de esta manera si existe interconexión entre ellas, la variable booleana $z_{i,j,e,i',j',e'}$ toma el valor de uno y para esta interconexión tendremos un costo de interconexión $IntCost_{e,e'}$ y un riesgo de interconexión entre las nuevas instalaciones.

Nuevamente, la disyunción anterior es reformulada mediante el convex hull resultando las siguientes ecuaciones algebraicas:

$$\sum_i \sum_j \sum_{i'} \sum_{j'} z_{i,j,e,i',j',e'} = 1, \forall e \in E, \forall e' \in E', e > e' \quad (15)$$

$$IntCost_{e,e'} = \sum_i \sum_j \sum_{i'} \sum_{j'} DIntCost_{i,j,e,i',j',e'}, \forall e \in E, \forall e' \in E', e > e' \quad (16)$$

$$RiskInt_{e,e'} = \sum_i \sum_j \sum_{i'} \sum_{j'} DRiskInt_{i,j,e,i',j',e'}, \forall e \in E, \forall e' \in E', e > e' \quad (17)$$

$$DIntCost_{i,j,e,i',j',e'} = UICI_{i,j,e,i',j',e'} z_{i,j,e,i',j',e'}, \forall i \in I, \forall j \in J, \forall e \in E, \forall e' \in E', e > e' \quad (18)$$

$$DRiskInt_{i,j,e,i',j',e'} = URiskInt_{i,j,e,i',j',e'} z_{i,j,e,i',j',e'}, \forall i \in I, \forall j \in J, \forall e \in E, e > e' \quad (19)$$

3.1.2.4 Funciones Objetivo

El modelo es formulado como un problema de optimización multi-objetivo para la minimización simultanea del TAC y del $TRisk$ y está representado por la siguiente expresión.

$$OF = \{\min TAC; \min TRisk\}$$

Cabe resaltar que para este planteamiento en específico, los objetivos a minimizar se contradicen entres sí, debido a que para una mayor distancia de separación entre las unidades, el costo total aumenta debido a que el costo de interconexión se incrementa; sin embargo, a una mayor separación el riesgo disminuye.

3.1.2.4.1 Función Objetivo Económica

La función objetivo del costo total anual es expresada como sigue:

$$TAC = \sum_{e \in E} IntCost_e + \sum_{e \in E} LandCost_e + \sum_{e \in E} \sum_{e' \in E, e' > e} IntCost_{e,e'} \quad (20)$$

En donde, TAC representa el costo total anual (\$/año), el cual es igual a la suma del $IntCost_e$, costo de interconexión de los equipos nuevos con los existentes, más $LandCost_e$ el costo del terreno ocupado por la nueva unidad a instalar, éste incluye el costo de la instalación así como un costo por acondicionamiento del terreno, más $IntCost_{e,e'}$ el costo de interconexión entre los nuevos equipos.

3.1.2.4.2 Función Objetivo Riesgo

El riesgo total asociado a la distribución de las instalaciones es calculado de la siguiente manera:

$$TRisk = \sum_{e \in E} Risk_e + \sum_{e \in E} \sum_{e' \in E, e' > e} RiskInt_{e,e'} \quad (21)$$

De la ecuación anterior, $TRisk$ (fatalidades) está en función del riesgo de instalación de los equipos nuevos y de los que son reubicados ($Risk_e$) y del riesgo de interconexión entre las nuevas instalaciones.

Para determinar el conjunto Pareto de soluciones óptimas, el cual compensa ambos objetivos se utiliza el método "constraint" (ver Haimés y col., 1971).

La estrategia básica de este método consiste en transformar el problema multi-objetivo en una serie de problemas con un sólo objetivo, seleccionando una de las funciones objetivo como el objetivo a minimizar (en este caso el *TAC*) y definiendo la otra como restricción (*TRisk*); esta estrategia permite conocer a partir de un valor de *TRisk* (fatalidades) el mínimo costo requerido.

3.2 Localización y reubicación óptima de instalaciones en una planta industrial, considerando un enfoque multi-anual así como aspectos económicos y de seguridad.

3.2.1 Declaración del problema

Las metodologías propuestas previamente abordan el problema de la distribución de unidades considerando un sólo periodo de instalación; es decir, se obtienen configuraciones las cuales sólo contemplan un conjunto de unidades iniciales a instalar, donde se supone que éstas no cambian hasta el final del ciclo de vida de la planta. La principal desventaja de estas metodologías es que estas no consideran futuras adiciones de nuevas unidades al proceso. La Figura 3.2 muestra un terreno dividido en grids discretos rectangulares con coordenadas (i,j) , los cuales representan el centro de cada grid. En la Figura 3.2 se puede apreciar también que para un tiempo inicial (t_0), existe un conjunto de unidades existentes previamente instaladas, las cuales operan a capacidades menores a la de diseño. Sin embargo, después de varios periodos de tiempo, debido a un aumento en la demanda de producto, es necesario incrementar esta capacidad para satisfacer esta demanda que se incrementa. Este aumento en la capacidad de producción puede traer consigo la necesidad de adicionar nuevas unidades al proceso, las cuales deberán ser instaladas en posiciones económicas y seguras, considerando las ya existentes así como el valor del dinero en el tiempo y el riesgo acumulado, el cual se ve incrementado con el aumento en la capacidad de producción. El problema consiste en encontrar las coordenadas (i,j) , en los diferentes periodos de tiempo, en las cuales la unidad e debe ser adicionada o reubicada, considerando simultáneamente la minimización del costo y el riesgo acumulado.

3.2.2 Formulación del modelo.

Para una mejor comprensión del modelo, primero los conjuntos utilizados son definidos i , i' y j' (donde $i \neq i'$, $j \neq j'$) representan las coordenadas del centro de cada grid, donde una unidad e puede ser instalada o reubicada.

El subíndice e representa la unidad que debe ser instalada o reubicada así como las unidades existentes, el subíndice t representa el periodo en el cual la unidad e debe ser agregada o reubicada. La formulación del modelo se basa en la representación presentada en la Figura 3.2.

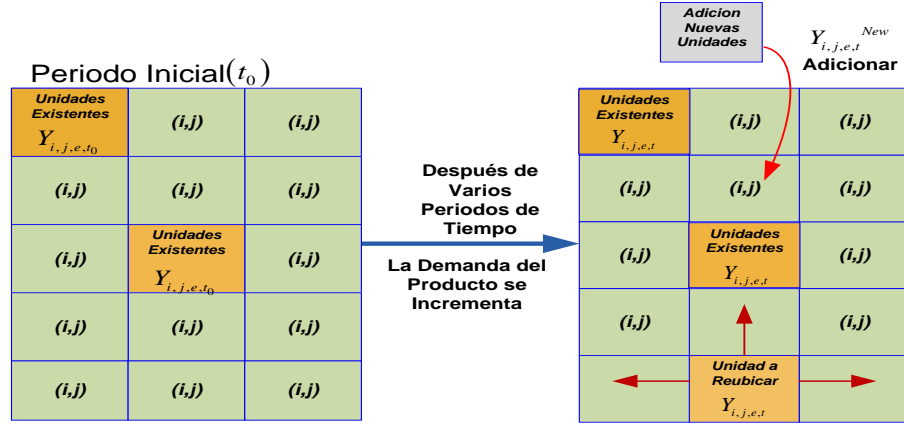


Figura 3. 2. Superestructura propuesta para el reajuste y localización de instalaciones.

Para propósitos de modelado, las unidades ya existentes son tratadas como nuevas; es decir, todas las unidades e son consideradas como nuevas, las cuales serán instaladas en nuevas localizaciones. Sin embargo, para las ya existentes, el costo de instalación en su actual posición será igual a cero. Considerando lo anterior, la siguiente disyunción es formulada.

$$\begin{array}{l}
 \forall \\
 i \forall I \\
 j \forall J
 \end{array}
 \left[\begin{array}{c}
 Y_{i,j,e,t} \\
 ECost_{e,t} = UEC_{i,j,e,t} \\
 ERisk_{e,t} = UER_{i,j,e,t} \\
 \left[\begin{array}{c}
 Z_{i,j,e,i',j',e',t} \\
 IntCost_{e,e',t} = UIC_{i,j,e,i',j',e',t} \\
 IntRisk_{e,e',t} = UIR_{i,j,e,i',j',e',t}
 \end{array} \right] \vee \left[\begin{array}{c}
 \neg Z_{i,j,e,i',j',e',t} \\
 IntCost_{e,e',t} = 0 \\
 IntRisk_{e,e',t} = 0
 \end{array} \right], \forall e \in E, \forall t \in T \\
 \left. \begin{array}{l}
 \forall e \in E \\
 \forall t \in T \\
 \forall t > 1
 \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l}
 \forall e \in E, \forall t \in T \\
 \forall e' \in E, e < e'
 \end{array} \right\}
 \end{array} \right] \quad (22)$$

En el primer nivel de la disyunción podemos apreciar la variable Booleana $Y_{i,j,e,t}$, la cual está asociada con la adición de nuevas unidades en las coordenadas (i,j) , sobre el periodo de tiempo t .

Si ésta existe, entonces significa que la variable $Y_{i,j,e,t}$ es verdadera, entonces se tendrá un costo de instalación ($ERisk_{e,t}$) asociado a esta unidad y un costo de existencia ($ECost_{e,t}$); el cual, sí las unidades ya fueron previamente instaladas ésta será igual a cero. En el segundo nivel de la disyunción (disyunción anidada), la variable Booleana ($Z_{i,j,e,i',j',e',t}$) es asociada con la interconexión entre las unidades, si la unidad $Y_{i,j,e,t}$ es instalada al mismo tiempo que la unidad $Y_{i',j',e',t'}$, entre estas dos unidades podrá existir interconexión, por lo tanto sí $Z_{i,j,e,i',j',e',t}$ es verdadera, significa que existe interconexión entre las unidades y de esta manera tendremos un costo de interconexión entre éstas ($IntCost_{e,e',t}$) además de un riesgo de interconexión ($IntRisk_{e,e',t}$). En caso contrario, sí es falsa, entonces el costo y el riesgo de interconexión serán iguales a cero. En la disyunción anterior, $UEC_{i,j,e,t}$, $UER_{i,j,e,t}$, $UIC_{i,j,e,i',j',e',t}$ y $UR_{i,j,e,i',j',e',t}$ representan parámetros, los cuales son calculados antes de realizar la optimización, en el capítulo 4 se aborda a detalle el cálculo de ellos.

3.2.2.1 Reformulación

La disyunción anterior es reformulada como un conjunto de ecuaciones algebraicas, donde las variables Booleanas son transformadas en variable binarias. Así, cuando la variable binaria $y_{i,j,e,t}$ es verdadera, ésta toma el valor de 1, por otra parte sí ésta es falsa ($\neg Y_{i,j,e,t}$), el valor que tomará es cero. Lo mismo aplica para la variable binaria $Z_{i,j,e,i',j',e',t}$. La reformulación del Convex hull es utilizada para la reformulación de la disyunción anterior (ver Raman y Grossmann, 1994). Para convertir la disyunción en un conjunto de ecuaciones algebraicas, primero las variables continuas son desagregadas como sigue:

$$ERisk_{e,t} = \sum_i \sum_j DERisk_{i,j,e,t} \quad , \forall e \in E, \forall t \in T \quad (23)$$

$$ECost_{e,t} = \sum_i \sum_j DECost_{i,j,e,t} \quad , \forall e \in E, \forall t \in T \quad (24)$$

$$IntRisk_{e,e',t} = \sum_i \sum_j \sum_{i'} \sum_{j'} DIntRisk_{i,j,e,i',j',e',t} \quad , \forall e \in E, \forall e' \in E', \forall t \in T, e < e' \quad (25)$$

$$IntCost_{e,e',t} = \sum_i \sum_j \sum_{i'} \sum_{j'} DIntCost_{i,j,e,i',j',e',t} \quad , \forall e \in E, \forall e' \in E', \forall t \in T, e < e' \quad (26)$$

Después, las ecuaciones son escritas en término de variables desagregadas:

$$DERisk_{i,j,e,t} = UER_{i,j,e,t} y_{i,j,e,t} \quad , \forall i \in I, \forall j \in J, \forall e \in E, \forall t \in T \quad (27)$$

$$DECost_{i,j,e,t} = UEC_{i,j,e,t} y_{i,j,e,t} \quad , \forall i \in I, \forall j \in J, \forall e \in E, \forall t \in T \quad (28)$$

$$DIntCost_{i,j,e,i',j',e',t} = UIC_{i,j,e,i',j',e',t} z_{i,j,e,i',j',e',t} \quad , \forall i \in I, \forall j \in J, \forall e \in E, \forall i' \in I', \forall j' \in J', \forall e' \in E', \forall t \in T, e < e' \quad (29)$$

$$DIntRisk_{i,j,e,i',j',e',t} = UIR_{i,j,e,i',j',e',t} z_{i,j,e,i',j',e',t} \quad , \forall i \in I, \forall j \in J, \forall e \in E, \forall i' \in I', \forall j' \in J', \forall e' \in E', \forall t \in T, e < e' \quad (30)$$

Un análisis previo relacionado con la proyección de ventas, proporciona información acerca de la producción requerida en los diferentes periodos de operación de la planta; con esta información es posible determinar la capacidad de producción usada en cada periodo así como las unidades que deben ser adicionadas para satisfacer dicha demanda.

De esta manera es posible fijar el tiempo t y las unidades e que deben ser instaladas en el periodo t , mediante el parámetro binario $UNIT_{e,t}^{Exist}$. La ecuación 31 representa la existencia de la unidad e , la cual debe ser instalada o reubicada al tiempo t , donde conocemos el tiempo t y la instalación e que debe ser instalada en este tiempo. Por lo tanto, la única incógnita que representa esta ecuación son las coordenadas (i,j) , en las cuales debe ser adicionada o reubicada la unidad e .

$$\sum_i \sum_j y_{i,j,e,t} = UNIT_{e,t}^{exist} \quad \forall e \in E, \forall t \in T \quad (31)$$

De la ecuación 31, $UNIT_{e,t}^{Exist}$ representa un parámetro binario, el cual toma el valor de 1 si es necesario instalar una unidad e sobre el periodo de tiempo t .

A fin de activar la variable binaria $z_{i,j,e,i',j',e',t}$, se formula la siguiente expresión:

$$(2 - y_{i,j,e,t} - y_{i',j',e',t}) + z_{i,j,e,i',j',e',t} \geq 1, \forall i \in I, \forall j \in J, \forall e \in E, \forall i' \in I', \forall j' \in J', \forall e' \in E', \forall t \in T, e < e' \quad (32)$$

La ecuación anterior implica que cuando e y e' son instaladas sobre el mismo periodo de tiempo, las variables $y_{i,j,e,t}$ y $y_{i',j',e',t}$ toman el valor de 1, como consecuencia, el primer término de la ecuación toma el valor de cero, activando de esta manera la variable binaria $z_{i,j,e,i',j',e',t}$. Sin embargo, es necesario establecer restricciones adicionales, las cuales representen la interconexión $z_{i,j,e,i',j',e',t}$ entre las unidades e y e' .

La existencia de la variable binaria $z_{i,j,e,i',j',e',t}$ está dada por la ecuación 33, donde de la misma manera que la ecuación 31, es posible fijar la interconexión entre las unidades e y e' , así como el tiempo t en el cual existe la interconexión, esto mediante el parámetro binario $IBU_{e,e',t}^{Exist}$.

$$\sum_i \sum_j \sum_{i'} \sum_{j'} z_{i,j,e,i',j',e',t} = IBU_{e,e',t}^{Exist}, \forall e \in E, \forall e' \in E', \forall t \in T, e < e' \quad (33)$$

3.2.2.2 Restricciones

Restricción para evitar sobre-posición.

A fin de evitar sobre-posición entre las nuevas unidades con las ya existentes, o entre nuevas unidades, es necesario establecer una restricción, la cual garantice que únicamente podrá instalarse una unidad e en las coordenadas (i,j) en el tiempo t :

$$\sum_e \sum_t y_{i,j,e,t} \leq 1, \forall i \in I, \forall j \in J \quad (34)$$

Para las unidades que ya existen, es posible fijar su ubicación como sigue.

$$y_{i,j,e,t} = 1, \forall i \in I, \forall j \in J, \forall e \in FE, \forall t \in T \quad (35)$$

3.2.2.3 Costos

El valor del dinero en el tiempo es asociado con el costo unitario multiplicado por el factor de anualización, el cual permite ajustar el valor del dinero a valor presente, este valor es calculado de la siguiente manera:

Primero para el costo de instalación.

$$UEC_{i,j,e,t} = k_{F(t)} UECost_{i,j,e} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall e \in E, \forall t \in T \quad (36)$$

La ecuación anterior representa el producto del costo unitario y el factor de anualización $k_{F(t)}$, el cual es representado como una función del tiempo, de tal manera que es posible calcular el costo de instalación para diferentes periodos de tiempo. De la misma manera, el costo de interconexión es multiplicado por el factor $k_{F(t)}$. $UEC_{i,j,e,t}$ es la suma entre el costo fijo de las unidades e , costo del terreno, costo de acondicionamiento donde éste último depende del tipo de unidad a instalar.

