

**CONFIGURACIÓN FÍSICA DE UNA PLANTA DE PRODUCTOS QUÍMICOS
A PARTIR DE ALGORITMOS GENÉTICOS**

LEILA NAYIBE RAMÍREZ

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
ÁREA PRODUCCIÓN
BOGOTÁ, D.C.**

2006

**CONFIGURACIÓN FÍSICA DE UNA PLANTA DE PRODUCTOS QUÍMICOS
A PARTIR DE ALGORITMOS GENÉTICOS**

LEILA NAYIBE RAMÍREZ CASTAÑEDA



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAGÍSTER DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
ÁREA PRODUCCIÓN
BOGOTÁ, D.C.**

2006

**CONFIGURACIÓN DE UNA PLANTA DE PRODUCTOS QUÍMICOS
A PARTIR DE ALGORITMOS GENÉTICOS**

LEILA NAYIBE RAMÍREZ CASTAÑEDA

**Monografía para optar al título de
Magíster en Ingeniería Industrial**

**Director
José Fidel Torres
Ingeniero Eléctrico**

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
ÁREA PRODUCCIÓN**

2006

Nota de aceptación

Jurado

Jurado

José Fidel Torres
Asesor de la investigación

Bogotá, 26 de mayo de 2006

*“A Dios por permitirme cumplir mis sueños y hacerlos realidad,
con la ayuda valiosa e incondicional de mi esposo e hijos
que amo con todo el corazón”*

AGRADECIMIENTOS

La autora agradece de manera especial a:

José Fidel Torres, por su dedicación en el desarrollo de esta investigación depositando su confianza, en cada una de las tareas que me propuso para su progreso.

Productos Químicos Panamericanos por darme la oportunidad de poder solucionar un problema de alta envergadura dentro de la planeación de prioridades dándole la importancia a través del tiempo y recursos que destino para que esta investigación tuviese una aplicación real.

Ingeniero Hernando Espinosa por su constante colaboración y sus conocimientos, que fueron importantes, durante cada una de las decisiones de mejoramiento que se tuvieron en cuenta para obtener un excelente resultado.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN.....	14
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	16
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	18
1.3 OBJETIVO GENERAL.....	19
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
1.3 METODOLOGÍA.....	20
2. MARCO TEÓRICO.....	23
2.1 INTRODUCCIÓN.....	23
2.2 TIPO DE ALGORITMOS PARA DISTRIBUCIÓN EN PLANTA.....	26
2.3 ALGORITMO GENÉTICO.....	29
2.4 FORMULACIÓN GENERAL DEL MODELO DE DISTRIBUCIÓN DE PLANTA.....	31
3. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA PARA ALGORITMO GENÉTICO UTILIZADO PARA EL ESTUDIO DE CASO.....	37
3.1 ESTRUCTURA GENÉTICA PARA EL MODELO DE DISTRIBUCIÓN DE PLANTA.....	37
4. IMPLEMENTACIÓN DE LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL.....	42
___AL ESTUDIO DE CASO.....	42
4.1 DATOS DE ENTRADA.....	42
4.1.1. Representación de los departamentos.....	42
4.1.2 Estructura genética inicial.....	45
4.1.4 Matrices de flujos.....	47
4.1.4.1 Ejemplo de obtención de datos para Matrices de flujos.....	48
4.1.5 Matrices de costos.....	54
4.1.5.1 Ejemplo de obtención de los datos para la matriz de costos.....	58

4.2 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO	59
4.3 DISEÑO DE EXPERIMENTOS	61
4.3.1 Modelo del diseño de experimentos	63
4.3.2 Hipótesis por probar	64
4.3.3 Criterio de rechazo	64
4.3.4 Datos para el análisis de varianza	65
4.3.5 Resultados obtenidos	67
4.3.6 Idoneidad del modelo	70
4.3.7 Parámetros recomendados por el análisis de variancia	74
4.4 DISTRIBUCIÓN DE PLANTA FINAL	76
4.5 VALIDACIÓN DEL DISEÑO	82
CONCLUSIONES	84
BIBLIOGRAFÍA	87

LISTADO DE TABLAS

pág.

Tabla 1	Representación de los departamentos para sulfatos	43
Tabla 2	Representación de departamentos para PAC	43
Tabla 3	Representación de departamentos para detergentes y limpiabordes	44
Tabla 4	Representación para los departamentos para silicato líquido.....	44
Tabla 5	Representación usada para metasilicato	44
Tabla 6	Representación usada para el proceso de silicato de sodio sólido	45
Tabla 7	Densidad de materiales utilizado para el cálculo de flujos para sulfatos	51
Tabla 8	Planeación de la producción para la planta de sulfatos.....	56
Tabla 9	Costos de transporte totales para el proceso de sulfato B sólido.....	56
Tabla 10	Matriz de distancias para la planta de producción de sulfatos	57
Tabla 11	Factores y niveles usados en el diseño de experimentos	63
Tabla 12	Diseño de factorial 3^4 para la planta de sulfatos.....	66
Tabla 13	ANOVA para la planta de sulfatos.....	67
Tabla 14	ANOVA para el producto de PAC.....	68
Tabla 15	ANOVA obtenido para el producto detergentes y limpiabordes	69
Tabla 16	Datos optimizados por el software SAS para sulfatos	75
Tabla 17	Resultados obtenidos para las configuraciones en planta.....	79
Tabla 19	Parámetros recomendados que minimizan la función de carga.....	92
Tabla 20	Parámetros recomendados sin transformación.....	97
Tabla 21	ANOVA para detergentes con la transformación recomendada	98
Tabla 22	Parámetros recomendados para minimizar la carga con los datos transformados.....	99
Tabla 23	Matriz de costos para el producto de PAC.....	107
Tabla 24	Matriz de flujos para el producto de PAC	107
Tabla 25	Matriz de flujos para el producto de detergentes y limpiabordes	108
Tabla 26	Matriz de costos para el producto detergentes y limpiabordes	108
Tabla 27	Matriz de flujos para silicato de sodio líquido	109
Tabla 28	Matriz de costos para silicato de sodio líquido.....	109
Tabla 29	Matriz de flujos para el producto de silicato de sodio sólido.....	110
Tabla 30	Matriz de costos para el producto silicato de sodio sólido	110
Tabla 31	Matriz de flujos para el producto de metasilicato.....	111

Tabla 32 Matriz de costos para el producto de metasilicato.....	111
Tabla 33 Matriz de flujo para sulfato de aluminio B sólido.....	112
Tabla 34 Matriz de flujo para sulfato A líquido.....	113
Tabla 35 Matriz de flujo para sulfato B líquido.....	113
Tabla 36 Matriz de costos para sulfato B sólido.....	114
Tabla 37 Matriz de costos para sulfato A líquido.....	114
Tabla 38 Matriz de costos para sulfato B líquido.....	114
Tabla 39 Matriz de distancias para PAC.....	115
Tabla 40 Matriz de distancias para detergentes y limpiabordes.....	115
Tabla 41 Matriz de distancias para silicato de sodio líquido.....	116
Tabla 42 Matriz de distancias para silicato de sodio sólido.....	116
Tabla 43 Matriz de distancias para metasilicato.....	117
Tabla 44 Matriz de flujos para todos los productos dado en Ton/día.....	118
Tabla 45 Matriz de costos para todos los productos dado en \$/ton metro.....	118

LISTADO DE FIGURAS

	pág.
Figura 1 Distribución de planta de las estaciones de trabajo A-K.....	40
Figura 2 Estructura del cromosoma inicial para la planta de sulfatos.....	46
Figura 3 Tiempos de proceso de producción de sulfato B sólido.....	48
Figura 4 Tiempos de proceso para la producción de sulfato B sólido, B Líquido y A Líquido.....	54
Figura 5 Grafica residuos vs. γ para planta de sulfatos.....	70
Figura 6 Gráfica de probabilidad normal de los residuos para la planta de sulfato	71
Figura 7 Gráfica de residuos contra la corrida para la planta de sulfatos.....	72
Figura 8 Gráfica de presencia de curvatura en el modelo de diseño factorial para la planta de sulfatos.....	73
Figura 9 Gráfica de recomendaciones para transformación de la variable respuesta para la planta de sulfatos.....	73
Figura 10 Gráfica de predicción de parámetros que optimizan la función de carga para la planta de sulfatos.....	74
Figura 11 Distribución de planta sulfato final para un área rectangular de 150m X 25m.....	76
Figura 12 Distribución de planta sulfato final para un área cuadrada de 62m X 62m.....	78
Figura 13 Distribución en planta final para todos los productos para un área de 70m X 70m (2 franjas).....	80
Figura 14 Gráfica de probabilidad normal de los residuos.....	90
Figura 15 Gráfica de residuos contra valores ajustados.....	90
Figura 16 Gráfica de residuos contra corridas.....	91
Figura 17 Comportamiento de cada factor frente a la función de carga.....	92
Figura 18 Distribución recomendada para el producto polidoruro de aluminio para un área disponible de 18m X 20m.....	93
Figura 19 Gráfica de probabilidad normal de los residuos.....	94
Figura 20 Gráfica de residuos contra valores ajustados.....	95
Figura 21 Gráfica de residuos contra corridas.....	95
Figura 22 Recomendación del software frente a la transformación de los datos....	96
Figura 23 Gráfica comportamiento de cada factor frente a la función de carga....	96

Figura 24 Distribución en planta para el producto de detergentes y limpiabordes para un área de 29m X 10m (2 franjas).....	100
Figura 25 Distribución para detergentes y limpiabordes para un área de 17m X 17m (2 franjas).....	101
Figura 26 Distribución en planta para detergentes y limpiabordes para un área de 29m X 10m (4 franjas).....	102
Figura 27 Distribución en planta para detergentes y limpiabordes para un área de 17m X 17m (4 franjas).....	103
Figura 28 Distribución final para el producto silicato líquido para un área de 22m X 22m (2 franjas).....	104
Figura 29 Distribución en planta para silicato de sodio sólido para un área de 44m X 44m (2 franjas).....	105
Figura 30 Distribución en planta para metasilicato en un área de 40m X 40m (2 franjas).....	106
Figura 31 Diseño de planta validada frente a los procesos de PQP.....	119

LISTADO DE ANEXOS

	pág.
Anexo 1 Idoneidad del modelo PAC	90
Anexo 2 Idoneidad del modelo PAC	91
Anexo 3 Parámetros recomendados PAC	92
Anexo 4 Planta final PAC	93
Anexo 5 Idoneidad del modelo para detergentes y limpiabordes	94
Anexo 6 Idoneidad del modelo detergentes y limpiabordes	95
Anexo 7 Parámetros recomendados para detergentes y limpiabordes	96
Anexo 8 Parámetros que minimizan la respuesta_detergentes y limpiabordes	97
Anexo 9 Resultados obtenidos con la transformación detergentes y limpiabordes	98
Anexo 10 Parámetros recomendados con transformación detergentes	99
Anexo 11 Distribución final en planta detergentes y limpiabordes	100
Anexo 12 Distribución final de planta detergentes y limpiabordes	101
Anexo 13 Distribución en planta final para detergentes y limpiabordes	102
Anexo 14 Distribución en planta final para detergentes y limpiabordes	103
Anexo 15 Distribución final en planta para el producto silicato líquido	104
Anexo 16 Distribución final en planta para el producto silicato_de sodio sólido	105
Anexo 17 Distribución final para el producto metasilicato	106
Anexo 18 Matrices de flujos y costos para PAC	107
Anexo 19 Matrices de flujo y costos para detergentes y limpiabordes	108
Anexo 20 Matrices de flujo y costos para el producto de_silicato líquido	109
Anexo 21 Matriz de flujos y costos para el producto silicato_de sodio sólido	110
Anexo 22 Matrices de flujo y costos para producto de metasilicato	111
Anexo 23 Matrices de flujo para los productos de sulfatos	112
Anexo 24 Matrices de costos para los productos de sulfatos	114
Anexo 25 Matrices de distancias	115
Anexo 26 Matriz de flujo planta general	118
Anexo 27 Diseño de planta propuesto	119

INTRODUCCIÓN

La optimización de los procesos en las industrias, ha sido de gran interés para los ingenieros e investigadores durante muchos años. En relación con el tema, Tompkins (1996), anota que anualmente el 8% del Producto Nacional Bruto (PNB), de Estados Unidos se gasta en el diseño de nuevas configuraciones de planta. Ahora bien, las configuraciones actuales de plantas industriales pueden generar costos operacionales desde el 20 hasta más o menos el 50%, en cuanto el manejo de los materiales en todas en las actividades.

El diseño de las plantas industriales se relaciona directamente con el sistema que se utiliza en el manejo de materiales, las asignaciones de ruta de cada proceso y los planes de producción. De la correcta coordinación de este conjunto, depende una producción más competitiva.

En la literatura técnica, se puede consultar varias metodologías para resolver problemas sobre el diseño de una planta. Algunas de ellas, pueden considerar el volumen, la variedad y la cantidad de los productos que elabora. En tal sentido, el objetivo del presente estudio es evaluar la configuración física actual de una planta

industrial que elabora productos químicos, teniendo en cuenta los conceptos propuestos por el modelo de múltiples criterios de Islier (1998). Que se implementa con la metaheurística de algoritmos genéticos, para generar soluciones factibles que propongan procedimientos que permitan determinar la mejor alternativa para ubicar los espacios industriales.

Esta investigación se enfocó en el estudio de un caso real de configuración de planta, y para presentar una nueva propuesta de diseño de la planta de Productos Químicos Panamericanos, tuvo en cuenta sus datos reales actuales.

El estudio consta de 4 partes: La primera, presenta la situación actual de Productos Químicos Panamericanos e incluye la justificación del proyecto, el objetivo general, los objetivos específicos y la metodología que se utilizó en el desarrollo de la investigación. En la segunda, se plantea el marco teórico que sirvió de referencia para los casos de configuración en planta y se describe el algoritmo genético y la formulación general del modelo. En la tercera, se desarrolla la implementación de la herramienta computacional al problema, y a la vez, se muestran los parámetros óptimos de corrida para obtener la mejor solución, mediante el diseño de experimentos. En la cuarta, se relacionan en detalle, las soluciones obtenidas y se recomienda la distribución de planta final, para cada producto de la empresa, así como una distribución general en planta. Por último, se incluyen las conclusiones y recomendaciones, teniendo en cuenta la validación de los nuevos diseños obtenidos frente a los procesos operacionales de la Compañía.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Para comprobar la aplicabilidad del modelo y su eficiencia, fue necesario tomar los datos reales de la planta de **Productos Químicos Panamericanos S.A. (PQP)**, compañía dedicada a la fabricación y comercialización de productos químicos y bienes de consumo, ubicada en la Carrera 4 18-30 de Tocancipá, Autopista Norte, km. 41. Lo primero que se debe considerar es la inadecuada localización de la planta, pues por encontrarse en el perímetro urbano del municipio, está generando diversos problemas ambientales sobre los habitantes de la localidad, por lo cual, el Alcalde del Municipio ha intentado su desalojo, invocando las políticas pertinentes. Para mitigar un tanto el problema, en especial en lo relacionado con la contaminación ambiental, PQP se ha visto en la necesidad de tomar medidas tendientes a su reubicación, teniendo en consideración, la optimización de su diseño actual de planta. Es decir, a partir de un nuevo diseño en planta, busca satisfacer las necesidades presentes y futuras, en relación con las condiciones operacionales y productivas.

Dentro de las condiciones del escenario descrito, es de vital importancia conocer la clase de productos que fabrica PQP. En la actualidad, la Empresa produce y comercializa más de 45 productos químicos con destino al mercado nacional e internacional que se emplean en diferentes actividades industriales, tales como

tratamiento de aguas para potabilización industrial y residual, agricultura, detergentes, soldaduras, electrónica, cerámica, industria petrolera, farmacéutica, galvanoplastia, cuero, química, pulpa, papel y alimentación animal, por mencionar tan sólo las principales.

En la actualidad, PQP cuenta con una distribución en planta por procesos, discriminada en la siguiente forma: - Sulfatos. En esta planta se produce sulfato B sólido, sulfato A líquido y sulfato B líquido. - Detergentes y limpiabordes. En esta planta tiene lugar un proceso de mezcla y no un proceso químico, pues sólo se emplean productos químicos base para detergentes. - Policloruro de aluminio (PAC). En esta planta, se produce el policloruro a partir del aluminio y además, se investigan nuevas líneas que puedan producirse a partir de los recursos que la planta dispone en la actualidad. – Silicatos. En esta planta se produce silicato de potasio líquido con las siguientes referencias: silicato K40, silicato K47, silicato de potasio sólido y silicato de sodio líquido en las referencias:

SN	Silicato P
SA2.1	Silicato S
SA2.1 + SN	Silicato F
SN	Silicato P45
SA2.35	Silicato 2.35L

así como el silicato de sodio sólido. Por último, - Metasilicatos. En esta planta, se produce metasilicato de sodio en piedra y metasilicato de sodio.

Dada la complejidad de la planta, en esta investigación sólo se trataron los productos de mayor relevancia en la Empresa, y se tuvo en cuenta, la demanda en volumen de toneladas anuales.

1.2 JUSTIFICACIÓN

De acuerdo con la situación actual de la empresa PQP, fue necesario plantear una distribución física adecuada y generar un nuevo diseño de configuración en planta, teniendo en cuenta los parámetros recomendados en la literatura correspondiente, dentro de los cuales, se puede nombrar la minimización de los costos de transporte de materiales desde y hacia cada dependencia, maximizar el grado de compactación de las áreas y minimizar la diferencia entre las áreas demandadas y las disponibles. Al obtener soluciones bajo estas condiciones, es posible garantizar que PQP logre líneas de producción más eficientes y competitivas, además de obtener mayor flexibilidad en la disposición de las materias primas para cada proceso productivo y un almacenamiento apropiado de sus productos terminados, con miras a satisfacer a la diversidad de clientes.

1.3 OBJETIVO GENERAL

Solucionar el problema de configuración en planta, para optimizar la situación actual de la empresa de Productos Químicos Panamericanos, a partir de la metaheurística de algoritmo genético. Para lograr una solución factible y de excelente calidad al problema de ubicación de los departamentos, se utilizó la metodología de diseño de experimentos que proporcionó los parámetros para el GA que minimizó la función objetivo en forma adecuada y generó configuraciones en planta más eficientes, que se evaluaron frente a los procesos productivos de la Compañía.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtener la información para desarrollar el modelo
- Validar la información obtenida para ingresarla al modelo
- Adaptar el modelo de GA propuesto en la tesis de Maestría de Diana García (2001), frente a las necesidades particulares de PQP
- Ingresar los datos de entrada al programa en VB
- Realizar un diseño de experimentos que permita conocer cuál factor tiene mayor efecto sobre la respuesta

- Seleccionar los factores que tienen mayor relevancia en el desempeño de la función objetivo
- Proponer un diseño con la mejor solución obtenida
- Validar el diseño frente a los procesos lógicos que efectúa la empresa
- Construir un diseño final
- Hacer recomendaciones pertinentes frente a las soluciones encontradas

1.3 METODOLOGÍA

La metodología que se utilizó para realizar esta investigación, comprendió los siguientes pasos:

- Establecer los departamentos que tendrían una nueva ubicación. Para tal fin, se tuvo en cuenta que la empresa realiza 5 procesos independientes y que cada uno de ellos, dispone de recursos totalmente diferentes. Estos procesos y sus correspondientes productos son:
 1. Sulfatos
 2. Metasilicato
 3. Silicatos

4. Base de detergentes

5. PAC

- Seleccionar las líneas de productos objeto de este estudio y que generen la mayor utilidad a la compañía
- Determinar las fuentes de donde obtener los datos para ingresar al modelo (estadísticas, diagrama de flujo de procesos y entrevistas con los expertos de cada proceso)
- Recolectar la información de entrada para el modelo de distribución en planta (matriz de flujos, matriz de costos y distancias).
- Definir una metodología para calcular los costos de transporte para el modelo.
- Medir las áreas actuales disponibles para cada departamento.
- Validar el modelo frente a las necesidades de PQP
- Ingresar los datos
- Seleccionar los factores y determinar a qué niveles se van estudiar.
- Realizar un diseño de experimentos, utilizando tres productos
- Concluir los factores que influyen sobre la variable respuesta observada. (función de carga)
- Correr el algoritmo sobre los parámetros escogidos para cada planta
- Escoger los mejores resultados, a partir de los parámetros definidos con diferentes áreas disponibles totales (área cuadrada y área rectangular)
- Correr el algoritmo sobre los factores escogidos, para un diseño de planta general donde se incluyan todos los productos

- Validar las soluciones obtenidas y compararlas con la lógica de los procesos productivos de cada producto
- Construir el nuevo diseño frente a las opciones presentadas
- Presentar el diseño final
- Plantear las conclusiones y recomendaciones sobre el diseño final.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 INTRODUCCIÓN

Debido a la gran inversión económica que demanda, el diseño de facilidades es un tema trascendental que ha tomado gran importancia en los últimos tiempos, debido a que la industria se esfuerza cada vez más por ser eficiente y eficaz Tompkins (1997). Para los fabricantes, el manejo de materiales se incluye entre el 20 y el 50% de los gastos generados por la producción total. Un diseño apropiado de facilidades puede lograr reducir estos costos por lo menos, entre un 10 hasta un 30% (Meller y Gau, 1996). Tompkins (1997), escribió: “Desde 1955, cerca del 8% del PIB de Estados Unidos se usa anualmente en el diseño de nuevas facilidades. Además, las facilidades existentes deben ser modificadas con frecuencia (...) Estos problemas representan más de \$250 mil millones de dólares por año, que se atribuye al sistema de diseño de la facilidad, sistemas de manejo y localización de facilidades (...)”. El diseño de una facilidad alterada, debido a las asunciones incorrectas o formulaciones inadecuadas, por lo general, involucra de

forma considerable el costo, tiempo y ruptura de las actividades. Por otra parte, los buenos diseños pueden ignorar la parte económica y generar beneficios operacionales por un tiempo prolongado. Por lo tanto, el tiempo computacional en la búsqueda de una solución factible no es la prioridad, sino los aspectos críticos del diseño que se traducen con rapidez en la realidad física, como la minimización de costos en el manejo de los materiales. El problema de configuración en planta fue estudiado en la literatura de algoritmos genéticos, para lograr aplicaciones computacionales dóciles al momento de localizar una solución factible.