$k_{F(t)}$, es obtenido mediante la siguiente relación:

$$k_{F(t)} = (1 + i)^{[ord(T)-(t+1)]} \quad (37)$$

3.2.2.4 Funciones objetivo

El modelo es formulado como un problema de optimización multi-objetivo para la minimización simultanea del TAC y $TRisk$, y éste es representado por la siguiente expresión.

$$OF = \{ \min TAC ; \min TRisk \}$$

Cabe mencionar que estos objetivos se contradicen uno con otro, debido a que grandes distancias de separación entre las unidades, incrementa el costo de interconexión y de esta manera el costo total; por otra parte, lo contrario sucede con el riesgo a distancias cortas de separación este aumenta, debido a que las unidades se encuentran más cercas aumentando la posibilidad de resultar dañadas o dañar a las que se encuentren en distancias cercanas.

3.2.2.4.1 Función objetivo costo

La función del costo total anual es expresada de la siguiente manera:

$$TAC = \sum_e \sum_t Ex\ cost_{e,t} + \sum_e \sum_{e'} \sum_t IntCost_{e,e',t} \quad (38)$$

$e < e'$

Donde TAC es el costo total anual (\$/año), el cual es la suma del costo de existencia (suma del costo de instalación, acondicionamiento y costo fijo de la unidad) ($ExCost_{e,t}$) y el costo de interconexión entre las unidades ($IntCost_{e,e',t}$).

3.2.2.4.2 Función objetivo riesgo

El riesgo total relacionado con la distribución de las unidades es calculado como sigue:

$$TRisk = \sum_e \sum_t ERisk_{e,t} + \sum_e \sum_{\substack{e' \\ e < e'}} \sum_t IntRisk_{e,e',t} \quad (39)$$

En la ecuación anterior. $TRisk$ (fatalidades) es la suma del riesgo asociado a la instalación de las unidades ($ERisk_e$) y el riesgo de interconexión entre las unidades.

3.3 Estrategia de solución

Como se mencionó en la sección 2, los modelos multi-objetivo obtenidos son resueltos con el método “e-constraint”. En la sección 2, también se mencionan las características principales de este método así como el algoritmo para convertir el problema multi-objetivo en un problema con un sólo objetivo. Para propósitos de este proyecto, el algoritmo del método se describe a continuación:

- 1.- El primer paso para aplicar el método *constraint* consiste en la enumeración de los objetivos; para el caso de los modelos obtenidos en este proyecto tenemos sólo dos funciones objetivo, la función objetivo costo y la función objetivo riesgo.
- 2.- El segundo paso consiste en seleccionar la función objetivo a minimizar, estableciendo las restantes como restricciones. La función costo, es la función elegida para ser minimizada en los modelos obtenidos en este proyecto fijando la función riesgo como restricción.
- 3.- El siguiente paso consiste en la obtención de la curva Pareto, para esto primeramente es necesario encontrar los valores extremos de la curva, los cuales servirán de límites para encontrar los puntos intermedios. Para encontrar el primer punto intermedio, se procede a resolver el

problema como si este fuera de un sólo objetivo, primero para la minimización del riesgo y después para la minimización del costo.

4.- Encontrados los puntos extremos de la curva Pareto, después se procede a encontrar los puntos intermedios de la curva, para esto se resuelve el modelo minimizando el costo y fijándole un valor al riesgo como restricción, de esta manera para cualquier valor que fijemos del riesgo que se encuentre dentro de los puntos extremos, es posible encontrar un valor del costo asociado a este riesgo.

El algoritmo anterior permite encontrar una curva que representa un conjunto de soluciones óptimas, las cuales se encuentran equilibradas entre los objetivos a minimizar (costo y riesgo). El análisis de este conjunto de soluciones obtenidas puede proporcionar la mejor solución de acuerdo a las políticas y requerimientos de cada empresa.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

De la misma manera que en la sección de metodología, el presente capítulo es dividido en dos secciones, en las cuales los casos de estudio elegidos para mostrar la aplicación de las metodologías desarrolladas en este proyecto son definidos. Además, en este capítulo se presenta también la discusión de los resultados obtenidos del uso de los modelos de optimización propuestos.

4.1 Planteamiento del primer caso de estudio y discusión de resultados obtenidos

Para mostrar la aplicación de la metodología propuesta, se analizó el proceso de destilación de hexano-heptano (AIChE/CCPS, 2007). En la figura 4.1 se muestra el diagrama de flujo para la destilación del hexano. La Tabla 4.1 muestra el conjunto de instalaciones ya ubicadas con los que cuenta esta planta de destilación, así como los costos de dos nuevas instalaciones a adicionar a la planta y la longitud de las instalaciones. La Figura 4.2 muestra la distribución de las instalaciones en el terreno, el cual fue dividido en 100 grids discretos de 100m^2 , en esta figura podemos observar que la unidad de destilación está ubicada en la parte central del terreno y las instalaciones de alta densidad ocupacional se encuentran a distancias poco seguras con respecto a ésta y a las demás instalaciones de alta peligrosidad (TA1, TA2 y THP).

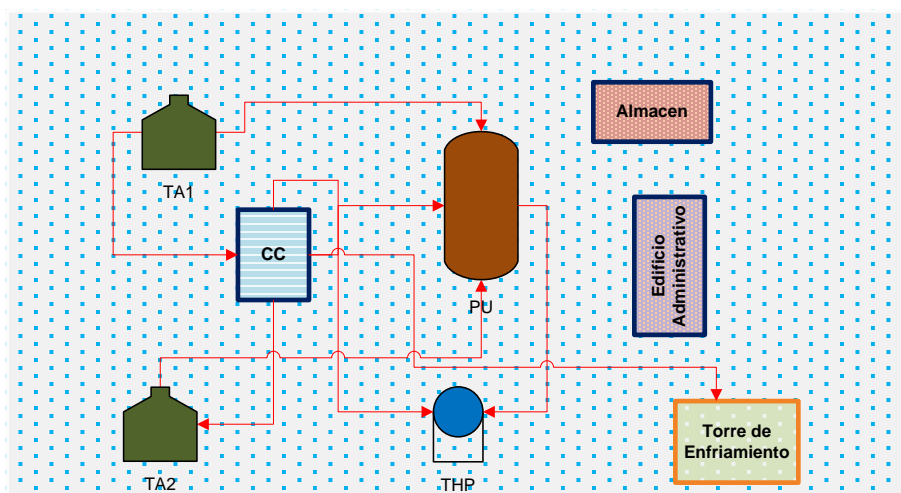


Figura 4. 1. Diagrama de flujo del proceso de destilación de hexano.

Tabla 4.1 . Tamaño de las Instalaciones.

<i>Instalación (e)</i>	<i>Tipo de Instalación</i>	<i>Longitud (m:m)</i>	<i>FC_e(\$)</i>
1	Cuarto de Control (CC).	10—10	1,000,000
2	Edificio Administrativo (EA).	10—10	300,000
3	Almacén.	10—10	
4	Tanque de almacenamiento esférico de alta presión (THP).	10—10	
5	Tanque de almacenamiento (TA1) atmosférico de líquido inflamable.	10—10	
6	Tanque de almacenamiento (TA2) atmosférico de líquido inflamable.	10—10	
7	Torre de Enfriamiento.	20—10	
8	Unidad de Proceso.	20—40	
9	Nueva Instalación (NI1).	10—10	3,000,000
10	Nueva Instalación (NI2).	10—10	2,00,000

Teniendo este conjunto de instalaciones, dos escenarios son identificados para su análisis, siendo los siguientes: Escenario A, en este se analizó la posibilidad de adicionar dos nuevas instalaciones a la planta, reubicando dos de las unidades ya instaladas, en este caso el cuarto de control y el edificio administrativo, la elección de reubicar estas dos instalaciones se debe a que resulta más práctico y económico mover este tipo de instalaciones, además de que en ellas se encuentra concentrada la mayor parte del personal que labora en la planta.

En el escenario B, sólo se considera la posibilidad de adicionar dos nuevas instalaciones sin reubicar ninguna de las existentes. Basándonos en el escenario del peor-caso, de liberación de gas inflamable, BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosión) y VCE (Vapor Cloud Explosión) se identifican como accidentes a ocurrir en la unidad de destilación de hexano, TA1, TA2 y THP.

F91	F92	F93	F94	F95	F96	F97	F98	F99	F100
F81	TA1	F83	F84	F85	F86	F87	F88	THP	F90
F71	F72	F73	F74	F75	F76	F77	F78	F79	F80
F61	F62	F63	F64	F65	F66	F67	EA	F69	F70
F51	F52	F53	F54	Unidad de Proceso		F57	F58	F59	F60
F41	F42	F43	F44	Unidad de Proceso		F47	F48	F49	F50
F31	F32	F33	F34	F35	F36	F37	F38	F39	F40
F21	F22	F23	F24	Cuarto de control	F26	F27	Torre de Enfriamiento		F30
F11	TA2	F13	F14	F15	F16	F17	F18	F19	F20
F01	F02	F03	F04	F05	F06	F07	F08	Almacén	F10

Figura 4. 2. Ubicación de las instalaciones en el terreno.

4.1.1 Cálculo de los parámetros de riesgo

El cálculo de los parámetros del riesgo de instalación se realizó de la siguiente manera:

1.-Cálculo de la sobrepresión

Para la cuantificación del riesgo de instalación (fatalidades), el primer cálculo a realizar es en relación a la sobrepresión, para BLEVE el modelo usado es el de equivalencia de TNT. Calculada la masa de equivalencia de TNT, se calcula la distancia escalada para cada grid considerando la distancia del centro de la instalación peligrosa al centro de cada grid, la cual es obtenida mediante la siguiente expresión:

$$z_e = \frac{r}{m_{TNT}^{1/3}} \quad (40)$$

Dónde:

Z_e es la distancia escalada.

r es la distancia entre el centro de la instalación peligrosa con respecto al centro de cada grid.

Con la distancia calculada evaluamos la sobrepresión para cada grid:

$$\frac{P_o}{P_a} = \frac{1616 \left[1 + \left(\frac{z_e}{4.5} \right)^2 \right]}{\sqrt{1 + \left(\frac{z_e}{0.048} \right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{z_e}{0.32} \right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{z_e}{1.35} \right)^2}} \quad (41)$$

De la expresión anterior, p_a es la presión atmosférica (101.3 kPa), p_s es la sobrepresión para cada grid. El daño a las personas que puede ocasionar esta sobrepresión está relacionado mediante la siguiente función probit.

$$Y = -77.1 + 6.91 \ln P \quad (42)$$

De la función probit anterior, Y representa el valor probit asociado a la muerte por lesión pulmonar (Cui y col., 2008), P es la sobrepresión calculada para cada grid.

Obtenido este valor probit se convierte a porcentaje de afectación mediante la siguiente ecuación:

$$P = 50 \left[1 + \frac{Y - 5}{|Y - 5|} \operatorname{erf} \left(\frac{|Y - 5|}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad (43)$$

Conocido el valor de las fatalidades por BLEVE, después son calculadas mediante la siguiente ecuación:

$$Fatalidades\ por\ Blevé = (\#\ Personas\ Expuestas) \times (Fracción\ de\ Afectación) \quad (44)$$

En la Figura 4.3 se muestra el porcentaje de afectación debido a BLEVE en las tres instalaciones consideradas como peligrosas. Así, el parámetro $UR_{i,j,e}$ es calculado de la siguiente manera, por ejemplo para la instalación 11, la cual corresponde al edificio administrativo y el cual tiene una población total de 15 personas (recomendado por API 752), para las coordenadas (1,1) tenemos que $UR_{1,1,11} = (0.25) * (0.3216) * (15) = 1.206 = 2$, de esta forma calculamos este parámetro para todas las coordenadas (i,j) y para todas las instalaciones que van a ser instaladas o reubicadas. La Tabla 4.2 se muestra la población de las instalaciones ocupadas.

Tabla 4.2. Población de las instalaciones.

E	Instalación	Población de las instalaciones
1	EA	15
2	CC	10
3	NI1	12
4	NI2	6

En la estimación de fatalidades por VCE se considera para el cálculo de la dispersión basados en el peor-escenario, en el cual la velocidad del viento es de 1.5 m/s y la estabilidad atmosférica es clase F. Además, el modelo a utilizar para el cálculo de la sobrepresión es el modelo de equivalencia TNT.

El cálculo del parámetro fatalidades se efectúa de la misma manera que para el caso del BLEVE.

El riesgo total de instalación será la suma de las fatalidades por BLEVE y VCE y esta expresado por la siguiente ecuación donde P_{BLEVE} y P_{VCE} son las probabilidades de ocurrencia de cada evento siendo 0.25 y 0.34 respectivamente (ver Figura 4.4).

32.16	99.99	32.16					37.75	99.99	37.75
99.99	TA1	99.99					99.99	THP	99.99
32.16	99.99	32.16	63.65	99.18	99.18	63.65	37.75	99.99	37.75
	32.16	63.65	99.99	100	100	99.99	63.65	32.16	
	0.65	99.18	100	Unidad de Proceso		100	99.18	0.65	
	0.65	99.18	100			100	99.18	0.65	
	32.16	63.65	99.99	100	100	99.99	63.65	32.16	
32.16	99.99	32.16	63.65	99.18	99.18	63.65			
99.99	TA2	99.99							
32.16	99.99	32.16							

Figura 4. 3. Porcentaje de afectación debido a muerte por hemorragia pulmonar.

$$UR_{i,j,e} = P_{BLEVE}(UR_{i,j,e})_{BLEVE} + P_{VCE}(UR_{i,j,e})_{VCE} \quad (45)$$

El costo de interconexión de tubería y cableado fue asumido de \$10/m, para la interconexión de las instalaciones ocupadas y para las unidades de almacenamiento.

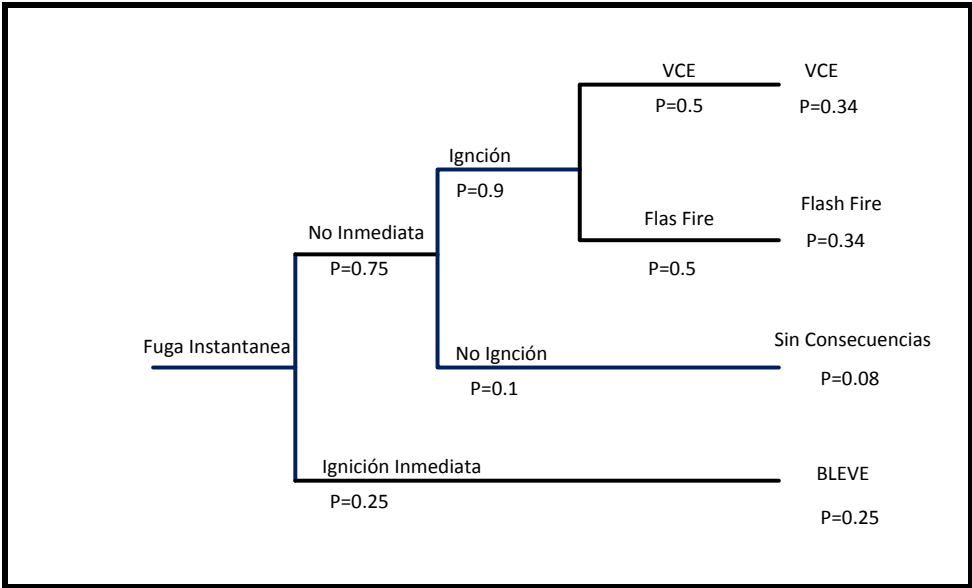


Figura 4. 4. Árbol de eventos.

El cálculo del parámetro $UL_{i,j,e}$ está representado mediante la siguiente ecuación:

$$UL_{i,j,e} = FC_e + Cland + A \tag{46}$$

De la ecuación anterior, FC_e es el costo de la instalación; sí ésta ya existe su valor es de cero, $Cland$ es el costo del terreno, el cual se supone de \$5/m² y A representa un costo de acondicionamiento del terreno.

El tamaño del modelo para este caso de estudio consiste en 911,390 variables binarias, 2,735,826 variables continuas y es resuelto en 18.65 s tiempo de CPU para cada punto de la curva Pareto; el modelo fue codificado en el software GAMS, y el problema MILP fue resuelto con el resolovedor CPLEX (Brooke y col., 2013).