Este problema fue formalizado por Armour y Buffa (1963) , como puede describirse a continuación:

Donde R es una región rectangular, con dimensiones fijas H y W, y una selección de n departamentos para ser distribuidos, donde a_j es el área específica y las dimensiones (cuando es rectangular), son consideradas como h_j y w_j , Entonces el área total es $\sum_j a_j = A = H \times W$ (1)

Donde el flujo de material está dado por $F(j, k)$, asociado con cada departamento desde j hacia k, (j, k), el cual se relaciona con la cantidad de producto asociado a un costo unitario de transporte. Estos costos deben ser fijos entre los departamentos j y k. El objetivo es la partición de R entre n subregiones, que se representan por cada uno de los n departamentos. El área apropiada, está dada por:

$$\text{MIN } Z = \sum_{j=1}^n \sum_{\substack{k=1 \\ j \neq k}}^n F(j, k) d(j, k, \Pi) \quad (2)$$

Donde $d(j, k, \Pi)$ es la distancia (usando una medida métrica definida previamente), entre el centroide del departamento j y el centroide del departamento k , en la partición Π . La distancia centroidal es fácil de calcular cuando se trata de departamentos rectangulares, y se puede obtener en forma intuitiva, conociendo la cantidad de material que se pretende mover de centro a centro de cada departamento; esta distancia puede estimarse de forma rectilínea o euclidiana. Sin embargo, la distancia entre los centroides puede no ser muy realista en muchas aplicaciones, como por ejemplo, el transporte de material a través de los departamentos, cuando no se toma en cuenta, un pasillo dentro de una estructura razonable.

2.2 TIPO DE ALGORITMOS PARA DISTRIBUCIÓN EN PLANTA

Es necesario tener en cuenta que los algoritmos para distribución en planta se clasifican de acuerdo con el tipo de información disponible, dentro de los cuales, se nombran los siguientes:

- Datos de tipo cuantitativo
- Datos de tipo cualitativo

En distribución en planta, el objetivo principal es lograr localizar a los departamentos en forma óptima., puesto que el área de cada departamento y el costo asociado a los flujos que se generan, son estimados de acuerdo con la información que existe en la planta. De tal manera que los algoritmos que permiten solucionar estos problemas, básicamente consideran la misma información de entrada, y se clasifican de acuerdo con la función objetivo que se ha de evaluar como:

- Minimización de tiempos y distancias: que se describe con claridad en el problema clásico de QAP (Quadratic Assignment Problem).
- Maximización en cuanto a la adyacencia de los departamentos, y estos a su vez, de acuerdo con Kusiak y Heragu (1987)

Los algoritmos para el layout de la planta, pueden clasificarse en dos categorías principales:

Óptimo: tales como algoritmos *branch and bound* o de *plano de corte*.

Debido a que el problema es NP, los métodos óptimos pueden utilizarse sólo para resolver problemas pequeños que contengan hasta 15 recursos. Welgama y Gibson (1993).

Subóptimo

Dada la complejidad del problema, se han desarrollado algoritmos heurísticos para asistir a los diseñadores en el proceso de distribución de planta y tener una mayor cobertura de los problemas. Este método se puede subdividir en:

- Métodos de construcción: el proceso de construcción consta de dos fases. La primera determina el orden de selección, es decir, decide la secuencia para colocar las máquinas o estaciones de trabajo dentro del área establecida, y la segunda, la instala de acuerdo con ciertos objetivos. Wang (1991). Algunos ejemplos de este método son CORELAP Lee and Moore (1967) y ADELPH Seehof y Evans (1967). Dada su naturaleza secuencial, estos métodos requieren un menor esfuerzo computacional, pero la calidad de su solución no es tan competitiva como otros métodos.
- Métodos de mejoramiento: buscan intercambiar la localización de las máquinas o estaciones de trabajo, para aumentar la calidad de la solución. Para un gran número de departamentos, estos

métodos heurísticos resultan ser mejores que los layout óptimos y han sido recomendados ampliamente en la literatura sobre el tema. Se fundamentan en la búsqueda por valles o procesos estocásticos, para intercambiar los departamentos hasta que no haya más mejoramiento. Algunos ejemplos, son los desarrollados por Hillier (1963), y sus mejoramientos por Picone (1984). Estos procesos son la base de numerosos sistemas de mejoramiento, como CRAFT Armour y Bufa (1963), H66 Hillier y Connors (1966), FRAT Khalil (1973), y COFAD Tompkins y Reed (1976) .

- Métodos Híbridos: se combinan varios de los métodos anteriormente mencionados. Un ejemplo es el FLAC de Virgin (1994) .
- Método de Grafos Teóricos: en este caso, el layout es presentado como un grafo cuyos vértices son los departamentos y las interconexiones los costos. En este caso, se busca encontrar el dual del subgrafo máximo planar. En la literatura, Moore (1970), Robinson (1978) y Foulds (1983), han aplicado esta metodología.

Otros ejemplos de algoritmos usados para la distribución en planta, se pueden encontrar en: BLOCKPLAN, MIP (Mixed Integer Programming), LOGIC (Layout Optimization with Guillotine Induce Cuts), MULTIPLE (Multi-floor Plant Layout Evaluation), Enfriamiento Simulado (Simulated Annealing (SA)), Algoritmo Genético (Genetic Algorithm GAs), Búsqueda Tabú (Tabu Search TS).

2.3 ALGORITMO GENÉTICO

Los Algoritmos genéticos (GA), fueron desarrollados por Holland y De Jong(1957,1983), y hacen parte de una familia de heurísticas para la optimización, inspirados por procesos naturales de selección que se emplean en los sistemas biológicos. El procedimiento de GA, en lugar de generar una sucesión de soluciones candidatas en un tiempo determinado, mantiene una población de soluciones candidatas. Los rasgos primarios que distinguen la codificación de un GA, es un mecanismo de evaluación, un mecanismo de cruce, un mecanismo de mutación y un mecanismo selección. Esta codificación constituye una estructura de datos que describe una única solución factible en una representación compacta. Dada una analogía biológica, la codificación usada consiste en un cromosoma en el cual, los genes específicos describen varios aspectos del individuo que se ha de evaluar.

El mecanismo de evaluación toma la codificación de una solución individual y la compara con herramientas computacionales que obtienen el valor de la solución con respecto de la función(es) objetivo(s) por optimizar. El mecanismo de cruce es un procedimiento que genera una nueva codificación que usa a dos *padres* y las codificaciones de la población actual, como fuente de información para los *genes*. El mecanismo de mutación es un algoritmo para perturbar el código que produce una *codificación cercana*, y se usa para ayudar a mantener un conjunto de

diversos genes que permite construir nuevas soluciones. El mecanismo de selección es un procedimiento que elimina soluciones conocidas de la población y las reemplaza con nuevas soluciones. A continuación, los aspectos más importantes de la búsqueda genética:

1. La búsqueda es altamente paralela con cada miembro de la población y define diferentes y posibles direcciones para la búsqueda. En principio, la búsqueda de GA puede llevarse a cabo de forma eficaz, en un hardware masivamente paralelo.

2. La no información específica sobre la superficie de respuesta, como la pendiente o la curvatura local, necesariamente debe ser identificada. La función objetivo por lo tanto, no debe ser lisa, continua o unimodal.

3. Los algoritmos genéticos han demostrado ser muy vigorosos bajo las escenas de parámetros variantes y problemas particulares. Con tal de que las soluciones con codificaciones similares, no varíen mucho en los valores de la función objetivo, los algoritmos genéticos por lo general, encuentran las soluciones cercanas óptimas .

Los algoritmos genéticos se han aplicado a problemas de optimización de combinatoria, incluso para flujo de gas y aceite por tubería Golberg (1983,1989), job shop scheduling Davis y Storer (1985,1992), el problema del agente viajero y la clasificación de redes de comunicaciones según su tamaño Davis (1987). La técnica también ha sido aplicada a los problemas de optimización de combinatoria,

como embalaje de cajas House (1992) inventarios y distribución en planta Syswerda (1991). Mientras GA aprovecha los requerimientos de selección con los parámetros que gobiernan esa selección, como el cruce y la mutación, las investigaciones publicadas han apoyado en demanda, la efectividad del GA como una metodología que es insensible a los valores exactos de estos parámetros.

2.4 FORMULACIÓN GENERAL DEL MODELO DE DISTRIBUCIÓN DE PLANTA

Para obtener una solución al problema, se trabajó el modelo matemático desarrollado en el paper Isler A. A. (1998), por ser un recurso de alta aplicación para el escenario que se quiere optimizar. La modificación del modelo puede hacerse, de acuerdo con las características particulares de la distribución en planta para Productos Químicos Panamericanos.

De tal manera que los criterios de optimización que conforman el modelo son los siguientes:

1. Minimizar las carga de transporte
2. Maximizar el grado de compactación de las áreas de las estaciones de trabajo
3. Minimizar la diferencia entre las áreas demandadas y las disponibles para cada estación de trabajo

a. distancias entre máquinas

El cálculo de las distancias entre dos máquinas o estaciones de trabajo i y j, se basa en centroides, es decir, el centro del área. La distancia entre ellas esta determinada por:

$$d_{ij}(p) = \left(\sum_{k=1}^N |x_{ik} - x_{jk}|^p \right)^{1/p} \quad (3)$$

donde:

i, j índices de estaciones de trabajo i,= 1, 2,3.....n j= 1, 2,3.....n

k dimensión donde k= 1,2.

p determinante de la métrica usada (p=1 rectilíneo, p=2 euclidiano) donde p=1.

d_{ij} distancia entre la estación de trabajo i y la j (rectilínea)

x_{ik} coordenada del centroide de la estación de trabajo i en la dimensión k

x_{jk} coordenada del centroide de la estación de trabajo j en la dimensión k

N número de dimensiones

b. factor de carga

Al maximizar este factor que siempre estará entre 0 y 1, se reduce la carga de transporte.

A continuación, se presenta el factor de carga t ¹:

$$t = \frac{V}{\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=2}^n c_{ij} \cdot f_{ij} \cdot d_{ij}} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=2}^n f_{ij} \cdot d_{ij}}{\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=2}^n c_{ij} \cdot f_{ij} \cdot d_{ij}} \quad (4)$$

donde:

V Carga ideal (no hay costos de transporte)

i, j índices de estaciones de trabajo $i, = 1, 2, 3, \dots, n$ $j = 1, 2, 3, \dots, n$

d_{ij} distancia entre la estación de trabajo i y la j (rectilínea)

c_{ij} costo de transportar una unidad de carga por una unidad de longitud entre la estación de trabajo i y la j .

f_{ij} número de unidades de carga transportadas entre la estación de trabajo i y la j

n número de estaciones de trabajo

c grado de compactación de las estaciones de trabajo

En esta forma, la razón entre el perímetro y el área debe ser mínima, para obtener áreas de estaciones adecuadas. Para tal fin, se debe minimizar el siguiente factor de forma s :

¹ Isler A.A. A genetic algorithm approach for multiple criteria facility layout design. International Journal of production Research, Vol 36, número 6. 1998, 1549 – 1569 pp.

$$s = \frac{\sum_{k=1}^n r_k}{\sum_{p \in S_k} u_{pk}^2} = \frac{\sum_{i=1}^b \sum_{j=1}^e \sum_{k=1}^n a_{ijk}}{\sum_{i=1}^b \sum_{j=1}^e \sum_{k=1}^n a_{ijk}} \quad (5)$$

donde:

- k índice de estaciones de trabajo $i = 1, 2, 3 \dots l$
- p índice de celdas $p = 1, 2, 3 \dots P$
- i índice de filas en el plano de diseño de la planta
- j índice de columnas en el plano de diseño de la planta
- b número de filas en el plano de diseño de planta
- e número de columnas en el plano de diseño de planta
- n número de estaciones de trabajo
- r_k momento del área de la estación de trabajo
- u_{pk} distancia rectilínea del centroide de la estación de trabajo k al centroide de la celda p que está dentro de la estación de trabajo k.
- r_k momento de área de la estación de trabajo k
- S_k conjunto de celdas de la estación de trabajo k
- a_{ijk} indicador que es igual a 1, si la celda en la fila i y la columna j en el plano de diseño, están en la estación de trabajo k.
- d. diferencia entre las áreas demandadas y las disponibles para cada estación de trabajo

Las diferencias entre las áreas demandas y las asignadas se minimiza, manteniéndolas dentro de los límites predeterminados. Para minimizar estas diferencias se presenta el siguiente factor de desviación:

$$h = \frac{\sum_{k=1}^n |A_k - \sum_{i=1}^b \sum_{j=1}^e a_{ijk}|}{\sum_{i=1}^b \sum_{j=1}^e \sum_{k=1}^n a_{ijk}} \quad (6)$$

donde:

- A_k área más deseada para la estación de trabajo
- k índice de estaciones de trabajo $i= 1, 2,3....l$
- i índice de filas en el plano de diseño de la planta
- j índice de columnas en el plano de diseño de la planta
- b número de filas en el plano de diseño de planta
- e número de columnas en el plano de diseño de planta
- n número de estaciones de trabajo
- a_{ijk} indicador que es igual a 1, si la celda en la fila i y la columna j en el plano de diseño, están en la estación de trabajo k .

Unificando estos tres criterios, se tiene el siguiente modelo final con función, objetivo y restricciones:

$$\text{Max } t = \frac{\text{Factor de Carga}}{\text{Factor de Forma} \cdot \text{Factor de Desviación}} \quad (7)$$

s.a

$$\sum_{k=1}^n a_{ijk} \leq 1 \quad \text{Para todo } i \text{ y } j$$

$$A_{-k} \leq \sum_{i=1}^b \sum_{j=1}^e a_{ijk} \leq A_k \quad \text{Para todo } k$$

$$\sum_{i=1}^b \sum_{j=1}^e \sum_{k=1}^n a_{ijk} \leq e \cdot b$$

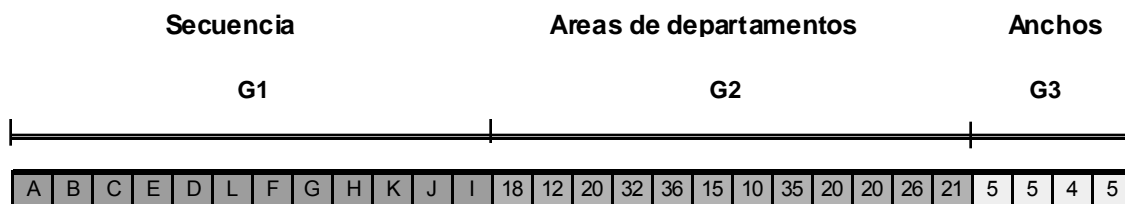
Debido a la complejidad del modelo para encontrar la solución factible, es ideal el algoritmo genético.

3. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA PARA ALGORITMO GENÉTICO UTILIZADO PARA EL ESTUDIO DE CASO

3.1 ESTRUCTURA GENÉTICA PARA EL MODELO DE DISTRIBUCIÓN DE PLANTA García (2001)

Con el objeto de aplicar el algoritmo genético a la formulación del problema para distribución de planta con la función objetivo en el modelo anteriormente descrito, es necesario tener una estructura de codificación adecuada para los individuos de la población y operadores propios, de tal manera que sean capaces de producir y mantener las soluciones factibles.

De acuerdo con Islier (1998), una posible estructura para definir el cromosoma es la siguiente:

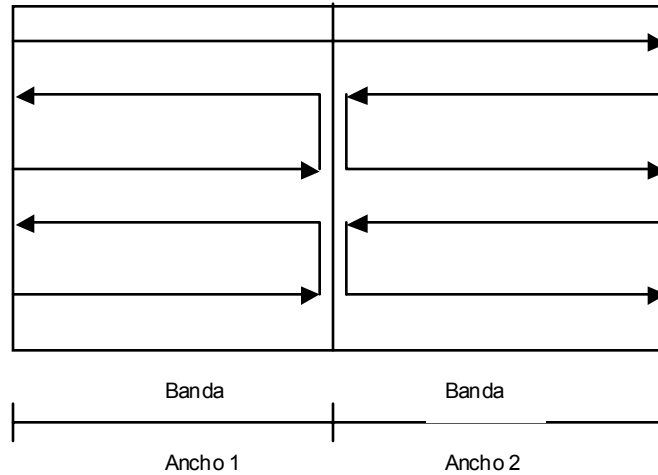


La estructura anterior está dividida en tres partes:

G1 (Secuencia): Muestra la secuencia de los departamentos. Cada una está representada por una letra.

G2 (Áreas de los Departamentos): Muestra el área de cada departamento correspondiente a la secuencia de G1, es decir, las áreas están dadas en el mismo orden del segmento G1 y en números enteros que representan el número de celdas que corresponde a cada departamento. Las áreas de los departamentos pueden variar entre sus límites inferiores y superiores.

G3 (Anchos): Representa el ancho de cada banda de la grilla completa. Para poder obtener la solución de este segmento y representar la distribución de planta resultante, se utiliza el procedimiento X-Y Oscilatorio que divide en primer lugar, todo el espacio en bandas y luego aplica una oscilación en una sola dimensión para cada una, al ubicar las áreas de las estaciones de trabajo. A continuación se muestra un diagrama para la ubicación:



Los anchos son generados en forma aleatoria, y la suma debe ser igual al ancho del área disponible de la planta

De acuerdo con la explicación anterior de cada uno de los segmentos, se puede obtener la siguiente distribución de planta, según el cromosoma que ya se mostró:

E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	H	H	H	H	H	H	H	K	K
E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	H	H	H	H	K	K	K	K	K
E	E	E	E	E	E	D	D	D	D	H	H	H	H	K	K	K	K	K
E	E	E	E	E	D	D	D	D	D	H	H	H	H	K	K	K	K	K
C	C	C	C	C	D	D	D	D	D	H	H	G	G	K	K	J	J	J
C	C	C	C	C	D	D	D	D	D	G	G	G	G	J	J	J	J	J
C	C	C	C	C	D	D	D	D	D	G	G	G	G	J	J	J	J	J
C	C	C	C	C	D	D	D	D	D	G	G	G	G	J	J	J	J	J
B	B	B	B	B	D	D	D	D	D	G	G	G	G	J	J	J	J	J
B	B	B	B	B	L	L	D	D	D	G	G	G	G	I	I	J	J	J
B	B	A	A	A	L	L	L	L	L	G	G	G	G	I	I	I	I	I
A	A	A	A	A	L	L	L	L	L	G	G	G	G	I	I	I	I	I
A	A	A	A	A	L	L	L	F	F	G	G	G	G	I	I	I	I	I
A	A	A	A	A	F	F	F	F	F	F	F	F	G	I	I	I	I	@

Figura 1 Distribución de planta de las estaciones de trabajo A-K.

Cada celda es de 1 por 1 y se adecua en metros, centímetros, pies, etc., según las dimensiones del área disponible

Se puede observar entonces, que la estructura de cada individuo de la población es factible y no viola alguna de las restricciones, tal como se explica a continuación:

$$\sum_{k=1}^n a_{ijk} \leq 1 \quad \text{Para todo } i \text{ y } j. \quad (8)$$

Esta restricción no se viola, si ninguno de los departamentos se repite en el primer segmento del cromosoma.

$$\sum_{i=1}^b \sum_{j=1}^e \sum_{k=1}^n a_{ijk} \leq e \cdot b \quad (9)$$

$$A_{-k} \leq \sum_{i=1}^b \sum_{j=1}^e a_{ijk} \leq A_k \text{ Para todo } k \text{ (10)}$$

Los valores del segundo segmento del cromosoma deben estar dentro de los límites inferiores y superiores del área para cada departamento y la suma de las áreas debe ser menor o igual al área disponible de la planta, cumpliendo la segunda y tercera restricción.

Para mantener la factibilidad de las soluciones, es necesario cumplir con las restricciones del problema durante todo el algoritmo genético. En tal sentido, se emplearon técnicas de reparación para manejar las restricciones y se hizo una evaluación de la estructura de cada segmento del cromosoma en cada generación, para toda la población y se realizaron los cambios debidos, con el fin de mantener la factibilidad de cada individuo.

4. IMPLEMENTACIÓN DE LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL AL ESTUDIO DE CASO

4.1 DATOS DE ENTRADA

Productos Químicos Panamericanos S.A., cuenta en la actualidad, con 5 unidades de negocio: Sulfatos, Polidoruro de Aluminio, Detergentes y Limpiabordes, Silicatos y Metasilicatos. Cada una de estas unidades de negocio está distribuida en un terreno de 1.1000 m², donde se elaboran los productos mencionados.