4.1.2 Discusión de resultados

4.1.2.1 Escenario A

Este escenario corresponde a la solución en la cual se considera la reubicación de instalaciones así como la adición de nuevas unidades, el conjunto de soluciones obtenidas son mostradas en la Figura 4.5, en la cual podemos apreciar el comportamiento contradictorio entre el riesgo y el costo, por ejemplo para el menor costo de \$2,075,900/año, el número de fatalidades esperadas es igual a cero debido a que a un menor costo tendremos un mayor riesgo. Sin embargo, la razón de este resultado se debe a que para esta solución (a), las unidades son localizadas en los grids que se encuentran en una área donde el porcentaje de afectación es igual con cero, de esta forma el número de fatalidades es cero; sin embargo, esta solución representa el mayor costo de interconexión debido a que se tiene la mayor distancia de separación entre las instalaciones, esta solución en particular representa una excelente solución si le damos toda la prioridad a la seguridad, sin embargo, el desarrollo de la planta debe considerar un equilibrio entre los riesgos y los costos (AIChE-Ccps, 2003). La solución b resulta quizá más atractiva, ya que si observamos con detenimiento la curva Pareto podemos apreciar que este punto en particular presenta un decaimiento considerable en la pendiente de la curva, esto ocasiona una importante reducción del *TAC*, teniendo una diferencia de \$14,800/año con respecto a la solución a, teniendo un *TAC* total de \$2, 075, 900/año y un número de fatalidades de 1.

La localización final de las cuatro instalaciones es mostrada en la Figura 4.6, en ésta se puede apreciar la nueva ubicación de las instalaciones a reubicar, en donde el edificio administrativo presenta un desplazamiento importante alejándose por completo del área de afectación disminuyendo el riesgo de fatalidades de 11 a 0 fatalidades ubicándose en las coordenadas (9,2), sin embargo el cuarto de control cambia su posición a un grid con un bajo porcentaje de afectación(9,5) en donde su anterior posición se esperaban 15 fatalidades ahora en su actual posición sólo se espera una fatalidad. En cuanto a las nuevas instalaciones, estas son ubicadas en grids fuera del alcance de los efectos de los potenciales accidentes para la NII (5,2) y para la instalación NII(6,2).

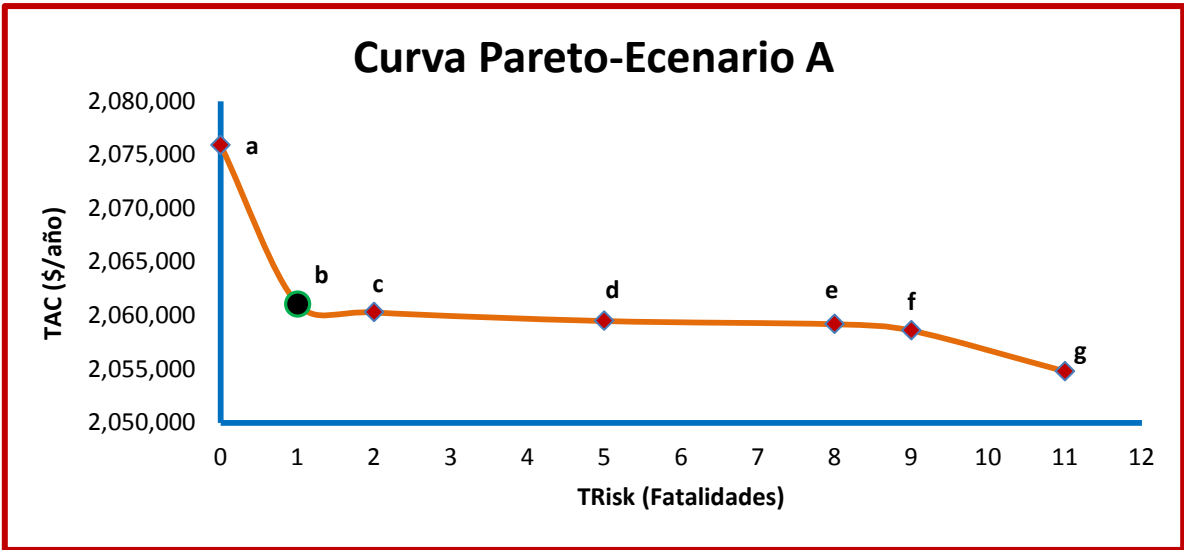


Figura 4. 5. Curva pareto para el escenario A.

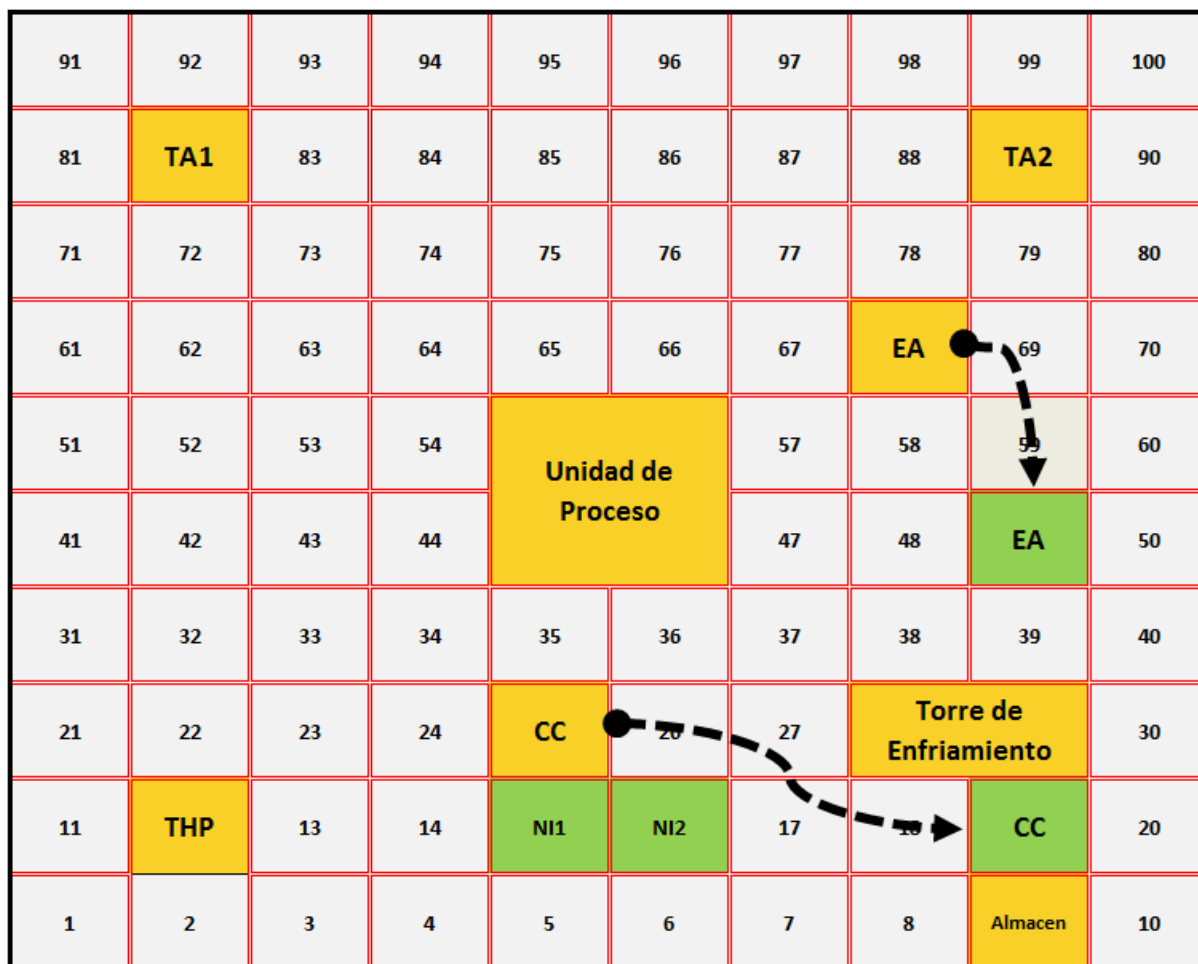


Figura 4. 6. Distribución final para la solución 2, escenario A.

4.1.2.2 Escenario B

El Escenario B corresponde a la adición de dos nuevas instalaciones. Para este escenario no se considera la reubicación del cuarto de control y del edificio administrativo, sólo se considera la instalación de dos nuevas instalaciones, la curva Pareto obtenida (ver Figura 4.7) muestra las soluciones obtenidas para este escenario. De estas soluciones, la del punto i ofrece una buena alternativa, debido a que igual que el escenario A, en esta curva también se puede apreciar un cambio significativo de pendiente entre el punto h y el i, beneficiando a este último, obteniéndose un *TAC* de \$734,750/año así como una reducción de este de \$8,790/año, en cuanto al número de fatalidades esperado es de 24.

La distribución final de las nuevas instalaciones es mostrada en la Figura 4.8, la instalación 13 es ubicada a 35.35 m de la unidad de destilación ubicándose en un grid de coordenadas (9,5) con un bajo porcentaje de afectación en cuanto a la instalación 14 se ubica en una distancia alejada de las instalaciones consideradas de peligro en el grid con coordenadas (9,2).

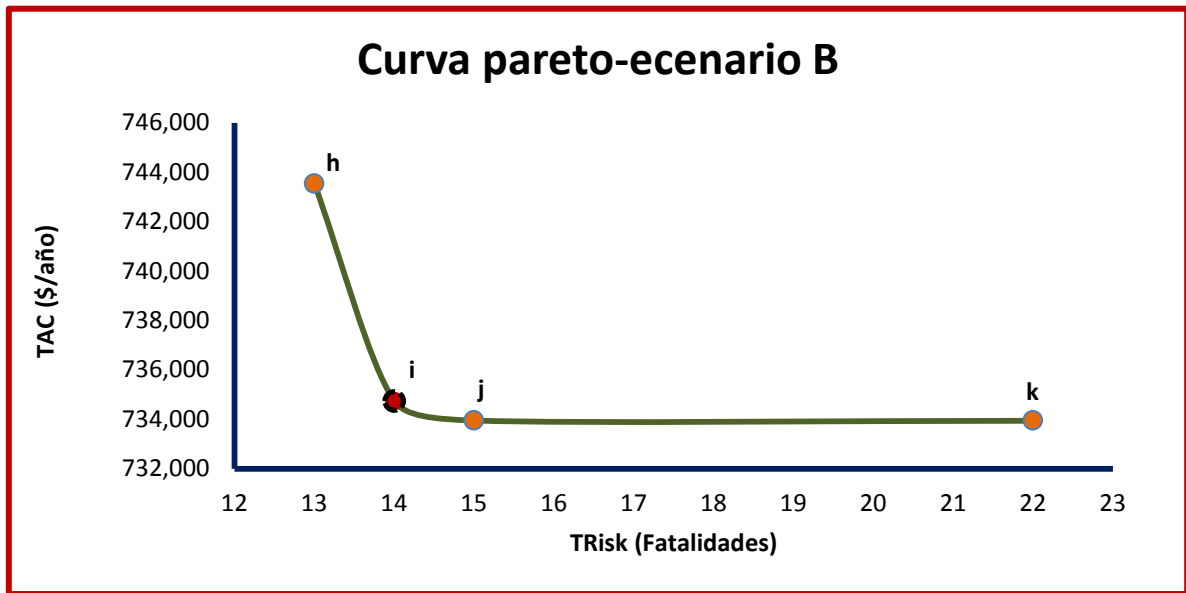


Figura 4. 7. Curva pareto escenario B.

91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
81	TA1	83	84	85	86	87	88	TA2	90
71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
61	62	63	64	65	66	67	EA	69	70
51	52	53	54	Unidad de Proceso		57	58	59	60
41	42	43	44	Unidad de Proceso		47	48	NI1	50
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
21	22	23	24	CC	26	27	Torre de Enfriamiento		30
11	THP	13	14	15	16	17	18	NI2	20
1	2	3	4	5	6	7	8	Almacen	10

Figura 4. 8. Distribución final para la solución j, escenario B.

En la Tabla 4.3 se resumen los resultados obtenidos en las dos curvas Pareto, en esta tabla se muestra el costo de interconexión así como el costo del terreno de cada solución. Una diferencia importante que se puede distinguir es referente al número de fatalidades del escenario A con respecto al B, la razón de esta diferencia tan marcada se debe a que las dos instalaciones que no son reubicadas en el escenario B, se encuentran en posiciones en las cuales se tiene cierto porcentaje de afectación en los grids ocupados por estas instalaciones, y como estas no se reubican las fatalidades asociadas a esta afectación se mantienen constantes en todas las soluciones, de tal manera que el riesgo total para el escenario B será la suma de estas fatalidades constantes más las fatalidades debido a la instalación de las nuevas instalaciones.

Sin embargo, el segundo escenario resulta más favorable por la parte económica, debido a que en éste el costo de las dos instalaciones a reubicar es cero, por otra parte su costo de interconexión resulta menor debido a que las instalaciones se encuentran a distancias más cercanas con respecto a las demás.

Tabla 4.3. Comparación de los escenarios.

Escenario	Solución	TAC(\$/año)	TRisk(fatalidades)	Costo de instalación	Costo del terreno
A	A	2,075,900	0	71,900	2,004,000
	B	2,061,100	1	56,800	2,004,300
	C	2,060,300	2	56,000	2,004,300
	D	2,059,500	5	55,200	2,004,300
	E	2,059,200	8	54,800	2,004,400
	F	2,058,600	9	54,300	2,004,300
	G	2,054,800	11	50,600	2,004,200
	H	743,540	13	41,640	701,900
	I	734,750	14	32,650	702,100
B	J	733,960	15	31,860	702,100
	K	733,950	22	31,850	702,100

4.2 Definición del segundo caso de estudio y discusión de resultados

La aplicación de la metodología propuesta es mostrada a través del caso de estudio referido al proceso de producción de óxido de etileno, la Tabla 4.4 muestra la proyección de instalación de las unidades nuevas, las unidades ya existentes y la capacidad usada en los diferentes periodos de operación asimismo en la Figura 4.9 se muestra el diagrama de flujo del proceso. La Figura 4.10 muestra la ubicación de las unidades ya existentes dentro del terreno, el cual fue dividido en 100 grids discretos de 100 m². La proyección fue realizada para tres periodos de tiempo, cada uno dividido en 5 años en los que la instalación de las nuevas unidades es realizada a principios de cada periodo.

Tabla 4.4. Proyección de instalación de nuevas unidades en el proceso de producción de etileno.

Periodo	Unidad (e)	Nueva	Existente	Población	Costo fijo (\$)
1	E1	Cuarto de Control		10	1,000,000
	E2	Edificio Administrativo		15	300,000
			Tanque de Almacenamiento (TA1)		
			Almacén		
			Unidad de Reacción RU (65%)		
2	E11	Cuarto de Control		9	1,000,000
	E12	Edificio de Mantenimiento	Unidad de Reacción RU (100%)	11	1,000,000
			Tanque de Almacenamiento (TA2)		
3	E10	Laboratorio de Control de Calidad		10	100,000

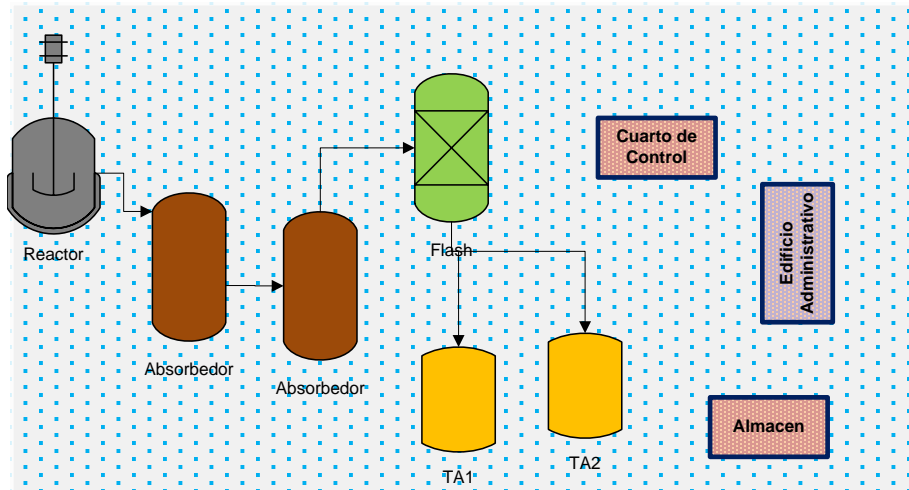


Figura 4. 9. Diagrama de flujo para la producción de óxido de etileno.