4.1.1. Representación de los departamentos. Cada una de las unidades de negocio se distribuyeron de forma independiente y al final, se mostró un diseño con la unión de todas las dependencias dispuestas en cada planta. En principio, se calculó el área disponible como una aproximación del área actual y quedó sujeta a modificaciones, debido a que el diseño es totalmente nuevo. La información correspondiente se muestra a continuación:

Tabla 1 Representación de los departamentos para sulfatos

REPRESENTACIÓN USADA	DEPARTAMENTOS	AREA(m2)
1	Almacen de materia prima	373
2	Molienda	224
3	Servicio de agua sulfato	76
4	Reacción sulfato	53
5	Decantación y lavado de gases	148
6	Almacenamiento de acido sulfurico	111
7	Cristalización	218
8	Almacenamiento de sulfato a y b	86
9	Almacenamiento de sulfato	311
10	Lodos	100
11	Molienda	92
12	Filtración	129
13	Pesaje	648
14	MP Bauxita	916
15	Cristalización	234

Tabla 2 Representación de departamentos para PAC

REPRESENTACION USADA	DEPARTAMENTOS	AREA (M2)
1	Almacenamiento de Acido Clorhidrico	38
2	Silo de preparación de acido	14
3	Reactor	25
4	Almacenamiento de Producto terminado	38
5	Deposito de materia prima	47
6	Servicio de agua	76
7	Filtración	6
8	lodos	10
9	Pesaje	92

Tabla 3 Representación de departamentos para detergentes y limpiabordes

REPRESENTACIÓN USADA	DEPARTAMENTOS	AREA (m2)
1	Almacenamiento de materia prima	80
2	Silo de almacenamiento	30
3	Empaque y pesaje	15
4	Mezcla	15
5	Empaque producto terminado	40
6	Almacén producto terminado	40
7	Pesaje	80

Tabla 4 Representación para los departamentos para silicato líquido

REPRESENTACION USADA	DEPARTAMENTOS	AREA(m2)
1	Almacenamiento de silicato de potasio	82
2	Disolvedor	80
3	Servicio de agua	78
4	Almacenamiento de producto terminado	150
5	Pesaje	90

Tabla 5 Representación usada para metasilicato

REPRESENTACIÓN USADA	DEPARTAMENTOS	AREA(m2)
1	Almacenamiento de materia prima	375
2	Mezcla	42
3	Evaporador	25
4	Cristalización	94
5	Molienda	42
6	Almacenamiento y empaque de producto terminado	313
7	Servicio de agua	78
8	Pesaje	650

Tabla 6 Representación usada para el proceso de silicato de sodio sólido

REPRESENTACION USADA	DEPARTAMENTOS	AREA (M2)
1	Almacenamiento de carbonato de sodio	93
2	Almacenamiento arena	375
3	Mezcla	72
4	Horno	313
5	Empaque	125
6	Almacenamiento de producto terminado	313
7	Pesaje	650

4.1.2 Estructura genética inicial. La estructura genética que se usó para este caso específico, se describe de la siguiente manera:

G1 (secuencia): es la representación que se usó en cada uno de los departamentos de los diferentes procesos productivos.

G2 (Área de los departamentos): esta sección describió cada una de las áreas disponibles para los departamentos, y se ordenaron de la misma forma como va la secuencia.

G3 (Anchos): los anchos en este caso, son variables porque se quiso probar diferentes tipos de diseño, debido a que no se contaba con restricciones de espacio y se aprobó que fueran considerados por el diseñador de la planta, bien como corredores de acceso o paredes. A continuación, la estructura del cromosoma inicial para la planta de sulfatos:



Figura 2 Estructura del cromosoma inicial para la planta de sulfatos

La estructura del cromosoma inicial fue diferente para cada uno de los procesos productivos de la compañía, porque las áreas disponibles y necesidades de acceso a los recursos, así lo ameritaban.

4.1.3 Áreas Dentro de los parámetros de entrada del modelo, se encuentran las áreas máximas, mínimas y deseables que se describen a continuación:

Área máxima: se estimó a partir del plano actual de la empresa y se hizo un cálculo de las áreas disponibles para cada uno de los departamentos de los procesos productivos. Las medidas en el plano, se establecieron por la escala 1:250, que implicó hacer una conversión a escala 1:1. Dentro de estas mediciones, se consideró la capacidad instalada, lo mismo que los pasillos de acceso.

Área mínima: el área mínima se calculó de acuerdo con el área máxima disponible y las especificaciones técnicas del mínimo espacio requerido para las máquinas y los espacios de acceso para los operarios.

Área deseable fue el promedio del área máxima y mínima disponible para cada una de las plantas.

4.1.3 Matrices de flujos. Los flujos se determinaron a partir de las especificaciones propias de cada proceso; sin embargo, se desarrolló una sola unidad de medición, dependiendo del producto. La primera información que se obtuvo, fueron los tiempos de proceso para cada producto, como se muestra en la Figura 3, donde se puede observar el desarrollo del proceso de producción de sulfato B Sólido, cuya duración es de 5 turnos para su elaboración. La actividad que más tiempo requiere es cristalización, ya que el tiempo de secado se hace bajo condiciones naturales y esta dura hasta dos turnos y medio. La metodología de graficación para comportamiento del tiempo versus las actividades, fue un recurso valioso para elaborar las matrices de cada producto ya que el cambio de actividad sugiere un flujo de transporte de materiales.

Para estimar las unidades de medición, por ejemplo, se nombraron así: ton/día, ton/turno y dscf/día (para emisión de gases); esta última unidad fue difícil emplearla en las demás unidades, por tratarse de un gas y la conversión de unidades requiere del conocimiento previo de formulaciones químicas, para lograr el objetivo. La obtención de la información no fue muy complicada, debido a que estos procesos han sido estandarizados, para obtener las especificaciones, como la granulometría, la concentración y otros parámetros de calidad.

- Actividades Sulfato B sólido
1. recepción de materia prima
 2. molinda y preparación de lodos
 3. reacción
 4. lavado de gases
 5. cristalización
 6. picado de piedra
 7. molinda
 8. almacenamiento y empaque

Proceso de producción sulfato B sólido

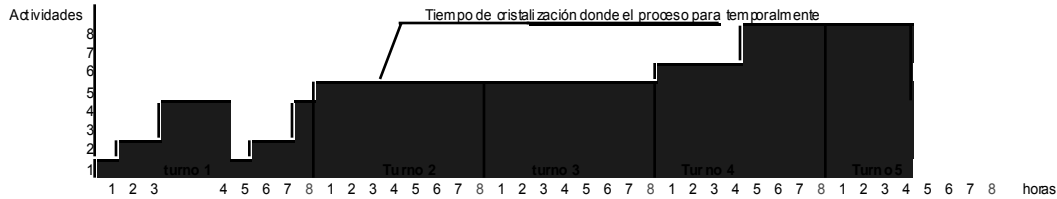


Figura 3 Tiempos de proceso de producción de sulfato B sólido

La información de flujos para cada una de las plantas que componen a Productos Químicos Panamericanos S.A., se basó en entrevistas con el ingeniero de procesos y los operarios que manejan cada actividad.

4.1.4.1 Ejemplo de obtención de datos para Matrices de flujos Antes de describir en detalle la obtención de los datos es necesario que se conozca algunas características especiales del Sulfato B sólido. Este producto cuya presentación final es en estado sólido como su nombre lo indica, es empleado en el tratamiento de aguas y es el de mayor importancia para PQP, ya que se exporta y PQP es el único productor en la zona andina, su principal cliente es el acueducto de Bogotá y su demanda depende del clima, ya que en días lluviosos los requerimientos son mayores.

Este se compone principalmente de dos tipos de arena que son la Bauxita importada en 105 toneladas y Alumina nacional en 70 toneladas se mantienen en recepción de materias primas para disponer de acuerdo a la planeación de la producción en ese momento, estas cantidades son transportadas por el proveedor y el cargador de PQP. Las cantidades estimadas para una cochada (cantidad de materiales usados para la producción de producto) se describen a continuación, de recepción de materia hacia el molino de bolas se requieren 7320 kilos de Bauxita y Alumina, un operario de forma manual deposita la cantidad en un molino de bolas a una velocidad promedio de 900 kilos por hora, esta actividad dura 3 horas, una vez se hace la molienda, se adiciona 4.32 metros cúbicos de agua a la mezcla que producen 5640 kilos, que se encuentra en una piscina de lodos, de ahí el producto es transportado por tubería al área de reacción, el flujo que se produce es de 26 toneladas, en reacción se adicionan 42 toneladas en 60 minutos de ácido sulfúrico, el ácido sulfúrico es transportado en carro tanque desde pesaje por tubería en cantidades de 35 toneladas en 3 horas (esta cantidad es la que adquiere PQP para mantener en inventario), el proceso de reacción se lleva a cabo en 90 minutos, de ahí el flujo de material sale por gravedad del silo y es transportado por una canal a los patios de cristalización en cantidad de 20500 kilos en 25 minutos, el proceso de cristalización del producto se prolonga por un tiempo promedio de 13 horas dependiendo de las condiciones climáticas, una vez se cristaliza el producto se pica la piedra que se forma, este proceso dura 2 horas, y es transportado nuevamente en el cargador, hacia una segunda molienda en cantidades estimadas de 100 kilos por minuto en esta sección, se muelen 20.5 toneladas en 8 horas de producto que finalmente son separados en dos

referencias fino y corriente, que dependen del tamaño del grano obtenido, entonces se pueden producir 240 kilos en dos horas de fino y 6 sacos de 50 kilos por minuto para la otra referencia, el transporte de la sección de la segunda molienda hacia empaque se hace a través de una banda transportadora.

Una vez se hace una descripción detallada de cada uno de los productos se llevan a las unidades escogidas por el investigador en este caso como se dijo anteriormente Ton/día. El cálculo se muestra a continuación para el flujo de material existente entre recepción de materia prima y molienda:

La primera condición para la estimación es tener en cuenta los flujos que circulan por el proceso en un día, según la figura 3 los flujos que se generan en el primer turno son los siguientes desde recepción de materia prima hacia molienda y preparación de lodos, de molienda y preparación de lodos a reacción y en el mismo turno hacia cristalización, se repite el proceso debido a que se lleva a cabo las especificaciones requeridas por producto para lograr una producción dos cochadas. El proceso de producción tomado es de 3 turnos para así obtener unidades de Ton/día; además, los flujos durante el proceso, no se mantienen en estado sólido, lo cual sugiere una nueva conversión de unidades, para lo cual fue necesario utilizar la densidad para transformar las unidades de volumen en unidades de masa, cuya información se muestra a continuación :

Producto	Densidad
Densidad A líquido	1.32 gr/cc
Densidad B líquido	1.32 gr/cc
Densidad Agua	1 gr/cc
Acido sulfurico	1.865 gr/cc
Aguas madres	1.2 gr/cc
lodos Bauxita	1.44 gr/cc

Tabla 7 Densidad de materiales utilizado para el cálculo de flujos para sulfatos

Una vez se definió las unidades para la conversión, se obtuvo que ya como se describió se requieren de especificaciones del proceso y se obtuvo que el flujo de materia prima desde el almacén de materia prima hacia la molienda es de 7320 kilos que corresponde a 14.64 ton/día donde se plantea una regla de tres:

$$\left(7320 \text{ kilos} * \frac{1 \text{ Tonelada}}{1000 \text{ kilos}} \right) * 2 \text{ cochadas} = 14.64 \text{ ton} / \text{ día}$$

El tiempo no se considero como una variable de cálculo ya que las unidades que se obtienen al usar este parámetro se distorsionan en gran medida las unidades frente a la realidad. Esta es la metodología para productos en estado sólido, para estado líquido se muestra a continuación.