(9,1)	(9,2)	(9,3)	(9,4)	(9,5)	(9,6)	(9,7)	(9,8)	(9,9)	(10,0)
(8,1)	(8,2)	(8,3)	(8,4)	(8,5)	(8,6)	(8,7)	TA2	(8,9)	(9,0)
(7,1)	(7,2)	(7,3)	(7,4)	(7,5)	(7,6)	(7,7)	(7,8)	(7,9)	(8,0)
(6,1)	(6,2)	(6,3)	(6,4)	(6,5)	(6,6)	(6,7)	(6,8)	(6,9)	(7,0)
(5,1)	(5,2)	(5,3)	(5,4)	RU		(5,7)	(5,8)	E3	(6,0)
(4,1)	(4,2)	(4,3)	(4,4)	RU		(4,7)	(4,8)	(4,9)	(5,0)
(3,1)	(3,2)	(3,3)	(3,4)	(3,5)	(3,6)	(3,7)	(3,8)	(3,9)	(4,0)
(2,1)	(2,2)	(2,3)	(2,4)	(2,5)	(2,6)	(2,7)	(2,8)	(2,9)	(3,0)
(1,1)	(1,2)	(1,3)	(1,4)	(1,5)	(1,6)	(1,7)	(1,8)	TA1	(2,0)
(0,1)	(0,2)	(0,3)	(0,4)	(0,5)	(0,6)	(0,7)	(0,8)	(0,9)	(1,0)

Figura 4. 10. Ubicación de las unidades ya existentes en el terreno (periodo inicial)

Un accidente tipo domino es considerado en este proceso de producción de óxido de etileno, el cual involucra 3 explosiones, en la unidad de reacción (RU), el tanque de almacenamiento 1 (TA1) y en el tanque de almacenamiento 2 (TA2). En este trabajo se supone que el evento iniciador consiste en una explosión debido a BLEVE en la unidad de reacción propagándose a los tanques de almacenamiento 1 y 2, ocasionando la explosión de estos debido al daño que produce la sobrepresión en su estructura.

Para la escalación del vector sobrepresión se consideran tanques elongados, evaluando el daño estructural mediante la función Probit representada por la ecuación 47, donde P corresponde a la sobrepresión generada por la explosión, después el valor Probit es convertido a probabilidad de daño estructural mediante la ecuación 48 (Mingguang y Juncheng, 2008). La evaluación de la sobrepresión fue hecha a través del modelo de equivalencia TNT (ver Appendix B reportado por Crowl y Louvar, 2011). La Tabla 4.5 muestra la cantidad de masa de cada unidad en los diferentes periodos de operación así como su equivalencia en masa de TNT correspondiente al periodo 1 y 2, para el periodo 3 la planta opera a una capacidad igual al periodo 3.

Tabla 4.5. Masa en Kg de las unidades involucradas en el accidente domino.

Periodo	Capacidad	Unidad e	Masa Kg	Masa TNT
1	65%	RU	2,925	1,209.53
		TA1	1,300	537.57
		TA2	1,300	537.57
2	100%	RU	4,500	1,860.81
		TA1	2,000	827.03
		TA2	2,000	827.03

El parámetro del riesgo ($UER_{i,j,e,t}$) fue cuantificado en términos de población afectada debido a lesiones por desplazamiento y colisión del cuerpo contra obstáculos, valor que fue calculado como el producto de la población expuesta por la probabilidad de que puedan ocurrir lesiones a la población ocupante de las instalaciones. La probabilidad es calculada de la siguiente manera.

Primeramente mediante la ecuación 48 se calculó el valor Probit asociado a lesiones, en la que J se refiere al impulso específico y corresponde al producto de la sobrepresión por el tiempo de duración de la explosión, el cual fue supuesto de 80 milisegundos. Posteriormente, este valor Probit es convertido en probabilidad mediante la ecuación 48. Este cálculo es efectuado para cada uno de los 100 grids que conforman el terreno para cada una de las e instalaciones que son adicionadas.

$$Y = -12.22 + 1.65 \ln P \quad (47)$$

$$P = \frac{1.005}{1 + e^{-\left(\frac{Y-5.004}{0.612}\right)}} \quad (48)$$

$$P = -39.1 + 4.45 \ln J \quad (49)$$

Este cálculo es hecho considerando la capacidad usada para cada periodo de tiempo, de esta manera para evaluar el riesgo para el periodo 1 se considera que la planta opera al 65% de su capacidad, con esto es posible calcular la cantidad de masa involucrada en el accidente y de esta forma es posible conocer el riesgo para ese periodo, el cálculo es efectuado de la misma manera para los otros periodos tomando como criterio principal el aumento en la capacidad de producción de esta manera es considerado el aumento del riesgo con el tiempo. La Figura 4.11 muestra la probabilidad de efecto domino debido a sobrepresión generada por la explosión en la unidad de reacción (RU), en ésta se puede apreciar la probabilidad de daño de las unidades de almacenamiento (TA1 y TA2) debido a su posición con respecto a la unidad donde ocurre el evento iniciador.

En cuanto a la probabilidad de daño por lesiones a personas es mostrada en la Figura 4.12 y Figura 4.13 para los dos periodos en los cuales existe cambio en la capacidad de producción. Explosión debido a BLEVE es considerado para las tres unidades que están involucradas en el accidente domino. El costo de interconexión ($UI_{i,j,e,i',j',e',t}$) fue supuesto de \$166/m (Lopez-Medina y col., 2013), el costo unitario del terreno de \$5/m². En cuanto al riesgo de interconexión ($UR_{i,j,e,i',j',e',t}$), éste no fue considerado debido al diámetro pequeño de las tuberías.

0.36	0.46	0.57	0.65	0.7	0.7	0.65	0.57	0.46	0.36
0.46	0.61	0.83	0.85	0.9	0.9	0.85	0.83	0.61	0.46
0.57	0.75	0.9	0.97	0.99	0.99	0.97	0.9	0.75	0.57
0.65	0.85	0.97	1	1	1	1	0.97	0.85	0.65
0.7	0.9	0.99	1	RU		1	0.99	0.9	0.7
0.7	0.9	0.99	1	RU		1	0.99	0.9	0.7
0.65	0.85	0.97	1	1	1	1	0.97	0.85	0.65
0.57	0.75	0.9	0.97	0.99	0.99	0.97	0.9	0.75	0.57
0.46	0.61	0.83	0.85	0.9	0.9	0.85	0.83	0.61	0.46
0.36	0.46	0.57	0.65	0.7	0.7	0.65	0.57	0.46	0.36

Figura 4. 11. Probabilidad de daño estructural.

						0.9	1	0.9	
					0.03	1	TA2	1	0.03
			0.03	0.51	0.51	1	1	0.9	
		0.03	0.99	1	1	0.99	0.06		
		0.51	1	RU		1	0.51		
		0.51	1	RU		1	0.51		
		0.03	0.99	1	1	0.99	0.03	0.03	
			0.03	0.51	0.51	0.03	0.9	1	0.9
						0.03	1	TA1	1
							0.9	1	0.9

Figura 4. 12. Porcentaje de lesiones para una capacidad de 65%.

						0.9	1	0.9	
				0.004	0.004	1	TA2	1	0.03
		0.04	0.57	0.97	0.97	1	1	0.904	
		0.57	0.99	1	1	0.99	0.57		
	0.004	0.97	1	RU		1	0.97	0.004	
	0.004	0.97	1	RU		1	0.97	0.004	
		0.57	0.99	1	1	0.99	0.57	0.03	
		0.04	0.57	0.97	0.97	0.04	0.904	1	0.9
						0.03	1	TA1	1
							0.9	1	0.9

Figura 4. 13. Porcentaje de lesiones para una capacidad de 100%.

El modelo fue codificado en el software GAMS (Brooke y col., 1998), CPLEX fue el resolutor usado para resolver el problema MILP. El tamaño del modelo para este caso de estudio es de 1,983,593 variables discretas, 3,971,072 variables continuas; 12,734,345 restricciones y fue resuelto en un tiempo de 113.69 segundos para cada punto de la curva Pareto usando una computadora con un procesador Intel core i7 a 2.2 GHz con 6 GB of RAM.

El conjunto de soluciones Pareto son representadas por la Figura 4.14, en ésta se encuentra graficando el riesgo en término de personas lesionadas contra el costo total anual. A y D representan los puntos extremos de la curva, los cuales representan las soluciones menos favorables debido a que éstas sólo benefician a un objetivo, A al riesgo y D al costo. El comportamiento de la gráfica resulta interesante del punto A al B debido al cambio de pendiente que se tiene entre estos dos puntos en particular. Dicho lo anterior, el punto B resulta una solución atractiva, donde el costo total anual representa una reducción de \$32,965 con respecto al punto A.

Para el primer periodo es necesario adicionar dos unidades E1 y E2, la ubicación de estas es mostrada en la Figura 4.18, para el punto B el costo asociado a esta instalación corresponde a \$1,342,666, donde \$42,666 corresponde al costo de interconexión, éste último representa un costo más bajo en comparación del periodo 2, en el cual también son instaladas dos unidades nuevas E12 y E11, teniendo un costo de interconexión de \$123,202, la diferencia en costos radica en el incremento en la capacidad de producción debido a que en el periodo 1 las nuevas unidades son ubicadas en posiciones cercanas a las demás instalaciones existentes (ver Figura 4.19). Sin embargo, en el periodo 2 las instalaciones son ubicadas en posiciones más lejanas al resto de las unidades ya existentes, esto debido a que el riesgo es incrementado ubicando a las instalaciones E12 y E11 fuera del área de afectación, lo cual implica a su vez un costo mayor en la interconexión. Para el periodo 3 la instalación E10 es ubicada en una posición de baja probabilidad de daños a personas por lesiones siendo ésta de 1, el costo de interconexión implicado en la instalación de esta unidad es de \$48,515, ver Figura 4.20.

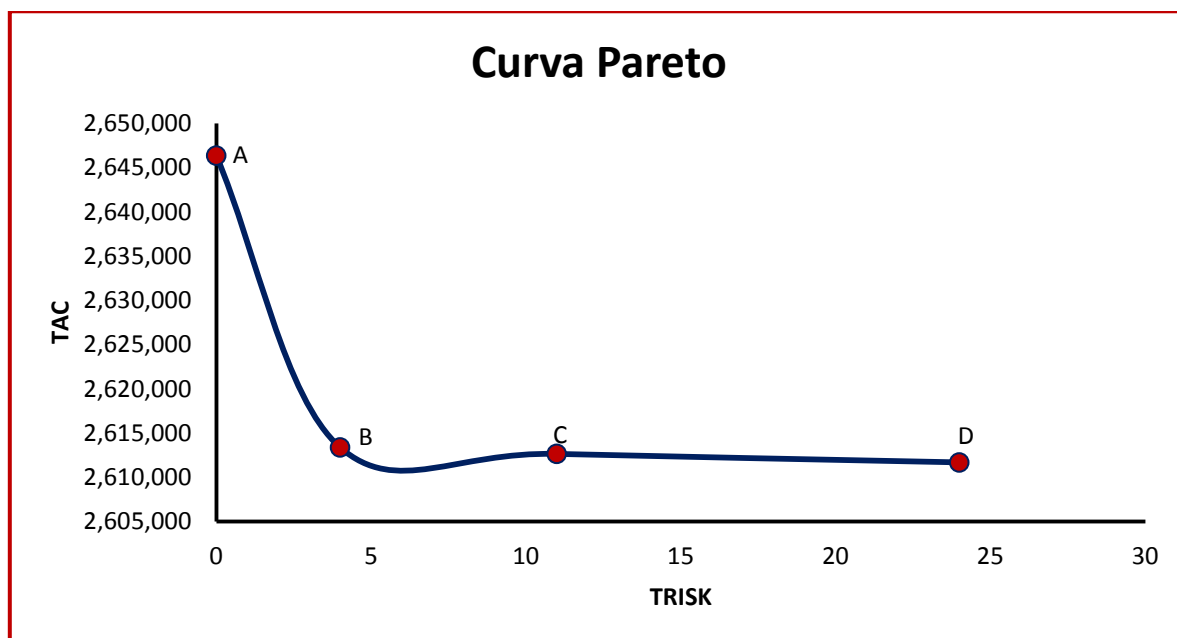


Figura 4. 14. Curva pareto.

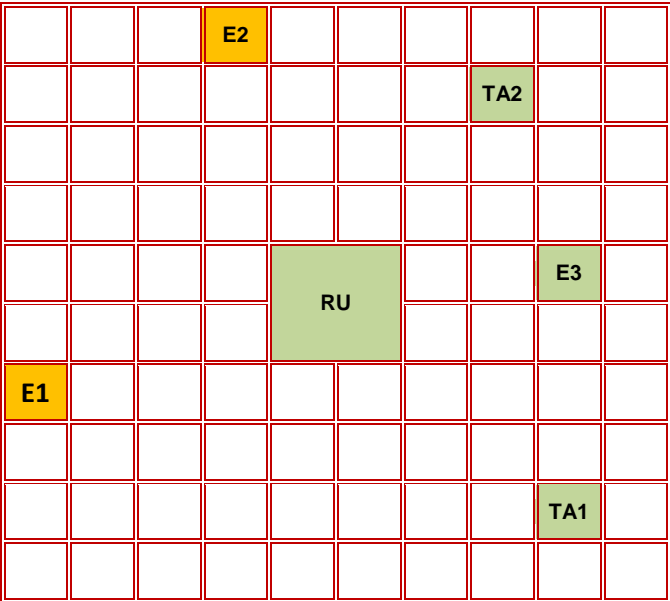


Figura 4. 15. Configuración para el periodo 1, solución A.

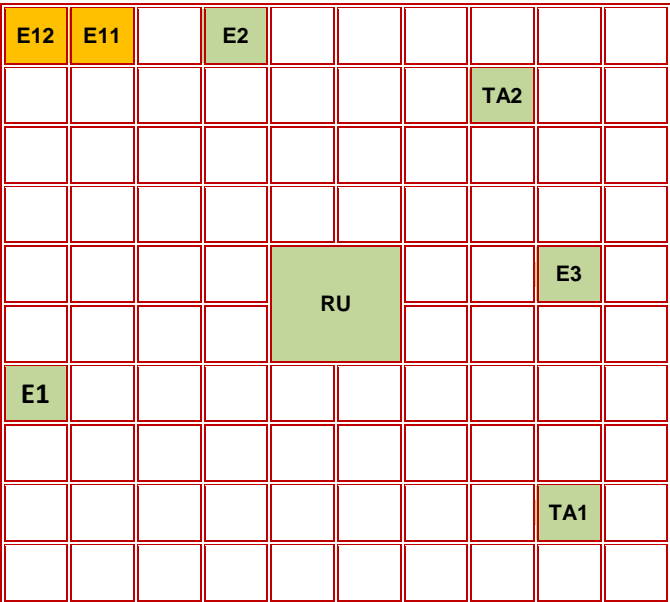


Figura 4. 16. Configuración para el periodo 2, solución A.

El costo total asociado a la instalación de todas las unidades en los tres periodos es de \$2,613,383 y el riesgo esperado es de 4 personas afectadas para este punto de la curva Pareto. La Tabla 4.6 muestra la comparación entre el valor del costo y el riesgo para cada punto de la curva Pareto, en la cual se encuentran desglosados los costos así como el riesgo por periodo.

En esta tabla es posible apreciar la diferencia de valores entre costo y riesgo de los diferentes periodos. Como fue mencionado anteriormente, la solución A representa uno de los escenarios más desfavorables debido a que en este sólo se garantiza el riesgo pero el costo es penalizado, debido a que las unidades son instaladas en alejadas del resto de las existentes, esto puede ser visto en las Figuras 4.15, 4.16 y 4.17, en las cuales se muestra la evolución a través del tiempo de la instalación de las nuevas unidades, si nos enfocamos en la configuración final, es posible verificar que las unidades se encuentran ubicadas en posiciones fuera del área de afectación localizándolas en coordenadas lejanas a las unidades ya existentes, incrementándose de esta manera el costo.

Tabla 4.6. Comparación entre las soluciones obtenidas de la curva Pareto.

Solución	Periodos	TAC(\$/año)	Intcost(\$/año)	TRISK	TAC	TRISK
A	1	1,384,502	84,502	0		
	2	1,136,057	116,057	0	2,646,348	0
	3	125,789	46,789	0		
B	1	1,342,666	42,666	3		
	2	1,143,202	123,202	0	2,613,383	4
	3	127,515	48,515	1		
C	1	1,339,982	39,982	11		
	2	1,129,907	109,907	0	2,612,652	11
	3	142,763	63,763	0		
D	1	1,337,845	37,845	14		
	2	1,119,804	99,804	0	2,611,694	24
	3	154,045	75,045	10		

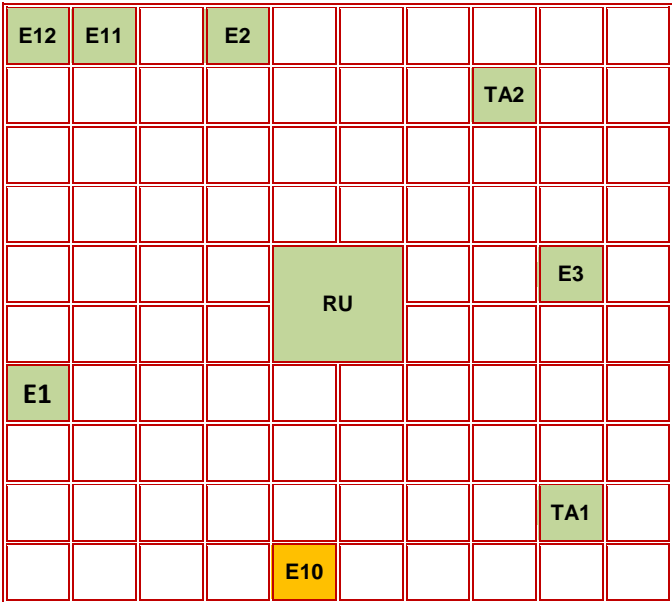


Figura 4. 17. Configuración para el periodo 3, solución A.