Para el producto sulfato A líquido se tiene que el flujo de material desde reacción hacia almacenamiento de sulfato A y B líquido, se transportan 20 metros cúbicos de sulfato A líquido en 30 minutos entonces se estima que:

$$m = v\rho$$

Donde

m : masa

V : volumen de sulfato A líquido

P : densidad de sulfato A líquido

Entonces

$$m = 20 * 1.36 \text{ gr} / \text{cc}$$

$$= 26.4 \text{ Toneladas}$$

El flujo de transporte materiales es de 26.4 ton/día para estas facilidades.

Esta misma metodología se adoptó para los tres productos haciendo discriminación sobre su estado físico. Las unidades escogidas se dieron en ton/día para que tuvieran veracidad al compararlas con las especificaciones del proceso. Se obtuvieron diferentes unidades de medición, pero al evaluarlas, no presentaron sentido lógico frente al caso real. Es de aclarar que la planta de sulfatos produce tres productos diferentes: sulfato de sodio B sólido, sulfato de sodio A líquido y sulfato de sodio A sólido, y la planeación de la producción, depende de la demanda del producto. Es decir, de acuerdo con la demanda, se prepara la combinación de los productos en la siguiente forma:

PLANEACIÓN DE LA PRODUCCIÓN	NÚMERO DE COCHADAS	PRODUCTOS
1	2 1	sulfato B sólido sulfato B líquido
2	2 1	sulfato B sólido sulfato A líquido
3	1 1 1	sulfato B sólido sulfato A líquido sulfato B líquido

Tabla 8 Planeación de la producción para la planta de sulfatos

En la Tabla 8 se puede observar que se producen dos cochadas de sulfato B sólido y una de B líquido, dos cochadas de sulfato B sólido y una de A líquido, y una cochada de sulfato B sólido, una de B líquido y una de A líquido. Estos productos se elaboran además, de acuerdo con la capacidad instalada disponible durante los tres turnos. Dadas las condiciones de los procesos y la planeación de la producción de PQP, la investigación estimó la información de entrada, bajo el supuesto de que se cumplen las restricciones de disponibilidad de los recursos y la demanda, y entonces se producen los tres productos al mismo tiempo.

A continuación se muestra la gráfica de los tiempos de proceso para elaborar sulfato B sólido, sulfato A y B líquido en forma simultánea:

1. recepción de materia prima
2. molienda y preparación de lodos
3. reacción
4. lavado de gases
5. cristalización
6. picado de piedra
7. molienda
8. almacenamiento y empaque

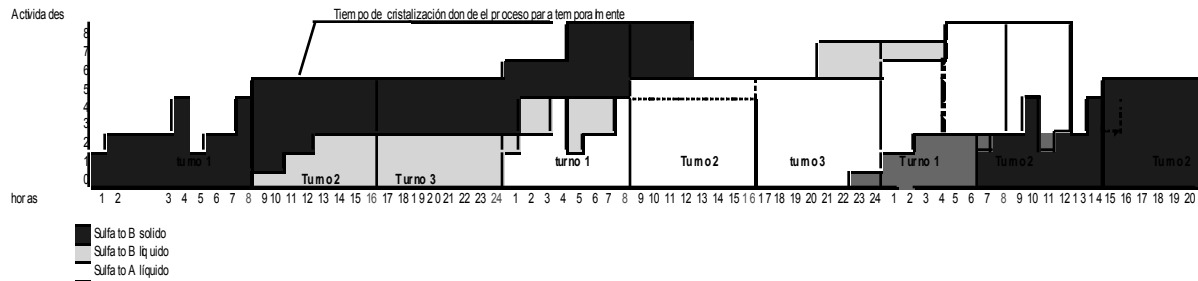


Figura 4 Tiempos de proceso para la producción de sulfato B sólido, B Líquido y A Líquido

Para otros productos, se utilizó la unidad de medición ton/turno, porque la producción no se hace las 24 horas del día, como sucede con los sulfatos. Las matrices de flujo que se obtuvieron bajo esta metodología, se muestran en los anexos.

4.1.5 Matrices de costos Los costos logísticos de transporte de materiales que se tuvieron en cuenta para el desarrollo del modelo, fueron específicos para cada producto que desarrolla la Compañía y tuvo en cuenta las siguientes variables: la mano de obra hora, considerando la clasificación de los empleados que tiene la organización; de acuerdo con el salario que perciben, hay operarios de planta, a destajo y temporales. Existen además, otros costos que tienen influencia dentro del transporte de materiales: el mantenimiento de las motobombas, la mano de obra en que incurre el mantenimiento de las motobombas y consumo de energía de las motobombas. Como se manejan volúmenes considerables, tanto de materia

prima como de producto terminado, la Compañía debe utilizar un montacargas y los costos que implican su manipulación, mantenimiento y consumo de combustible también fueron considerados. La metodología que se usó para calcular estos costos, fue en primera instancia, determinar los costos totales que son la suma de los costos que se generan anualmente en cada uno de los ítems mencionados y se obtuvieron unidades de \$/año. Después, se identificaron los recursos utilizados en cada proceso y se hizo la conversión correspondiente, de acuerdo con las unidades de flujo utilizadas para el producto, bien fuera \$/turno o \$/día. A continuación, se muestra una tabla con la información utilizada para estimar estos costos:

CONSIDERANDO 30 DIAS DE TRABAJO 24 HORAS AL DIA

RECURSO	COSTO DIA	COSTO HORA
ACPM	\$ 47.333	\$ 1.972
OPERARIO PLANTA	\$ 44.520	\$ 5.565
ELECTRICIDAD	\$ 4.584	\$ 191
mantenimiento cargadores	\$ 27.778	\$ 1.157
operario temporal	\$ 15.000	\$ 1.875
operario a destajo	\$ 3.500	\$ 10.500
Mantenimiento moto bombas	\$ 4.881	\$ 203

COSTOS DE MANTENIMIENTO DE MOTOBOMBAS			ANUAL
mantenimiento eje motor	3 meses	\$ 35.000	\$ 140.000
Rodamientos	3 meses	\$ 31.000	\$ 124.000
Inducido	5 meses	\$ 145.000	\$ 350.000
impulsor	12 meses	\$ 350.000	\$ 348.000
sello mecanico	1 mes	\$ 13.000	\$ 350.000
Embujada	12 meses	\$ 40.000	\$ 40.000
Horas hombre mantenimiento	14 horas 3 meses	\$ 600.000	\$ 218.000
Horas hombre limpieza	1 hora 8 dias	\$ 600.000	\$ 187.200
TOTAL			\$ 1.757.200

Consumo de energía Sulfato B sólido

MOTOR	Kw*hr/tn	COSTO HORA	COSTO DÍA
bomba lodos bauxita	0.16	\$ 293	\$ 7023.
cargue acido	0.13	\$ 1.366	\$ 32776.
dosificador acido	0.06	\$ 13	\$ 305.
banda descarga silo	0.50	\$ 17.481	\$ 419534.
elevador empaque	1.00	\$ 30.966	\$ 743175.
banda transpor empaque	0.04	\$ 6.035	\$ 144839.

Tabla 9 Costos de transporte totales para el proceso de sulfato B sólido

El siguiente paso para obtener la información de costos que se sugirió en el modelo, fue estimar las distancias recorridas en una matriz desde – hacia, utilizando la metodología de medición euclidiana que se calculó a partir del plano actual de la empresa, ubicando los centroides de cada una de las áreas que componen cada proceso y en esta forma, se tomó la medida de centroide a

centroide, los datos utilizados en el modelo se aproximaron al entero más cercano.

Al final, se obtuvo la siguiente información:

MATRIZ DE DISTANCIAS (euclidianas) PRODUCTOS QUIMICOS PANAMERICANOS

1. Almacén de materia prima
2. Molienda
3. Servicio de agua sulfato
4. Reacción sulfato
5. Decantación y lavado de gases
6. Almacenamiento de ácido sulfúrico
7. Cristalización
8. Almacenamiento de sulfato a y b
9. Almacenamiento de sulfato
10. Lodos
11. Molienda
12. Filtración
13. Pesaje
14. MP Bauxita
15. Cristalización

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1		122.5m	0	151m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	77.5m	0
2	0		12.5m	27.5m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0		30m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	154m	0	30m		20m	0	10m	65m	0	0	0	0	0	0	12.5m
5	0	0	0	20m		0	0	63.75m	0	42.5m	0	52.5m	0	0	0
6	0	0	0	12.5m	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0		0	0	0	45m	0	0	0	0
8	0	0	0	0	68m	0	0		0	0	0	0	125m	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	43m	0	0	0	0		0	4	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	25m	0		0	0	0	0
12	0	0	0	0	53m	0	0	0	0	4	0		0	92.5m	0
13	0	0	0	0	0	40m	0	0	125m	0	0	0		20m	0
14	0	20m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20m		0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25m	0	0	0	

Tabla 10 Matriz de distancias para la planta de producción de sulfatos

Por último, se quiso obtener unidades para el modelo de \$/ton metro, por lo tanto

los costos totales de transporte dados en $\frac{\$/\text{día}}{\text{metros} * \text{ton} / \text{día}} = \frac{\$}{\text{ton} * \text{metro}}$ lo cual

quiere decir que se pudo formular la siguiente ecuación:

$$C_{ij} = \frac{CT_{ij}}{d_{ij} * f_{ij}} \quad (11)$$

Donde

i, j índices de estaciones de trabajo $i, j = 1, 2, 3, \dots, n$

d_{ij} distancia entre la estación de trabajo i y la j (rectilínea) dada en metros.

C_{ij} costo de transportar una unidad de carga por una unidad de longitud entre la estación de trabajo i y la j . (dada en $\frac{\$}{\text{ton} * \text{metro}}$)

CT_{ij} Costo total de los recursos involucrados en el transporte de materiales de la estación de trabajo i y la j . (Unidades $\$/\text{día}$)

f_{ij} número de unidades de carga que son transportadas entre la estación de trabajo i y la j (unidades $\text{ton}/\text{día}$)

Lo que satisface la estructura del modelo.