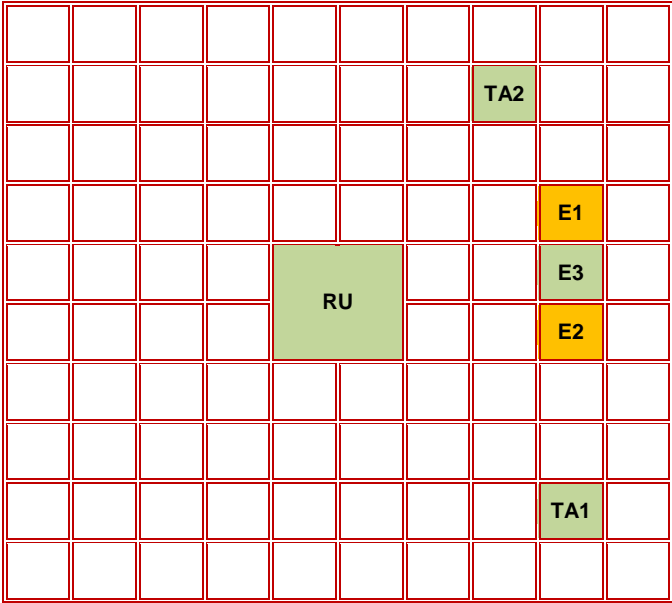


Figura 4. 18. Configuración para el periodo 1, solución B.

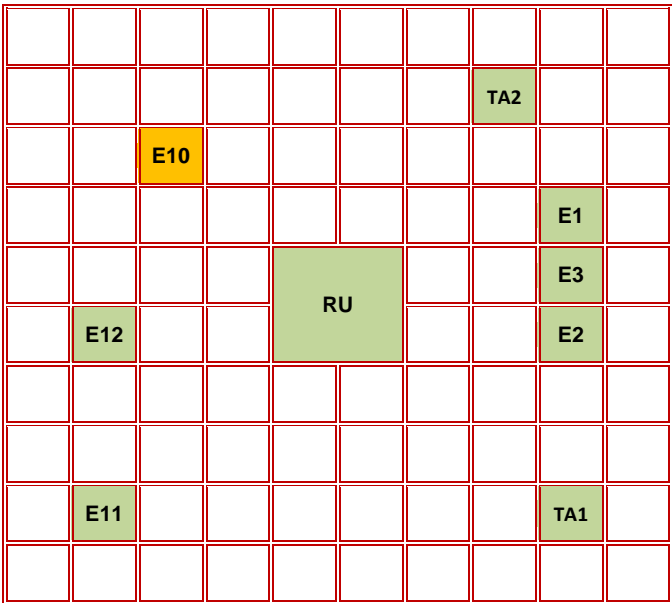


Figura 4. 20. Configuración para el periodo 3, solución A.

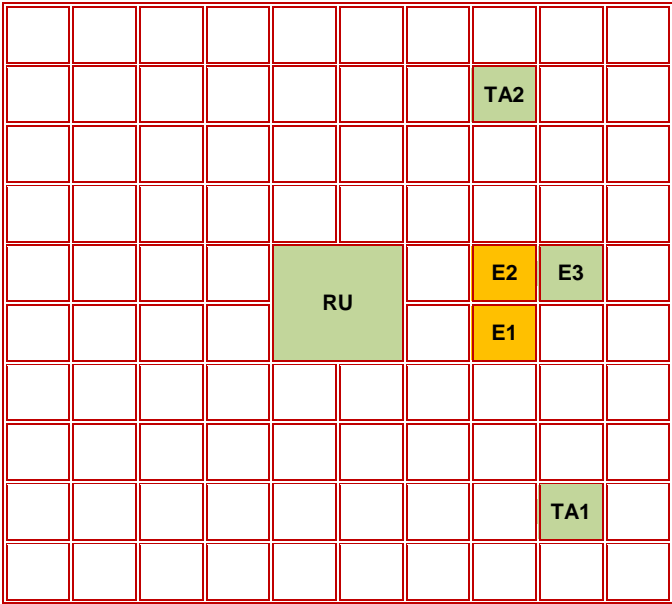


Figura 4. 21. Configuración para el periodo 1, solución D.

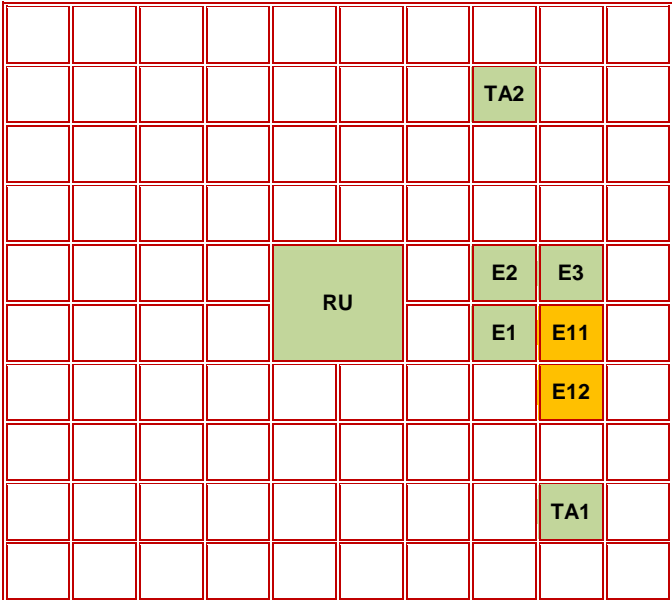


Figura 4. 22. Configuración para el periodo 2, solución D.

CONCLUSIONES

En el presente proyecto se desarrollaron y aplicaron metodologías para encontrar la distribución óptima de instalaciones en una industria, considerando como factores principales el costo y riesgo. Ambos modelos consideran el problema desde la etapa de diseño, el primero además de considerar la distribución de las instalaciones de una nueva planta, también considera la reubicación de algunas instalaciones para el caso de una planta existente. El segundo modelo considero el problema tomando en cuenta el tiempo al cual se deben de adicionar o reubicar instalaciones. Los resultados obtenidos de la resolución de cada modelo muestran su importancia y aplicación a la distribución de las instalaciones en una industria. En la solución del primer modelo, los resultados obtenidos muestran la importancia de reubicar instalaciones mal distribuidas de industrias ya instaladas, en las cuales sólo el costo fue el factor considerado, localizando las instalaciones en distancias poco seguras con relación a las peligrosas. En cuanto a la segunda metodología, los resultados mostraron la importancia de considerar futuras ampliaciones para determinar la distribución óptima de las unidades que integran una planta de proceso, esto debido a que generalmente la mayoría de las plantas de proceso inician operando a capacidades inferiores a las que fueron diseñadas y esta capacidad a medida que el tiempo transcurre y la demanda aumenta debe ser aumentada, además que la mayoría de los casos es necesario adicionar nuevas unidades al proceso, las cuales deben ser instaladas en optimas posiciones.

Las metodologías presentadas en este trabajo proporciona una herramienta de gran utilidad en proyectos de inversión de plantas químicas, en cuanto se refiere a la distribución da las instalaciones de estas, debido a que esta proporciona un conjunto de soluciones óptimas, las cuales se equilibran entre el costo y el riesgo, además de que estos son generalizados y pueden ser aplicados a cualquier proyectos de plantas químicas.

BIBLIOGRAFÍA

1. **AICHE/CCPS. 2003.** Guidelines for facility siting and layout. New York: American Institute of Chemical Engineers.
2. **AICHE/CCPS. 2007.** Guidelines for chemical process quantitative risk analysis. New York: American Institute of Chemical Engineers.
3. **Abdolhamidzadeh, B., Abbasi, T., Rashtchian, D., Abbasi, S.A. 2011.** Domino effect in process-industry accidents e an inventory of past events and identification of some patterns. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 24, 575-593.
4. **Armour, G. C., & Buffa, E. 1963.** A heuristic algorithm and simulation approach to relative location of facilities. *Management Science*. 9, 294–309.
5. **Baesi, S.,Abdolhamidzadeh, B., Hassan, C, R, C.,Hamid, M, D.,Reniers, G. 2012.** Application of a multi-plant QRA: A case study investigating the risk impact of the construction of a new plant on an existing chemical plant's risk levels. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 26,895-903.
6. **Brooke, A., Kendrick, D., Meeraus, A., A., Raman, R. 2014.** GAMS A User's Guide, www.gams.com; *GAMS Development Corporation: Washington, DC*.
7. **Crowl, D. A., & Louvar, J. F. 2011.** Chemical process safety fundamentals with applications (3rd ed.). *Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall PTR*.
8. **Cozzani, V., Salzano, E. 2004^a.** The quantitative assessment of domino effects caused by overpressure: Part I. Probit models. *Journal of Hazardous Materials*, A107: 67-80.
9. **Cozzani, V., Salzano, E. 2004^b.** The quantitative assessment of domino effect caused by overpressure: Part II. Case studies. *Journal of Hazardous Materials*, 107, 81-94.
10. **Cozzani, V., Gubinelli, G. Antonioni,, G. Spadoni,, S. Zanelli. 2005.** The assessment of risk caused by domino effect in quantitative area risk analysis. *Journal of Hazardous Materials*,127, 14-30.
11. **Cozzani, V., Antonioni, G., Spadoni, G. 2006^a .** Quantitative assessment of domino scenarios by a GIS-based software tool. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*,19,463-477.

12. **Cozzani, V., Gubinelli, G., Salzano, E. 2006^b**. Escalation thresholds in the assessment of domino accidental events. *Journal of Hazardous Materials*,129,1-21.
13. **Cozzani, V., Tugnoli, A., Salzano, E. 2007** . Prevention of domino effect: From active and passive strategies to inherently safer design. *Journal of Hazardous Materials*,139,209-219.
14. **Crowl, D.A., Louvar, J.F. 2011**. Chemical process safety fundamentals with applications (3rd ed.). Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall PTR.
15. **Cui, H., Xu, Z. S., & Song, W. H. 2008**. Quantitative comparative analysis on explosion and poisoning accidents of artificial gas. *Journal of Catastrophe*. 23, 96-100, (In Chinese).
16. **Diaz-Ovalle, C., Vazquez-Roman, R., Mannan, M.S. 2010**. An approach to solve the facility layout problem based on the worst-case scenario. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*,23, 385-392.
17. **Diaz-Ovalle, C.,Vazquez-Roman, R., Mannan, M.S. 2009** . A comparison of deterministic and stochastic approaches to solve the facility layout problem with toxic releases computer. *Aided Chemical Engineering*, 26,93-98. Georgiadis, M.C., Macchietto, S.(1997). Layout of process plants: a novel approach. *Computers and Chemical Engineering*,21(S1), S337–S342.
18. **Dole, E., & Scannell, G. F. 1990**. Phillips 66 company houston chemical complex explosion and fire. A report to the President. *Occupational Safety and Health Administration*. US Department of Labor.
19. **Georgiadis, M. C., & Macchietto, S. 1997**. Layout of process plants: a novel approach. *Computers & Chemical Engineering*. 21(S1), S337–S342.
20. **Grossel, S, S. 2004** .Guidelines for facility siting and layout: Center for chemical process safety of the AIChE (CCPS/AIChE),New York , NY. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 17, 385-386.
21. **Haines, Y. Y., Lasdon, L.S., Wismer, D.A. 1971**. On a bicriterion formulation of the problems of integrated system identification and system optimization. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.* 1: 296-297.

22. Han, K., Kim, Y.H., Jang, N., Kim, H., Shin, D., Yoon, E.S. 2013. Risk index approach for the optimal layout of chemical processes minimizing risk to humans. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 52, 7274-7281.
23. Han, K., Choi, I., Yoon, E.S. 2012 . Optimal layout of chemical process using risk index approach to human. *Computer Aided Chemical Engineering*, 31, 1276-1280.
24. Han, Z.Y., Weng, W.G. 2010. An integrated quantitative risk analysis method for natural gas pipeline network. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 23, 428-436.
25. Jayakumar, S., Reklaitis, G.V. 1994 . Chemical plant layout via graph partitioning-I Single level. *Computers and Chemical Engineering*, 18(5), 441-458.
26. Jayakumar, S., Reklaitis, G.V. 1996. Chemical plant layout via graph partitioning- II Multiple levels. *Computers and Chemical Engineering*, 20, 563-578.
27. Jonkman, S. N., van Gelder, P. H., & Vrijling, J. K. 2003. An overview of quantitative risk measures for loss of life and economic damage. *Journal of Hazardous Materials*. 99, 1-30.
28. Jung, S., Ng, D. Laird, C., Mannan, M.S. 2010. A new approach for facility siting using mapping risks on a plant grid area and optimization. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 23, 824-830.
29. Jung, S. Ng, D., Diaz-Ovalle, C., Vazquez-Roman, R., Mannan, M.S. 2011. New approach to optimizing the facility siting and layout for fire and explosion scenarios. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 50, 3928-3937.
30. Landucci, G., Gubinelli, G., Antonioni, G., Cozzani, V. 2009. The assessment of the damage probability of storage tanks in domino events triggered by fire. *Accident Analysis and Prevention*, 41, 1206-1215.
31. Lira-Flores, J., Vazquez-Roman, R., Lopez-Molina, A., Mannan, M, S. 2013. A MINLP approach for layout designs based on the domino hazard index. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, In Press.
32. López-Molina, A., Vázquez-Román, R., Mannan, M.S., Félix-Flores, G. 2013. An approach for domino effect reduction based on optimal layouts. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 26, 887-894.
33. Mecklenburgh, J. C. 1973. Plant layout: A guide to the layout of process plant and sites. New York: Wiley.

34. Mannan, M. S. 2005. Lees' loss prevention in the process industries: Hazard identification, assessment and control. USA: Elsevier Butterworth-Heinemann.
35. Mannan, M. S.; West, H. H.; Berwanger, P. C. 2007. Lessons learned from recent incidents: Facility siting, atmospheric venting, and operator information systems. *Journal of Loss Prevention in the Process*. 20, 644–650.
36. Mingguang, Z., Juncheng, J. 2008 . An improved probit method for assessment of domino effect to chemical process equipment caused by overpressure. *Journal of Hazardous Materials*,158, 280-286.
37. Ozyurt, D. B., & Realff, M. J. 1999. Geographic and process information chemical plant layout problems. *AIChE Journal*. 45, 2161-2174.
38. Penteado, F. D., & Ciric, A. R. 1996. An MINLP approach for safe process plant layout. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 35(4), 1354–1361.
39. Ponce-Ortega, J.M., Jiménez-Gutierrez, A.; Grossmann, I. E. 2008. Simultaneous retrofit and heat integration of chemical processes. *Industrial and Engineering Chemistry Research*,47, 5512-5528.
40. Paterson, K., Tam, V. H. Y., Moros, T., & Ward-Gittos, D. 2000. The design of BPETAP platform against gas explosions. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 13(1), 73–79.
41. Patsiatzis, D.I., & Papageorgiou, L.G. 2002. Optimal multi-floor process plant layout. *Computer and chemical engineering*, 26,575-583.
42. Patsiatzis, D.I., & Papageorgiou, L.G. 2004. An MILP approach to safe process plant layout. *Chemical Engineering Research and Design*, 82,579-586.
43. Raman, R., Grossmann, I. E. 1994. Modeling and computational techniques for logic based integer programming. *Computer and Chemical Engineering*,18, 563–578.
44. Salzano, E., Cozzani, V. 2005. The analysis of domino accidents triggered by vapor cloud explosions. *Reliability Engineering and System Safety*,90: 271-284.
45. Sanders, R. E. 2003. Designs that lacked inherent safety: case histories. *Journal of Hazardous Materials*.104(1–3), 149–161.
46. Tugnoli, A.,Khan, F.,Amyotte, P.,Cozzani, V. 2008. Safety assessment in plant layout design using indexing approach: Implementing inherent safety perspective: Part 1-

- guideword applicability and method description. *Journal of Hazardous Materials*, 160,100-109.
- 47. Tugnoli, A.,Khan, F.,Amyotte, P.,Cozzani, V. 2008.** Safety assessment in plant layout design using indexing approach: Implementing inherent safety perspective: Part 2- Domino hazard index and case study. *Journal of Hazardous Materials* , 160,110-121.
- 48. Taylor, D, W. 2006.** The role of consequence modeling in LNG facility siting. *Journal of Hazardous Materials*, 142, 776-785.
- 49. Vazquez-Roman, R., Lee, J.H., Jung S., Mannan M.S. 2010.** Optimal facility layout under toxic release in process facilities: A stochastic approach. *Computers and Chemical Engineering*,34, 122-133.