4.1.5.1 Ejemplo de obtención de los datos para la matriz de costos Consideremos los costos por día que se producen por el transporte de materiales desde almacenamiento de materia prima hacia molienda, para el producto de sulfato B sólido, en el cual se utiliza los siguientes recursos y sus respectivos costos :

- ACPM para el cargador, \$47.333
- Mano de obra del operario de planta que conduce el cargador, \$44.550

- Mantenimiento del cargador, \$27.778
- Mano de obra del operario temporal que hace el transporte a pala alimentando el molino de bolas, \$15.000

El total de los costos es de \$119.331 pesos al día para una cochada.

Utilizando la fórmula (11) se tiene que para dos cochadas los costos dados en

$$\$/\text{ton}*\text{metro es igual a } \frac{\$239.262 / \text{día}}{29.28\text{ton} / \text{día} * 2 * 123\text{metros}} = \$ 33.21/\text{ton}*\text{metro}.$$

Dado que en la Figura 4 , se observa que se utilizan los recursos dos veces, entonces el costo total y la distancia recorrida es del doble. El calculo de los costos de transporte para los demás productos, en el área de sulfatos , se basaron en la Figura 4 los resultados se muestran en los anexos.

4.2 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

Se utilizó una aplicación desarrollada con la herramienta de macros a través del lenguaje de Visual Basic García (2001), cuyo motor de búsqueda es el algoritmo genético. Para obtener una solución de excelente calidad, se desarrolló un diseño de experimentos que permitió conocer la combinación apropiada de los parámetros que tienen mayor incidencia sobre la función objetivo. La definición de los factores y niveles que se estudiaron, fueron determinados a partir de las tesis que se han desarrollado en el área de distribución en planta de la Universidad de

Los Andes. Estos factores son franjas o anchos, fracción de mejores padres para cada generación, hijos generados por mejores padres, y probabilidad de mutación. Los niveles en los que se estudiaron los factores fue de tres y la variable respuesta usada fue el factor de carga. Dadas las características previas al diseño, la variable respuesta fue evaluada por:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n f_{ij} c_{ij} d_{ij} \quad (12)$$

Donde

- i, j índices de estaciones de trabajo i,= 1, 2,3.....n j= 1, 2,3.....n
- d_{ij} distancia entre la estación de trabajo i y la j (rectilínea)
- c_{ij} costo de transportar una unidad de carga por una unidad de longitud entre la estación de trabajo i y la j.
- f_{ij} número de unidades de carga que son transportadas entre la estación de trabajo i y la j
- n número de estaciones de trabajo

El modelo (12), se aplicó para que en la distribución de planta se considerara un solo producto, y para la distribución en planta, donde se consideraron todos los productos, se enuncia a continuación:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n f_{ijk} c_{ijk} d_{ijk} \quad (13)$$

Donde

- i, j índices de estaciones de trabajo $i, = 1, 2, 3, \dots, n$ $j = 1, 2, 3, \dots, n$
- k índice de tipo de producto
- d_{ijk} distancia entre la estación de trabajo i y la j y producto k (rectilínea)
- c_{ijk} costo de transportar una unidad de carga por una unidad de longitud entre la estación de trabajo i y la j y para el producto k .
- f_{ijk} número de unidades de carga que son transportadas entre la estación de trabajo i y la j y para el producto k .
- n número de estaciones de trabajo

El modelo (13) se aplicó a la planta de sulfatos, debido a que se producen tres productos en forma simultánea.

El conocimiento de los parámetros que se deben considerar para el plano de la planta final, debió ampliarse mediante un diseño factorial general 3^4 Ideal para observar el efecto de los cuatro factores a tres niveles (mínimo, medio, máximo).

4.3 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Debido a la complejidad del problema y en búsqueda de la eficacia de una solución superior, se utilizó un diseño factorial general, cuyos parámetros fijos fueron el número de generación recomendado por la literatura de 100 generaciones y el número de réplicas utilizadas en el diseño de 15.

Dado que es desconocido el parámetro de desviación estándar poblacional del estudio, entonces no se toman en consideración las curvas características de operación para determinar el número de replicas para el diseño, entonces la justificación en la utilización de este número de replicas se base en que a mayor sea el número de replicas, la probabilidad de error tipo II disminuye, obteniendo así inferencias satisfactorias con respecto al efecto que tiene cada uno de los factores escogidos y se obtiene una estimación del error experimental (mínimo 2 repeticiones), haciendo que las diferencias observadas en los datos sean estadísticamente significativas. Más de 15 replicas no se justifica ya que el esto incrementaría considerablemente los costos del diseño experimental.

En la siguiente tabla, se describen con claridad, los factores que se usaron para el diseño de experimentos:

Nombre del factor	Nivel alto	Nivel medio	Nivel bajo
Franjas ²	2	3	4
Fracción mejores padres	0.2	0.5	0.7
Fracción de hijos generados	0.2	0.5	0.7
Probabilidad de mutación	0.005	0.01	0.07

Tabla 11 Factores y niveles usados en el diseño de experimentos

4.3.1 Modelo del diseño de experimentos.

El modelo seleccionado para el diseño de experimentos, fue definido por:

$$y_{ijklm} = \mu + \tau_i + \alpha_j + \beta_k + \gamma_l + (\tau\alpha)_{ij} + (\tau\beta)_{ik} + (\tau\gamma)_{il} + (\alpha\beta)_{jk} + (\alpha\gamma)_{jl} + (\beta\gamma)_{kl} + (\tau\alpha\beta)_{ijk} + (\alpha\beta\gamma)_{jkl} + (\tau\beta\gamma)_{ikl} + \varepsilon_{ijklm}$$

μ = media general

τ = efecto del factor franjas

α = efecto del factor fracción mejores padres

β = efecto del factor fracción de hijos generados por mejores padres

γ = efecto del factor de probabilidad de mutación

² Recomendación hecha por el asesor Fidel Torres

ε = componente aleatorio del error

$$i = 1,2,3$$

$$j = 1,3$$

$$k = 1,3$$

$$l = 1, \dots, 3$$

$$m = 1, \dots, 15$$

4.3.2 Hipótesis por probar

1. $H_0: \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = 0$

H_a : al menos τ_i sea diferente de cero

2. $H_0: \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 0$

H_a : al menos un α_i sea diferente de cero

3. $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$

H_a : al menos β_i sea diferente de cero

4. $H_0: \gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = 0$

H_a : Al menos una γ_i sea diferente de cero

5. Las mismas hipótesis para las interacciones que se presentan en el modelo.

4.3.3. Criterio de rechazo. La región de rechazo está dada por F_{α} , grados de libertad factor, grados de libertad error y F_{α} , grados de libertad de la interacción entre factores, grados de libertad error.

Para un nivel de confianza del 95%, para el criterio de rechazo.

4.3.4 Datos para el análisis de varianza A continuación, se muestran los datos que se utilizaron para realizar el diseño de experimentos, para cada producto que se desarrolla en productos Químicos Panamericanos S.A. En las siguientes tablas, se muestra la función de carga para cada uno de los factores que se estudiaron para una sola réplica. Es importante recordar que los productos sulfato B sólido, sulfato A líquido y sulfato B sólido se producen en el mismo departamento y en la planta de sulfatos. Los resultados obtenidos fueron agrupados y se muestran a continuación, para el diseño factorial; los datos de los otros productos se encuentran en los anexos.

DISEÑO FACTORIAL PARA LA PLANTA DE SULFA					replicas
corrida	Franjas	Fración mejoré	elitismo	mutación	1
1	2	0.2	0.2	0.005	21 106.26433
2	2	0.2	0.2	0.01	18 588.47825
3	2	0.2	0.2	0.07	19 915.03853
4	2	0.2	0.5	0.005	20 787.09709
5	2	0.2	0.5	0.01	22 189.71641
6	2	0.2	0.5	0.07	24 147.40282
7	2	0.2	0.7	0.005	23 399.63983
8	2	0.2	0.7	0.01	23 399.63983
9	2	0.2	0.7	0.07	24 276.30609
10	2	0.5	0.2	0.005	18 932.13169
11	2	0.5	0.2	0.01	18 441.22632
12	2	0.5	0.2	0.07	18 481.17427
13	2	0.5	0.5	0.005	18 604.76975
14	2	0.5	0.5	0.01	17 658.52156
15	2	0.5	0.5	0.07	1 8330.9954
16	2	0.5	0.7	0.005	18 617.52975
17	2	0.5	0.7	0.01	19 329.99241
18	2	0.5	0.7	0.07	19 422.31583
19	2	0.7	0.2	0.005	18 225.38964
20	2	0.7	0.2	0.01	18 419.73951
21	2	0.7	0.2	0.07	18 347.90413
22	2	0.7	0.5	0.005	19 219.52684
23	2	0.7	0.5	0.01	18 461.71141
24	2	0.7	0.5	0.07	18 715.35075
25	2	0.7	0.7	0.005	18 065.97477
26	2	0.7	0.7	0.01	18 359.39136
27	2	0.7	0.7	0.07	18 970.43492
28	3	0.2	0.2	0.005	2 4548.3189
29	3	0.2	0.2	0.01	23 727.46139
30	3	0.2	0.2	0.07	22 790.50963
31	3	0.2	0.5	0.005	26 080.57105
32	3	0.2	0.5	0.01	25 444.62085
33	3	0.2	0.5	0.07	25 491.41495
34	3	0.2	0.7	0.005	27 846.59479
35	3	0.2	0.7	0.01	26 561.28914
36	3	0.2	0.7	0.07	2 6289.6572
37	3	0.5	0.2	0.005	2 1918.5939
38	3	0.5	0.2	0.01	22 361.61384
39	3	0.5	0.2	0.07	2 1249.0102
40	3	0.5	0.5	0.005	22 921.22505
41	3	0.5	0.5	0.01	23 150.04157
42	3	0.5	0.5	0.07	21 948.00381
43	3	0.5	0.7	0.005	22 464.56158
44	3	0.5	0.7	0.01	22 964.91603
45	3	0.5	0.7	0.07	21 901.16255
46	3	0.7	0.2	0.005	22 387.76354
47	3	0.7	0.2	0.01	22 342.23932
48	3	0.7	0.2	0.07	2 2009.9573
49	3	0.7	0.5	0.005	21 789.43047
50	3	0.7	0.5	0.01	21 906.78653
51	3	0.7	0.5	0.07	21 867.24864
52	3	0.7	0.7	0.005	23 125.09767
53	3	0.7	0.7	0.01	22 371.03411
54	3	0.7	0.7	0.07	21 784.63461
55	4	0.2	0.2	0.005	25 564.54043
56	4	0.2	0.2	0.01	25 476.12251
57	4	0.2	0.2	0.07	24 764.40615
58	4	0.2	0.5	0.005	2 7660.079
59	4	0.2	0.5	0.01	28 269.38106
60	4	0.2	0.5	0.07	26 559.65786
61	4	0.2	0.7	0.005	29 299.85443
62	4	0.2	0.7	0.01	28 584.53636
63	4	0.2	0.7	0.07	29 162.45521
64	4	0.5	0.2	0.005	24 617.59887
65	4	0.5	0.2	0.01	24 012.04946
66	4	0.5	0.2	0.07	23 943.92807
67	4	0.5	0.5	0.005	24 753.16687
68	4	0.5	0.5	0.01	25 725.57134
69	4	0.5	0.5	0.07	24 931.53063
70	4	0.5	0.7	0.005	25 541.01496
71	4	0.5	0.7	0.01	25 406.64969
72	4	0.5	0.7	0.07	25 698.18336