APÉNDICES

A.11 Código en GAMS del modelo para la solución del primer problema titulado; Localización óptima de instalaciones industriales considerando simultáneamente aspectos económicos y de seguridad.

OPTIONS RESLIM = 1000000000;

OPTIONS ITERLIM = 1000000000;

SETS

I CONJUNTO DE EJE COORDENADO /1*10/

J CONJUNTO DE EJE COORDENADO/1*10/

E CONJUNTO DE NUEVAS INSTALACIONES/1*13/;

ALIAS (I,I1);

ALIAS (J,J1);

ALIAS (E,E1);

TABLE DELTA(I,J) *PARAMETRO BINARIO ASOCIADO A LA DISTANCIA SEGURA DE INSTALACION

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

PARAMETER ULC(I,J,E)	3.5.9 =301000	6.3.9 =301100
*COSTO UNITARIO DEL TERRENO	3.6.9 =301000	6.4.9 =301100
/	3.7.9 =301000	6.5.9 =0
	3.8.9 =301100	6.6.9 =0
1.1.9 =301100	3.9.9 =301100	6.7.9 =301100
1.2.9 =301100	3.10.9 =301100	6.8.9 =301000
1.3.9 =301100	4.1.9 =301000	6.9.9 =300900
1.4.9 =301000	4.2.9 =301100	6.10.9 =300900
1.5.9 =300900	4.3.9 =301100	7.1.9 =301000
1.6.9 =300900	4.4.9 =301100	7.2.9 =301100
1.7.9 =301000	4.5.9 =301100	7.3.9 =301100
1.8.9 =301100	4.6.9 =301100	7.4.9 =301100
1.9.9 =301100	4.7.9 =301100	7.5.9 =301100
1.10.9 =301100	4.8.9 =301000	7.6.9 =301100
2.1.9 =301100	4.9.9 =301000	7.7.9 =301100
2.2.9 =0	4.10.9 =301000	7.8.9 =301100
2.3.9 =301100	5.1.9 =301000	7.9.9 =301000
2.4.9 =301000	5.2.9 =301100	7.10.9 =300500
2.5.9 =300900	5.3.9 =0	8.1.9 =301100
2.6.9 =300900	5.4.9 =301100	8.2.9 =301100
2.7.9 =301000	5.5.9 =0	8.3.9 =0
2.8.9 =301100	5.6.9 =0	8.4.9 =301100
2.9.9 =0	5.7.9 =301100	8.5.9 =301000
2.10.9 =301100	5.8.9 =301000	8.6.9 =301100
3.1.9 =301100	5.9.9 =300900	8.7.9 =0
3.2.9 =301100	5.10.9 =300900	8.8.9 =301100
3.3.9 =301100	6.1.9 =301000	8.9.9 =301100
3.4.9 =301000	6.2.9 =301100	8.10.9 =301100

9.1.9 =0	1.8.12 =1001100	4.6.12 =1001100
9.2.9 =301100	1.9.12 =1001100	4.7.12 =1001100
9.3.9 =0	1.10.12 =1001100	4.8.12 =1001000
9.4.9 =301100	2.1.12 =1001100	4.9.12 =1001000
9.5.9 =301000	2.2.12 =0	4.10.12 =1001000
9.6.9 =301100	2.3.12 =1001100	5.1.12 =1001000
9.7.9 =301100	2.4.12 =1001000	5.2.12 =1001100
9.8.9 =301100	2.5.12 =1000900	5.3.12 =0
9.9.9 =0	2.6.12 =1000900	5.4.12 =1001100
9.10.9 =301100	2.7.12 =1001000	5.5.12 =0
10.1.9 =301100	2.8.12 =1001100	5.6.12 =0
10.2.9 =301100	2.9.12 =0	5.7.12 =1001100
10.3.9 =301100	2.10.12 =1001100	5.8.12 =1001000
10.4.9 =301100	3.1.12 =1001100	5.9.12 =1000900
10.5.9 =300900	3.2.12 =1001100	5.10.12 =1000900
10.6.9 =300900	3.3.12 =1001100	6.1.12 =1001000
10.7.9 =301000	3.4.12 =1001000	6.2.12 =1001100
10.8.9 =301100	3.5.12 =1001000	6.3.12 =1001100
10.9.9 =301100	3.6.12 =1001000	6.4.12 =1001100
10.10.9 =301100	3.7.12 =1001000	6.5.12 =0
\$ONTEXT	3.8.12 =1001100	6.6.12 =0
1.1.12 =1001100	3.9.12 =1001100	6.7.12 =1001100
1.2.12 =1001100	3.10.12 =1001100	6.8.12 =1001000
1.3.12 =1001100	4.1.12 =1001000	6.9.12 =1000900
1.4.12 =1001000	4.2.12 =1001100	6.10.12 =1000900
1.5.12 =1000900	4.3.12 =1001100	7.1.12 =1001000
1.6.12 =1000900	4.4.12 =1001100	7.2.12 =1001100
1.7.12 =1001000	4.5.12 =1001100	7.3.12 =1001100

7.4.12 =1001100	10.2.12 =1001100	2.9.13 0
7.5.12 =1001100	10.3.12 =1001100	2.10.13 501100
7.6.12 =1001100	10.4.12 =1001100	3.1.13 501100
7.7.12 =1001100	10.5.12 =1000900	3.2.13 501100
7.8.12 =1001100	10.6.12 =1000900	3.3.13 501100
7.9.12 =1001000	10.7.12 =1001000	3.4.13 501000
7.10.12 =1001000	10.8.12 =1001100	3.5.13 501000
8.1.12 =1001100	10.9.12 =1001100	3.6.13 501000
8.2.12 =1001100	10.10.12 =1001100	3.7.13 501000
8.3.12 =0		3.8.13 501100
8.4.12 =1001100	1.1.13 501100	3.9.13 501100
8.5.12 =1001000	1.2.13 501100	3.10.13 501100
8.6.12 =1001100	1.3.13 501100	4.1.13 501000
8.7.12 =0	1.4.13 501000	4.2.13 501100
8.8.12 =1001100	1.5.13 500900	4.3.13 501100
8.9.12 =1001100	1.6.13 500900	4.4.13 501100
8.10.12 =1001100	1.7.13 501000	4.5.13 501100
9.1.12 =0	1.8.13 501100	4.6.13 501100
9.2.12 =1001100	1.9.13 501100	4.7.13 501100
9.3.12 =0	1.10.13 501100	4.8.13 501000
9.4.12 =1001100	2.1.13 501100	4.9.13 501000
9.5.12 =1001000	2.2.13 0	4.10.13 501000
9.6.12 =1001100	2.3.13 501100	5.1.13 501000
9.7.12 =1001100	2.4.13 501000	5.2.13 501100
9.8.12 =1001100	2.5.13 500900	5.3.13 0
9.9.12 =0	2.6.13 500900	5.4.13 501100
9.10.12 =1001100	2.7.13 501000	5.5.13 0
10.1.12 =1001100	2.8.13 501100	5.6.13 0

5.7.13 501100	8.5.13 501000	1.2.13=201100
5.8.13 501000	8.6.13 501100	1.3.13=201100
5.9.13 500900	8.7.13 0	1.4.13=201000
5.10.13 500900	8.8.13 501100	1.5.13=200900
6.1.13 501000	8.9.13 501100	1.6.13=200900
6.2.13 501100	8.10.13 501100	1.7.13=201000
6.3.13 501100	9.1.13 0	1.8.13=201100
6.4.13 501100	9.2.13 501100	1.9.13=201100
6.5.13 0	9.3.13 0	1.10.13 =201100
6.6.13 0	9.4.13 501100	2.1.13 =201100
6.7.13 501100	9.5.13 501000	2.2.13 =0
6.8.13 501000	9.6.13 501100	2.3.13 =201100
6.9.13 500900	9.7.13 501100	2.4.13 =201000
6.10.13 500900	9.8.13 501100	2.5.13 =200900
7.1.13 501000	9.9.13 0	2.6.13 =200900
7.2.13 501100	9.10.13 501100	2.7.13 =201000
7.3.13 501100	10.1.13 501100	2.8.13 =201100
7.4.13 501100	10.2.13 501100	2.9.13 =0
7.5.13 501100	10.3.13 501100	2.10.13 =201100
7.6.13 501100	10.4.13 501100	3.1.13 =201100
7.7.13 501100	10.5.13 500900	3.2.13 =201100
7.8.13 501100	10.6.13 500900	3.3.13 =201100
7.9.13 501000	10.7.13 501000	3.4.13 =201000
7.10.13 501000	10.8.13 501100	3.5.13 =201000
8.1.13 501100	10.9.13 501100	3.6.13 =201000
8.2.13 501100	10.10.13 501100	3.7.13 =201000
8.3.13 0	\$OFFTEXT	3.8.13 =201100
8.4.13 501100	1.1.13=201100	3.9.13 =201100

3.10.13 =201100	6.5.13 =0	8.10.13 =201100
4.1.13 =201000	6.6.13 =0	9.1.13 =0
4.2.13 =201100	6.7.13 =201100	9.2.13 =201100
4.3.13 =201100	6.8.13 =201000	9.3.13 =0
4.4.13 =201100	6.9.13 =200900	9.4.13 =201100
4.5.13 =201100	6.10.13 =200900	9.5.13 =201000
4.6.13 =201100	7.1.13 =201000	9.6.13 =201100
4.7.13 =201100	7.2.13 =201100	9.7.13 =201100
4.8.13 =201000	7.3.13 =201100	9.8.13 =201100
4.9.13 =201000	7.4.13 =201100	9.9.13 =0
4.10.13 =201000	7.5.13 =201100	9.10.13 =201100
5.1.13 =201000	7.6.13 =201100	10.1.13 =201100
5.2.13 =201100	7.7.13 =201100	10.2.13 =201100
5.3.13 =0	7.8.13 =201100	10.3.13 =201100
5.4.13 =201100	7.9.13 =201000	10.4.13 =201100
5.5.13 =0	7.10.13 =201000	10.5.13 =200900
5.6.13 =0	8.1.13 =201100	10.6.13 =200900
5.7.13 =201100	8.2.13 =201100	10.7.13 =201000
5.8.13 =201000	8.3.13 =0	10.8.13 =201100
5.9.13 =200900	8.4.13 =201100	10.9.13 =201100
5.10.13 =200900	8.5.13 =201000	10.10.13 =201100
6.1.13 =201000	8.6.13 =201100	/
6.2.13 =201100	8.7.13 =0	;
6.3.13 =201100	8.8.13 =201100	
6.4.13 =201100	8.9.13 =201100	

PARAMETER UICINT(I,J,E,I1,J1,E1) COSTO DE INTERCONEXION ENTRE LAS UNIDADES NUEVAS;

UICINT('1','1',E,'1','1',E1) =0 ;	UICINT('1','1',E,'3','7',E1) =6.3246 ;
UICINT('1','1',E,'1','2',E1) =1 ;	UICINT('1','1',E,'3','8',E1) =7.2801 ;
UICINT('1','1',E,'1','3',E1) =2 ;	UICINT('1','1',E,'3','9',E1) =8.2462 ;
UICINT('1','1',E,'1','4',E1) =3 ;	UICINT('1','1',E,'3','10',E1) =9.2195 ;
UICINT('1','1',E,'1','5',E1) =4 ;	UICINT('1','1',E,'4','1',E1) =3 ;
UICINT('1','1',E,'1','6',E1) =5 ;	UICINT('1','1',E,'4','2',E1) =3.1623 ;
UICINT('1','1',E,'1','7',E1) =6 ;	UICINT('1','1',E,'4','3',E1) =3.6056 ;
UICINT('1','1',E,'1','8',E1) =7 ;	UICINT('1','1',E,'4','4',E1) =4.2426 ;
UICINT('1','1',E,'1','9',E1) =8 ;	UICINT('1','1',E,'4','5',E1) =5 ;
UICINT('1','1',E,'1','10',E1) =9 ;	UICINT('1','1',E,'4','6',E1) =5.831 ;
UICINT('1','1',E,'2','1',E1) =1 ;	UICINT('1','1',E,'4','7',E1) =6.7082 ;
UICINT('1','1',E,'2','2',E1) =1.4142 ;	UICINT('1','1',E,'4','8',E1) =7.6158 ;
UICINT('1','1',E,'2','3',E1) =2.2361 ;	UICINT('1','1',E,'4','9',E1) =8.544 ;
UICINT('1','1',E,'2','4',E1) =3.1623 ;	UICINT('1','1',E,'4','10',E1) =9.4868 ;
UICINT('1','1',E,'2','5',E1) =4.1231 ;	UICINT('1','1',E,'5','1',E1) =4 ;
UICINT('1','1',E,'2','6',E1) =5.099 ;	UICINT('1','1',E,'5','2',E1) =4.1231 ;
UICINT('1','1',E,'2','7',E1) =6.0828 ;	UICINT('1','1',E,'5','3',E1) =4.4721 ;
UICINT('1','1',E,'2','8',E1) =7.0711 ;	UICINT('1','1',E,'5','4',E1) =5 ;
UICINT('1','1',E,'2','9',E1) =8.0623 ;	UICINT('1','1',E,'5','5',E1) =5.6569 ;
UICINT('1','1',E,'2','10',E1) =9.0554 ;	UICINT('1','1',E,'5','6',E1) =6.4031 ;
UICINT('1','1',E,'3','1',E1) =2 ;	UICINT('1','1',E,'5','7',E1) =7.2111 ;
UICINT('1','1',E,'3','2',E1) =2.2361 ;	UICINT('1','1',E,'5','8',E1) =8.0623 ;
UICINT('1','1',E,'3','3',E1) =2.8284 ;	UICINT('1','1',E,'5','9',E1) =8.9443 ;
UICINT('1','1',E,'3','4',E1) =3.6056 ;	UICINT('1','1',E,'5','10',E1) =9.8489 ;
UICINT('1','1',E,'3','5',E1) =4.4721 ;	UICINT('1','1',E,'6','1',E1) =5 ;
UICINT('1','1',E,'3','6',E1) =5.3852 ;	UICINT('1','1',E,'6','2',E1) =5.099 ;

UICINT('1','1,E,'6','3',E1) =5.3852 ;	UICINT('1','1,E,'8','8',E1) =9.8995 ;
UICINT('1','1,E,'6','4',E1) =5.831 ;	UICINT('1','1,E,'8','9',E1) =10.6301 ;
UICINT('1','1,E,'6','5',E1) =6.4031 ;	UICINT('1','1,E,'8','10',E1) =11.4018 ;
UICINT('1','1,E,'6','6',E1) =7.0711 ;	UICINT('1','1,E,'9','1',E1) =8 ;
UICINT('1','1,E,'6','7',E1) =7.8102 ;	UICINT('1','1,E,'9','2',E1) =8.0623 ;
UICINT('1','1,E,'6','8',E1) =8.6023 ;	UICINT('1','1,E,'9','3',E1) =8.2462 ;
UICINT('1','1,E,'6','9',E1) =9.434 ;	UICINT('1','1,E,'9','4',E1) =8.544 ;
UICINT('1','1,E,'6','10',E1) =10.2956 ;	UICINT('1','1,E,'9','5',E1) =8.9443 ;
UICINT('1','1,E,'7','1',E1) =6 ;	UICINT('1','1,E,'9','6',E1) =9.434 ;
UICINT('1','1,E,'7','2',E1) =6.0828 ;	UICINT('1','1,E,'9','7',E1) =10 ;
UICINT('1','1,E,'7','3',E1) =6.3246 ;	UICINT('1','1,E,'9','8',E1) =10.6301 ;
UICINT('1','1,E,'7','4',E1) =6.7082 ;	UICINT('1','1,E,'9','9',E1) =11.3137 ;
UICINT('1','1,E,'7','5',E1) =7.2111 ;	UICINT('1','1,E,'9','10',E1) =12.0416 ;
UICINT('1','1,E,'7','6',E1) =7.8102 ;	UICINT('1','1,E,'10','1',E1) =9 ;
UICINT('1','1,E,'7','7',E1) =8.4853 ;	UICINT('1','1,E,'10','2',E1) =9.0554 ;
UICINT('1','1,E,'7','8',E1) =9.2195 ;	UICINT('1','1,E,'10','3',E1) =9.2195 ;
UICINT('1','1,E,'7','9',E1) =10 ;	UICINT('1','1,E,'10','4',E1) =9.4868 ;
UICINT('1','1,E,'7','10',E1) =10.8167 ;	UICINT('1','1,E,'10','5',E1) =9.8489 ;
UICINT('1','1,E,'8','1',E1) =7 ;	UICINT('1','1,E,'10','6',E1) =10.2956 ;
UICINT('1','1,E,'8','2',E1) =7.0711 ;	UICINT('1','1,E,'10','7',E1) =10.8167 ;
UICINT('1','1,E,'8','3',E1) =7.2801 ;	UICINT('1','1,E,'10','8',E1) =11.4018 ;
UICINT('1','1,E,'8','4',E1) =7.6158 ;	UICINT('1','1,E,'10','9',E1) =12.0416 ;
UICINT('1','1,E,'8','5',E1) =8.0623 ;	UICINT('1','1,E,'10','10',E1) =12.7279 ;
UICINT('1','1,E,'8','6',E1) =8.6023 ;	
UICINT('1','1,E,'8','7',E1) =9.2195 ;	

VARIABLE TAC,TRISK;

BINARY VARIABLE

Y(I,J,E) EXISTENCIA DE LOS NUEVOS EQUIPOS

Z(I,J,E,I1,J1,E1) PARAMETRO BINARIO ASOCIADO A LA EXISTENCIA DE INTERCONEXION ENTRE LOS EQUIPOS ;

POSITIVE VARIABLES

INTCOSTN(E) COSTO DE INTERCONEXION ENTRE LOS EQUIPOS.

LANDCOSTN(E) COSTO DEL TERRENO DONDE SE MOVERAN LOS EQUIPOS

RISKN(E) RIESGO ASOCIADO A LA INSTALACION DE LOS NUEVOS EQUIPOS CON RESPECTO A LOS YA EXISTENTES

DINTCOSN(I,J,E) VARIABLE DESGREGADA RELACIONADA AL COSTO DE INTERCONEXION

DLANDCOSTN(I,J,E) VARIABLE DESGREGADA RELACIONADA CON EL COSTO DEL TERRENO

DRISKN(I,J,E) VARIABLE DESGREGADA RIESGO

ICINT(E,E1) COSTO DE INTERCONEXION ENTRE LOS NUEVOS EQUIPOS

RISKINT(E,E1) RIESGO DE INTERCONEXION ENTRE LOS EQUIPOS NUEVOS

DCINT(I,J,E,I1,J1,E1) VARIABLE DESGREGADA

DRISKINT(I,J,E,I1,J1,E1) VARIABLE DESGREGADA

INT;

EQUATIONS

OBJ FUNCION OBJETIVO

R2(E) RESTRICCION LOGICA QUE ME INDICA LA EXISTENCIA DE UNA SOLA NUEVA INSTALACION

EE1(E) ECUACION PARA EL CALCULO DEL COSTO DE INTERCONEXION ENTRE LOS EQUIPOS NUEVOS Y LOS EXISTENTES

E2(E) COSTO DEL TERRENO

E3(E) RIESGO ASOCIADO ENTRE LOS EQUIPOS NUEVOS CON LOS EXISTENTES

E4(I,J,E) ECUACION PARA LA VARIABLE DESGREGADA DEL COSTO DE INTERCONEXION

E5(I,J,E) ECUACION PARA LA VARIABLE DESGREGADA DEL COSTO DEL TERRENO

R3(I,J,E) DISTANCIA MINIMA DE SEPARACION

- E6(I,J,E) ECUACION PARA LA VARIABLE DESGREGADA DEL RIESGO
- R4(I,J) RESTRICCION PARA EVITAR SOBREPOSICION DE LAS UNIDADES NUEVAS
- R5(I,J,E,I1,J1,E1) RESTRICCION ASOCIADA A LA EXISTENCIA DE INTERCONEXION ENTRE LAS UNIDADES NUEVAS
- E7(E,E1) ECUACION PARA EL CALCULO DEL COSTO DE INTERCONEXION ENTRE LOS NUEVOS EQUIPOS
- E8(E,E1) ECUACION PARA EL CALCULO DEL RIESGO ASOCIADO A LA INTERCONEXION ENTRE LOS NUEVOS EQUIPOS
- E9(I,J,E,I1,J1,E1) ECUACION PARA LA VARIABLE DESGREGADA DEL COSTO DE INTERCONEXION
- E10(I,J,E,I1,J1,E1) ECUACION PARA LA VARIABLE DESGREGADA DEL RIESGO
- E11 ECUACION PARA EL CALCULO DEL RIESGO TOTAL;

OBJ..

$TAC=E=SUM((E),INTCOSTN(E))+SUM((E),LANDCOSTN(E))+SUM((E,E1)\$(ORD(E)GT ORD(E1)),ICINT(E,E1));$

EE1(E).. $INTCOSTN(E)=E=SUM((I,J),DINTCOSN(I,J,E));$

E2(E).. $LANDCOSTN(E)=E=SUM((I,J),DLANDCOSTN(I,J,E));$

E3(E).. $RISKN(E)=E=SUM((I,J),DRISKN(I,J,E));$

E4(I,J,E).. $DINTCOSN(I,J,E)=E=UIC(I,J,E)*Y(I,J,E);$

E5(I,J,E).. $DLANDCOSTN(I,J,E)=E=ULC(I,J,E)*Y(I,J,E);$

E6(I,J,E).. $DRISKN(I,J,E)=E=UR(I,J,E)*Y(I,J,E);$

$E7(E,E1)\$(ORD(E)GT ORD(E1)).. ICINT(E,E1)=E=SUM((I,J,I1,J1),DCINT(I,J,E,I1,J1,E1));$

$E8(E,E1)\$(ORD(E)GT ORD(E1)).. RISKINT(E,E1)=E=SUM((I,J,I1,J1),DRISKINT(I,J,E,I1,J1,E1));$

$E9(I,J,E,I1,J1,E1)\$(ORD(E)GT ORD(E1)).. DCINT(I,J,E,I1,J1,E1)=E=UICINT(I,J,E,I1,J1,E1)*Z(I,J,E,I1,J1,E1);$

$E10(I,J,E,I1,J1,E1)\$(ORD(E)GT ORD(E1)).. DRISKINT(I,J,E,I1,J1,E1)=E=URISKINT(I,J,E,I1,J1,E1)*Z(I,J,E,I1,J1,E1);$

E11.. $TRISK=E=SUM((E),RISKN(E))+SUM((E,E1)\$(ORD(E)GT ORD(E1)),RISKINT(E,E1));$

*SI EXISTE Y(I,J,E) NO PUEDE EXISTIR OTRA Y(I,J,E) EN ESAS COORDENADAS

R2(E).. $SUM((I,J),Y(I,J,E))=E=1;$

* DOS UNIDADES NUEVAS NO SE PUEDEN INSTALAR EN EL MISMO LUGAR

R4(I,J).. SUM(E,Y(I,J,E))=L=1;

*SI EXISTEN MAS DE DOS UNIDADES NUEVAS ENTONCES EXISTIRA Z

R5(I,J,E,I1,J1,E1)\$((ORD(I) NE ORD(I1))AND(ORD(J) NE ORD(J1))AND(ORD(E) NE ORD(E1)) AND (ORD(E) GT ORD(E1)))..

(2-Y(I,J,E)-Y(I1,J1,E1))+Z(I,J,E,I1,J1,E1)=G=1;

*RESTRICCION PARA EVITAR SOBREPOSICION EN LA INTERCONEXION DE LOS EQUIPOS NUEVOS

*R6(E,E1)\$ (ORD(E)GT ORD(E1)).. SUM((I,J,I1,J1),Z(I,J,E,I1,J1,E1))=E=1;

*DISTANCIA MINIMA DE SEPARACION

R3(I,J,E).. DELTA(I,J)+Y(I,J,E)=L=1;

*PARA FIJAR LAS UNIDADES SE REALIZA DE LASIGUIENTE MANERA

Y.FX('2','9','1')=1; Y.FX('5','6','5')=1; Y.FX('9','3','10')=1;

Y.FX('2','2','2')=1; Y.FX('5','5','6')=1; Y.FX('5','3','12')=1;

Y.FX('9','9','3')=1; Y.FX('6','6','7')=1; Y.FX('8','7','11')=1;

Y.FX('9','1','4')=1; Y.FX('6','5','8')=1;

MODEL MULTIPLESEQUIPOS/ALL/;

TRISK.UP=8;

SOLVE MULTIPLESEQUIPOS USING MIP MINIMIZING TAC;

SOLVE MULTIPLESEQUIPOS USING MIP MINIMIZING TRISK;

PARAMETERS

RISKINTS RISK FOR INSTALLATION

RISKINTER RISK FOR INTERCONNECTION

TINSTEACOST INTERCONNECTION WITH EXISTING UNITS COST

TINSTNCOST INTERCONNECTION WITH NEW UNITS COST

TLANDCOSTS LAND COST

;

RISKINTS=SUM((E),RISKN.L(E));

RISKINTER=SUM((E,E1)\$ (ORD(E)GT ORD(E1)),RISKINT.L(E,E1));

PARAMETER UIR(I,J,E,I1,J1,E1,T) RIESGO DE INTERCONEXION ENTRE NUEVAS UNIDADES;

UIR(I,J,E,I1,J1,E1,T)=0;

PARAMETER S(T) FACTOR DE ANUALIZACION

/

1 0.33

2 0.45

3 0.53

/;

PARAMETER UII(I,J,E,I1,J1,E1,T) COSTOS DE INTERCONEXION ENTRE LAS UNIDADES;

UII('1','1',E,'1','1',E1,T) =0 ;	UII('1','1',E,'2','9',E1,T) =8.0623 ;
UII('1','1',E,'1','2',E1,T) =1 ;	UII('1','1',E,'2','10',E1,T) =9.0554 ;
UII('1','1',E,'1','3',E1,T) =2 ;	UII('1','1',E,'3','1',E1,T) =2 ;
UII('1','1',E,'1','4',E1,T) =3 ;	UII('1','1',E,'3','2',E1,T) =2.2361 ;
UII('1','1',E,'1','5',E1,T) =4 ;	UII('1','1',E,'3','3',E1,T) =2.8284 ;
UII('1','1',E,'1','6',E1,T) =5 ;	UII('1','1',E,'3','4',E1,T) =3.6056 ;
UII('1','1',E,'1','7',E1,T) =6 ;	UII('1','1',E,'3','5',E1,T) =4.4721 ;
UII('1','1',E,'1','8',E1,T) =7 ;	UII('1','1',E,'3','6',E1,T) =5.3852 ;
UII('1','1',E,'1','9',E1,T) =8 ;	UII('1','1',E,'3','7',E1,T) =6.3246 ;
UII('1','1',E,'1','10',E1,T) =9 ;	UII('1','1',E,'3','8',E1,T) =7.2801 ;
UII('1','1',E,'2','1',E1,T) =1 ;	UII('1','1',E,'3','9',E1,T) =8.2462 ;
UII('1','1',E,'2','2',E1,T) =1.4142 ;	UII('1','1',E,'3','10',E1,T) =9.2195 ;
UII('1','1',E,'2','3',E1,T) =2.2361 ;	UII('1','1',E,'4','1',E1,T) =3 ;
UII('1','1',E,'2','4',E1,T) =3.1623 ;	UII('1','1',E,'4','2',E1,T) =3.1623 ;
UII('1','1',E,'2','5',E1,T) =4.1231 ;	UII('1','1',E,'4','3',E1,T) =3.6056 ;
UII('1','1',E,'2','6',E1,T) =5.099 ;	UII('1','1',E,'4','4',E1,T) =4.2426 ;
UII('1','1',E,'2','7',E1,T) =6.0828 ;	UII('1','1',E,'4','5',E1,T) =5 ;
UII('1','1',E,'2','8',E1,T) =7.0711 ;	UII('1','1',E,'4','6',E1,T) =5.831 ;

U _{II} (1',1',E,4',7',E1,T) =6.7082 ;	U _{II} (1',1',E,7',5',E1,T) =7.2111 ;
U _{II} (1',1',E,4',8',E1,T) =7.6158 ;	U _{II} (1',1',E,7',6',E1,T) =7.8102 ;
U _{II} (1',1',E,4',9',E1,T) =8.544 ;	U _{II} (1',1',E,7',7',E1,T) =8.4853 ;
U _{II} (1',1',E,4',10',E1,T) =9.4868 ;	U _{II} (1',1',E,7',8',E1,T) =9.2195 ;
U _{II} (1',1',E,5',1',E1,T) =4 ;	U _{II} (1',1',E,7',9',E1,T) =10 ;
U _{II} (1',1',E,5',2',E1,T) =4.1231 ;	U _{II} (1',1',E,7',10',E1,T) =10.8167 ;
U _{II} (1',1',E,5',3',E1,T) =4.4721 ;	U _{II} (1',1',E,8',1',E1,T) =7 ;
U _{II} (1',1',E,5',4',E1,T) =5 ;	U _{II} (1',1',E,8',2',E1,T) =7.0711 ;
U _{II} (1',1',E,5',5',E1,T) =5.6569 ;	U _{II} (1',1',E,8',3',E1,T) =7.2801 ;
U _{II} (1',1',E,5',6',E1,T) =6.4031 ;	U _{II} (1',1',E,8',4',E1,T) =7.6158 ;
U _{II} (1',1',E,5',7',E1,T) =7.2111 ;	U _{II} (1',1',E,8',5',E1,T) =8.0623 ;
U _{II} (1',1',E,5',8',E1,T) =8.0623 ;	U _{II} (1',1',E,8',6',E1,T) =8.6023 ;
U _{II} (1',1',E,5',9',E1,T) =8.9443 ;	U _{II} (1',1',E,8',7',E1,T) =9.2195 ;
U _{II} (1',1',E,5',10',E1,T) =9.8489 ;	U _{II} (1',1',E,8',8',E1,T) =9.8995 ;
U _{II} (1',1',E,6',1',E1,T) =5 ;	U _{II} (1',1',E,8',9',E1,T) =10.6301 ;
U _{II} (1',1',E,6',2',E1,T) =5.099 ;	U _{II} (1',1',E,8',10',E1,T) =11.4018 ;
U _{II} (1',1',E,6',3',E1,T) =5.3852 ;	U _{II} (1',1',E,9',1',E1,T) =8 ;
U _{II} (1',1',E,6',4',E1,T) =5.831 ;	U _{II} (1',1',E,9',2',E1,T) =8.0623 ;
U _{II} (1',1',E,6',5',E1,T) =6.4031 ;	U _{II} (1',1',E,9',3',E1,T) =8.2462 ;
U _{II} (1',1',E,6',6',E1,T) =7.0711 ;	U _{II} (1',1',E,9',4',E1,T) =8.544 ;
U _{II} (1',1',E,6',7',E1,T) =7.8102 ;	U _{II} (1',1',E,9',5',E1,T) =8.9443 ;
U _{II} (1',1',E,6',8',E1,T) =8.6023 ;	U _{II} (1',1',E,9',6',E1,T) =9.434 ;
U _{II} (1',1',E,6',9',E1,T) =9.434 ;	U _{II} (1',1',E,9',7',E1,T) =10 ;
U _{II} (1',1',E,6',10',E1,T) =10.2956 ;	U _{II} (1',1',E,9',8',E1,T) =10.6301 ;
U _{II} (1',1',E,7',1',E1,T) =6 ;	U _{II} (1',1',E,9',9',E1,T) =11.3137 ;
U _{II} (1',1',E,7',2',E1,T) =6.0828 ;	U _{II} (1',1',E,9',10',E1,T) =12.0416 ;
U _{II} (1',1',E,7',3',E1,T) =6.3246 ;	U _{II} (1',1',E,10',1',E1,T) =9 ;
U _{II} (1',1',E,7',4',E1,T) =6.7082 ;	U _{II} (1',1',E,10',2',E1,T) =9.0554 ;

UII('1','1',E,'10','3',E1,T) =9.2195 ;	UII('1','1',E,'10','7',E1,T) =10.8167 ;
UII('1','1',E,'10','4',E1,T) =9.4868 ;	UII('1','1',E,'10','8',E1,T) =11.4018 ;
UII('1','1',E,'10','5',E1,T) =9.8489 ;	UII('1','1',E,'10','9',E1,T) =12.0416 ;
UII('1','1',E,'10','6',E1,T) =10.2956 ;	UII('1','1',E,'10','10',E1,T) =12.7279 ;

PARAMETER UER(I,J,E,T) RIESGO DE INSTALACION DE LAS UNIDADES E EN EL AÑO T DEBIDO A EXPLOSION A BLEVE

/	3.1.1.1 0	5.2.1.1 0
1.1.1.1 0	3.2.1.1 0	5.3.1.1 7
1.2.1.1 0	3.3.1.1 1	5.4.1.1 10
1.3.1.1 0	3.4.1.1 2	5.7.1.1 10
1.4.1.1 0	3.5.1.1 7	5.8.1.1 7
1.5.1.1 0	3.6.1.1 8	5.9.1.1 0
1.6.1.1 2	3.7.1.1 10	5.10.1.1 0
1.7.1.1 10	3.8.1.1 10	6.1.1.1 0
1.8.1.1 10	3.9.1.1 10	6.2.1.1 0
1.9.1.1 10	3.10.1.1 2	6.3.1.1 7
1.10.1.1 2	4.1.1.1 0	6.4.1.1 10
2.1.1.1 0	4.2.1.1 0	6.7.1.1 10
2.2.1.1 0	4.3.1.1 2	6.8.1.1 7
2.3.1.1 0	4.4.1.1 10	6.9.1.1 0
2.4.1.1 0	4.5.1.1 10	6.10.1.1 0
2.5.1.1 0	4.6.1.1 10	7.1.1.1 0
2.6.1.1 6	4.7.1.1 10	7.2.1.1 0
2.7.1.1 10	4.8.1.1 7	7.3.1.1 2
2.8.1.1 0	4.9.1.1 2	7.4.1.1 10
2.9.1.1 10	4.10.1.1 0	7.5.1.1 10
2.10.1.1 6	5.1.1.1 0	7.6.1.1 10

7.7.1.1	10	10.5.1.1	0	3.3.2.1	1
7.8.1.1	2	10.6.1.1	0	3.4.2.1	3
7.9.1.1	6	10.7.1.1	2	3.5.2.1	10
7.10.1.1	2	10.8.1.1	10	3.6.2.1	12
8.1.1.1	0	10.9.1.1	10	3.7.2.1	15
8.2.1.1	0	10.10.1.1	10	3.8.2.1	15
8.3.1.1	1			3.9.2.1	15
8.4.1.1	2	1.1.2.1	0	3.10.2.1	3
8.5.1.1	7	1.2.2.1	0	4.1.2.1	0
8.6.1.1	7	1.3.2.1	0	4.2.2.1	0
8.7.1.1	4	1.4.2.1	0	4.3.2.1	3
8.8.1.1	10	1.5.2.1	0	4.4.2.1	15
8.9.1.1	10	1.6.2.1	3	4.5.2.1	15
8.10.1.1	10	1.7.2.1	15	4.6.2.1	15
9.1.1.1	0	1.8.2.1	15	4.7.2.1	11
9.2.1.1	0	1.9.2.1	15	4.8.2.1	3
9.3.1.1	0	1.10.2.1	3	4.9.2.1	0
9.4.1.1	0	2.1.2.1	0	4.10.2.1	0
9.5.1.1	0	2.2.2.1	0	5.1.2.1	0
9.6.1.1	0	2.3.2.1	0	5.2.2.1	0
9.7.1.1	6	2.4.2.1	0	5.3.2.1	10
9.8.1.1	10	2.5.2.1	0	5.4.2.1	15
9.9.1.1	10	2.6.2.1	0	5.5.2.1	0
9.10.1.1	10	2.7.2.1	15	5.6.2.1	0
10.1.1.1	0	2.9.2.1	15	5.7.2.1	15
10.2.1.1	0	2.10.2.1	9	5.8.2.1	10
10.3.1.1	0	3.1.2.1	0	5.9.2.1	0
10.4.1.1	0	3.2.2.1	0	5.10.2.1	0

6.1.2.1	0	8.9.2.1	15	1.9.11.2	9
6.2.2.1	0	8.10.2.1	15	1.10.11.2	10
6.3.2.1	10	9.1.2.1	0	2.5.11.2	1
6.4.2.1	15	9.2.2.1	0	2.6.11.2	9
6.5.2.1	0	9.3.2.1	0	2.7.11.2	9
6.6.2.1	0	9.4.2.1	0	2.9.11.2	9
6.7.2.1	15	9.5.2.1	0	2.10.11.2	9
6.8.2.1	10	9.6.2.1	0	3.3.11.2	1
6.9.2.1	0	9.7.2.1	9	3.4.11.2	7
6.10.2.1	0	9.8.2.1	15	3.5.11.2	9
7.1.2.1	0	9.9.2.1	0	3.6.11.2	9
7.2.2.1	0	9.10.2.1	15	3.7.11.2	9
7.3.2.1	3	10.1.2.1	0	3.8.11.2	9
7.4.2.1	15	10.2.2.1	0	3.9.11.2	9
7.5.2.1	15	10.3.2.1	0	3.10.11.2	6
7.6.2.1	15	10.4.2.1	0	4.3.11.2	7
7.7.2.1	15	10.5.2.1	0	4.4.11.2	9
7.8.2.1	3	10.6.2.1	0	4.5.11.2	9
7.9.2.1	9	10.7.2.1	3	4.6.11.2	9
7.10.2.1	3	10.8.2.1	15	4.7.11.2	9
8.1.2.1	0	10.9.2.1	15	4.8.11.2	9
8.2.2.1	0	10.10.2.1	15	5.1.11.2	0
8.3.2.1	1			5.2.11.2	1
8.4.2.1	3			5.3.11.2	9
8.5.2.1	10			5.4.11.2	9
8.6.2.1	10	1.6.11.2	6	5.7.11.2	9
8.7.2.1	5	1.7.11.2	9	5.8.11.2	9
8.8.2.1	15	1.8.11.2	9	5.9.11.2	1

6.2.11.2 1	10.7.11.2 6	4.7.12.2 11
6.3.11.2 9	10.8.11.2 9	4.8.12.2 11
6.4.11.2 9	10.9.11.2 9	5.1.12.2 0
6.7.11.2 9	10.10.11.2 9	5.2.12.2 1
6.8.11.2 9		5.3.12.2 11
6.9.11.2 0		5.4.12.2 11
7.3.11.2 7	1.6.12.2 8	5.7.12.2 11
7.4.11.2 9	1.7.12.2 11	5.8.12.2 11
7.5.11.2 9	1.8.12.2 11	5.9.12.2 1
7.6.11.2 9	1.9.12.2 11	6.2.12.2 1
7.7.11.2 9	1.10.12.2 8	6.3.12.2 11
7.8.11.2 6	2.5.12.2 1	6.4.12.2 11
7.9.11.2 9	2.6.12.2 11	6.7.12.2 11
7.10.11.2 6	2.7.12.2 11	6.8.12.2 11
8.3.11.2 1	2.9.12.2 11	6.9.12.2 1
8.4.11.2 7	2.10.12.2 11	7.3.12.2 8
8.5.11.2 9	3.3.12.2 1	7.4.12.2 11
8.6.11.2 9	3.4.12.2 8	7.5.12.2 11
8.7.11.2 9	3.5.12.2 11	7.6.12.2 11
8.8.11.2 9	3.6.12.2 11	7.7.12.2 11
8.9.11.2 9	3.7.12.2 11	7.8.12.2 8
8.10.11.2 9	3.8.12.2 11	7.9.12.2 11
9.5.11.2 1	3.9.12.2 11	7.10.12.2 8
9.6.11.2 1	3.10.12.2 8	8.3.12.2 1
9.7.11.2 9	4.3.12.2 8	8.4.12.2 8
9.8.11.2 9	4.4.12.2 11	8.5.12.2 11
9.9.11.2 0	4.5.12.2 11	8.6.12.2 11
9.10.11.2 9	4.6.12.2 11	8.7.12.2 11

8.8.12.2	11	2.5.10.3	1	5.3.10.3	10
8.9.12.2	11	2.6.10.3	10	5.4.10.3	10
8.10.12.2	11	2.7.10.3	10	5.7.10.3	10
9.5.12.2	1	2.8.10.3	0	5.8.10.3	10
9.6.12.2	1	2.9.10.3	10	5.9.10.3	1
9.7.12.2	11	2.10.10.3	10	5.10.10.3	0
9.8.12.2	11	3.1.10.3	0	6.1.10.3	0
9.9.12.2	0	3.2.10.3	0	6.2.10.3	1
9.10.12.2	11	3.3.10.3	1	6.3.10.3	10
10.7.12.2	8	3.4.10.3	7	6.4.10.3	10
10.8.12.2	11	3.5.10.3	10	6.7.10.3	10
10.9.12.2	11	3.6.10.3	10	6.8.10.3	10
10.10.12.2	11	3.7.10.3	10	6.9.10.3	1
		3.8.10.3	10	6.10.10.3	0
1.1.10.3	0	3.9.10.3	10	7.1.10.3	0
1.2.10.3	0	3.10.10.3	7	7.2.10.3	0
1.3.10.3	0	4.1.10.3	0	7.3.10.3	7
1.4.10.3	0	4.2.10.3	0	7.4.10.3	10
1.5.10.3	0	4.3.10.3	7	7.5.10.3	10
1.6.10.3	7	4.4.10.3	10	7.6.10.3	10
1.7.10.3	10	4.5.10.3	10	7.7.10.3	10
1.8.10.3	10	4.6.10.3	10	7.8.10.3	7
1.9.10.3	10	4.7.10.3	10	7.9.10.3	10
1.10.10.3	7	4.8.10.3	10	7.10.10.3	7
2.1.10.3	0	4.9.10.3	0	8.1.10.3	0
2.2.10.3	0	4.10.10.3	0	8.2.10.3	0
2.3.10.3	0	5.1.10.3	0	8.3.10.3	1
2.4.10.3	0	5.2.10.3	1	8.4.10.3	7

8.5.10.3	10	9.4.10.3	0	10.3.10.3	0
8.6.10.3	10	9.5.10.3	1	10.4.10.3	0
8.7.10.3	10	9.6.10.3	1	10.5.10.3	0
8.8.10.3	10	9.7.10.3	10	10.6.10.3	0
8.9.10.3	10	9.8.10.3	10	10.7.10.3	7
8.10.10.3	10	9.9.10.3	0	10.8.10.3	10
9.1.10.3	0	9.10.10.3	10	10.9.10.3	10
9.2.10.3	0	10.1.10.3	0	10.10.10.3	10
9.3.10.3	0	10.2.10.3	0	/;	

VARIABLE TAC,TRISK;

BINARY VARIABLE

$Y(I,J,E,T)$ EXISTENCIA DE LOS EQUIPOS E EN EL TIEMPO T

$Z(I,J,E,I1,J1,E1,T)$ VARIABLE BINARIA ASOCIADA A LA EXISTENCIA DE LA INTERCONEXION ENTRE LAS UNIDADES;

POSITIVE VARIABLES

$ERisk(E,T)$ RIESGO DE INSTALACION DE LA UNIDAD

$ExCost(E,T)$ COSTO DE INSTALACION DE LA UNIDAD

$DERisk(I,J,E,T)$ VARIABLE SEGREGADA RIESGO

$DExCost(I,J,E,T)$ VARIABLE SEGREGADA DEL COSTO DE EXISTENCIA

$IntCostt(E,E1,T)$ COSTO DE INTERCONEXION ENTRE NUEVAS UNIDADES

$DIntCostt(I,J,E,I1,J1,E1,T)$ VARIABLE SEGREGADA DEL COSTO DE INTERCONEXION;

EQUATIONS

OBJ1 FUNCION OBJETIVO COSTO

OBJ2 FUNCION OBJETIVO RIESGO

$E111(E,T)$ ECUACION PARA EL CALCULO DEL RIESGO DE INSTALACION EN TERMINOS DE LA VAARIABLE SEGREGADA

$E2(E,T)$ ECUACION PARA EL CALCULO DEL COSTO DE INSTALACION EN TERMINOS DE LA VARIABLE SEGREGADA

E4(I,J,E,T)	ECUACION PARA EL CALCULO DE LA VARIABLE SEGREGADA RIESGO
E5(I,J,E,T)	ECUACION PARA EL CALCULO DE LA VARIABLE SEGREGADA COSTO DE INSTALACION
E8(E,E1,T)	ECUACION PARA EL CALCULO DE EL COSTO DE INTERCONEXION ENTRE NUEVAS UNIDADES EN FUNCION DE VARIABLES SEGREGADAS
E10(I,J,E,I1,J1,E1,T)	ECUACION PARA EL CALCULO DE LA VARIABLE SEGREGADA COSTO DE INTERCONEXION ENTRE NUEVAS UNIDADES
R1(E,T)	RESTRICCION PARA ACTIVAR LA VARIABLE Y ASOCIADA A LA EXISTENCIA DE LAS UNIDADES EN EL TIEMPO T
R3(I,J,E,I1,J1,E1,T)	RESTRICCION PARA LA ACTIVACION DE LA VARIABLE BINARIA Z
R32(I,J)	RESTRICCION PARA EVITAR SOBREPOSICION EN LA INTERCONEXION ENTRE LAS UNIDADES
R9(E,E1,T)	RESTRICCION ASOCIADA A LA INTERCONEXION ENTRE LOS EQUIPOS NUEVOS;
OBJ1..	$TAC=E=SUM((E,T),ExCost(E,T))+SUM((E,E1,T)\$(ORD(E) LT ORD(E1)),IntCostt(E,E1,T));$
OBJ2..	$TRISK=E=SUM((E,T),ERisk(E,T));$
E111(E,T)..	$ERisk(E,T)=E=SUM((I,J),DERisk(I,J,E,T));$
E2(E,T)..	$ExCost(E,T)=E=SUM((I,J),DExCost(I,J,E,T));$
E4(I,J,E,T)..	$DERisk(I,J,E,T)=E=UER(I,J,E,T)*Y(I,J,E,T);$
E5(I,J,E,T)..	$DExCost(I,J,E,T)=E=UE(I,J,E)*Y(I,J,E,T)*S(T);$
E8(E,E1,T)\\$(ORD(E)LT	ORD(E1))..
IntCostt(E,E1,T)=E=SUM((J1,I1,J,I),DIntCostt(I,J,E,I1,J1,E1,T));	
E10(I,J,E,I1,J1,E1,T)\\$(ORD(E)	LT
DIntCostt(I,J,E,I1,J1,E1,T)=E=UII(I,J,E,I1,J1,E1,T)*Z(I,J,E,I1,J1,E1,T)*S(T);	ORD(E1))..

* LA RESTRICCION INDICA QUE PUEDO FIJAR LA EXISTENCIA DE LA UNIDAD E EN EL TIEMPO T SIENDO LA UNICA VARIABLE LAS COORDENADAS DONDE SERA UBICADA

$$R1(E,T).. \quad SUM((I,J), Y(I,J,E,T))=E=UNIT(E,T);$$

*RESTRICCION PARA LA ACTIVACION DE LA VARIABLE BINARIA Z ENTRE LAS UNIDADES E Y E1

$$R3(I,J,E,I1,J1,E1,T)\$((ORD(I) NE ORD(I1))AND(ORD(J) NE ORD(J1))AND(ORD(E) NE ORD(E1)) AND (ORD(E) LT ORD(E1)))..$$

$$2-Y(I,J,E,T)-Y(I1,J1,E1,T)+Z(I,J,E,I1,J1,E1,T)=G=1;$$

* RESTRICCION PARA EVITAR SOBREPOSICION ENTRE LAS UNIDADES E EN EL TIEMPO T

$$R32(I,J).. \quad \text{SUM}((E,T),Y(I,J,E,T))=L=1;$$

*EXISTENCIA DE LA VARIABLE BINARIA Z EN EL TIEMPO T , ENTRE LAS UNIDADES E Y E1

$$R9(E,E1,T)\$(\text{ORD}(E) \text{ LT } \text{ORD}(E1)) .. \quad \text{SUM}((I,J,I1,J1),Z(I,J,E,I1,J1,E1,T))=E=1;$$

*UNIDADES E YA EXISTENTES AL TIEMPO T

$$Y.FX('5','5','5','1')=1;$$

$$Y.FX('5','6','6','1')=1;$$

$$Y.FX('6','5','7','1')=1;$$

$$Y.FX('6','6','8','1')=1;$$

$$Y.FX('2','8','9','1')=1;$$

$$Y.FX('9','9','4','1')=1;$$

$$Y.FX('5','9','3','1')=1;$$

MODEL MULTIPLESEQUIPOS/ALL/;

SOLVE MULTIPLESEQUIPOS USING MIP MINIMIZING TAC;

*SOLVE MULTIPLESEQUIPOS USING MIP MINIMIZING TRISK;

*TRISK.FX=7;

PARAMETERS

TOTALCOST TOTAL ANNUAL COST

LOCATIONCOST LOCATION COST

INTERCOST INTERCONNECTION COST;

$$\text{LOCATIONCOST}=\text{SUM}((E,T),\text{ExCost.L}(E,T));$$

$$\text{INTERCOST}=\text{SUM}((E,E1,T)\$(\text{ORD}(E) \text{ LT } \text{ORD}(E1)),\text{IntCost.L}(E,E1,T));$$

$$\text{TOTALCOST}=\text{LOCATIONCOST}+ \text{INTERCOST};$$

DISPLAY LOCATIONCOST,INTERCOST,TOTALCOST;