Tabla 12 Diseño de factorial 3^4 para la planta de sulfatos

4.3.5 Resultados obtenidos.

- Planta de sulfatos

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para el ANOVA de cada uno de los productos a los cuales, de forma independiente, se desarrolló el análisis de variancia:

Dependent Variable: Factor de carga

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	64	723807019.4	11309484.7	44.28	<.0001
Error	16	4086424.0	255401.5		
Corrected Total	80	727893443.4			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	carga Mean
0.994386	2.214185	505.3726	22824.32

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
Fracción_mejores_padr	2	157839121.4	78919560.7	309.00	<.0001
Franjas_	2	482114248.8	241057124.4	943.84	<.0001
Hijos mejores_padres_	2	32614250.3	16307125.1	63.85	<.0001
probabilidad_de_muta	2	2771600.0	1385800.0	5.43	0.0159
Franjas_*Fraccion_mej	4	1815904.8	453976.2	1.78	0.1827
Fracion_m* Hijos mejores	4	31411879.7	7852969.9	30.75	<.0001
Fracion_m*probabilid	4	1084927.1	271231.8	1.06	0.4072
Franjas_* Hijos mejores	4	1232215.4	308053.8	1.21	0.3465
Franjas_*probabilida	4	2543540.4	635885.1	2.49	0.0848
mejores_p*probabilid	4	1448718.6	362179.6	1.42	0.2730
Franja*Fraccio* Hijos me	8	3697275.9	462159.5	1.81	0.1488
Franja*Fraccio*probab	8	1060156.2	132519.5	0.52	0.8253
Fraccio*mejore*probab	8	2025022.5	253127.8	0.99	0.4782
Franja*Hijos*probab	8	2148158.3	268519.8	1.05	0.4407

Tabla 13 ANOVA para la planta de sulfatos

Dentro de los resultados obtenidos, se puede decir con una confiabilidad del 95%, que la fracción de mejores padres, las franjas, fracción de hijos generados por mejores padres y la probabilidad de mutación, tienen un efecto importante en la variable dependiente función de carga, así como la interacción entre fracción * fracción de hijos generados por mejores padres. Los demás factores no muestran efecto sobre el diseño.

- Producto Policloruro de aluminio

Dependent Variable: CARGA

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	64	8641646423	135025725	73.96	<.0001
Error	16	29210962	1825685		
Corrected Total	80	8670857385			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	CARGA Mean
0.996631	1.577449	1351.179	85655.97

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
Fraccion_mejores_padre	2	521167629	260583814	142.73	<.0001
Franjas_	2	7730188007	3865094004	2117.06	<.0001
Hijos mejores	2	38364454	19182227	10.51	0.0012
probabilidad_de_muta	2	79147801	39573901	21.68	<.0001
Franjas_*Fraccion_mej	4	4979059	1244765	0.68	0.6147
Fraccion_m*Hijos_pa	4	157970227	39492557	21.63	<.0001
Fraccion_m*probabilid	4	6369193	1592298	0.87	0.5020
Franjas_*Hijos_pad	4	4312887	1078222	0.59	0.6743
Franjas_*probabilida	4	20217480	5054370	2.77	0.0636
Hijos_p*probabilid	4	10114682	2528671	1.39	0.2834
Franja*Fraccio*mejore	8	10278184	1284773	0.70	0.6846
Franja*Fraccio*probab	8	14725547	1840693	1.01	0.4674
Fraccio*Hijos*probab	8	21945064	2743133	1.50	0.2321
Franja*Hijos*probab	8	21866208	2733276	1.50	0.2339

Tabla 14 ANOVA para el producto de PAC

De acuerdo con los datos obtenidos para PAC, se puede decir que los factores de forma independiente, tienen efecto sobre la función de carga, al igual que la interacción de fracción de mejores padres * hijos generados por mejores padres.

- Productos detergentes y limpiabordes

Variable dependiente: F5 Función de Carga

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	64	291073740959	4548027202.5	15.73	<.0001
Error	1150	332423809551	289064182.22		
Total correcto	1214	623497550510			

R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	F5 Media
0.466840	12.44496	17001.89	136616.7

Fuente	DF	Cuadrado de Tipo I SS	la media	F-Valor	Pr > F
Fracion_mejores_padr	2	22406566690	11203283345	38.76	<.0001
Franjas_	2	223500973652	111750486826	386.59	<.0001
Hijos_padres_gener	2	1331954453.1	665977226.55	2.30	0.1003
probabilidad_de_muta	2	4664839111.9	2332419556	8.07	0.0003
Franjas_*Fracion_mej	4	9349082099.4	2337270524.8	8.09	<.0001
Fracion_m*Hijos_pa	4	8295935137.2	2073983784.3	7.17	<.0001
Fracion_m*probabilid	4	2659994779.1	664998694.78	2.30	0.0569
Franjas_*Hijos_pad	4	3801083495.7	950270873.92	3.29	0.0109
Franjas_*probabilida	4	4043042137.2	1010760534.3	3.50	0.0076
Hijos_p*probabilid	4	343105963.31	85776490.827	0.30	0.8802
Franja*Fracio*Hijos	8	1860331294.9	232541411.87	0.80	0.5987
Franja*Fracio*probab	8	3308869616.8	413608702.11	1.43	0.1790
Fracio*Hijos*probab	8	2247827189.2	280978398.65	0.97	0.4562
Franja*Hijos*probab	8	3260135339.6	407516917.45	1.41	0.1878

Tabla 15 ANOVA obtenido para el producto detergentes y limpiabordes

De acuerdo con los datos obtenidos en ANOVA para los productos de detergentes y limpiabordes, se puede concluir que existe evidencia estadística de que la fracción de mejores padres, las franjas la probabilidad de mutación, las

interacciones entre fracción * hijos generados por mejores padres, franjas*fracción de mejores padres, tienen efecto importante sobre la variable respuesta.

4.3.6 Idoneidad del modelo³

- Planta de sulfatos (sulfato B sólido, sulfato A líquido, sulfato B líquido)

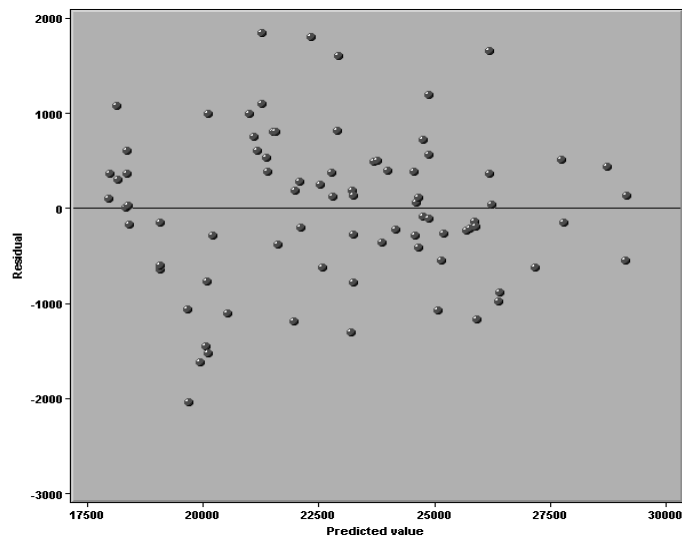


Figura 5 Grafica residuos vs. \hat{y} para planta de sulfatos

No existe evidencia de que los residuos tengan comportamiento embudo, lo cual indica que el modelo cumplió los supuestos de normalidad. Una situación diferente, hubiera obligado a hacer una transformación a la variable respuesta.

³ Resultados obtenidos con SAS

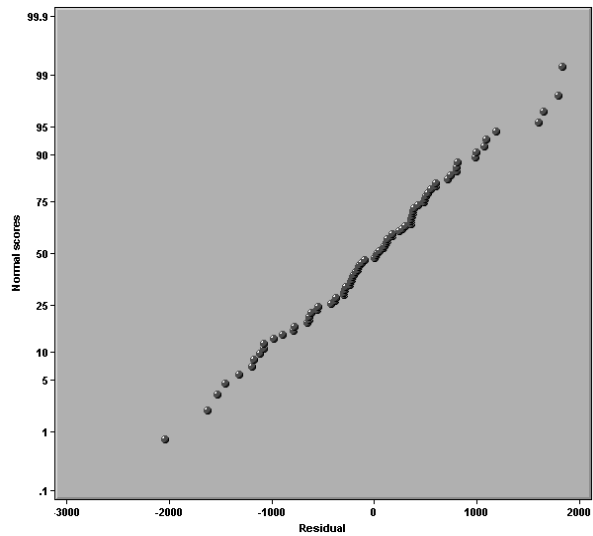


Figura 6 Gráfica de probabilidad normal de los residuos para la planta de sulfato

Si el 95% de los errores cumplen el supuesto de normalidad, deben encontrarse entre ± 2000 y prácticamente, si están más allá de ± 3000 , se estaría hablando de un residuo potencialmente distanciado, lo que podría indicar una distorsión en el análisis de variancia. Además, como se observa en la figura, los errores tuvieron un comportamiento en línea recta, lo cual es un buen indicio de que los errores se comportaron bajo una distribución normal.

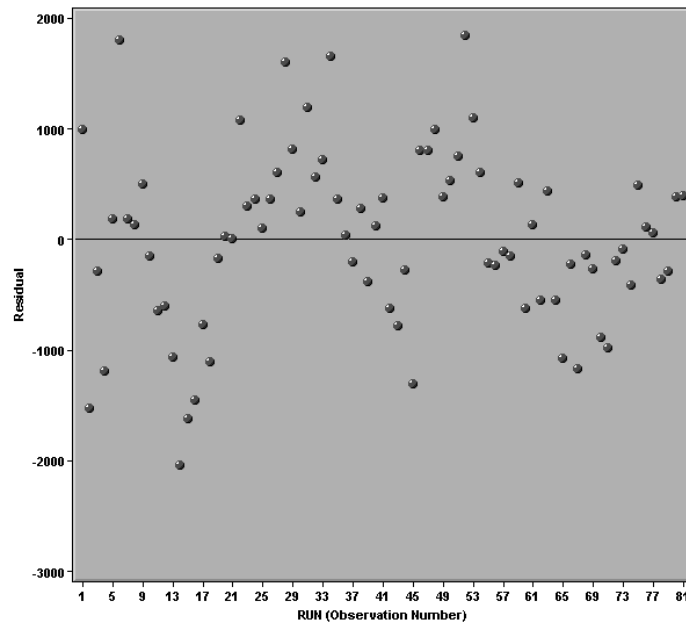


Figura 7 Gráfica de residuos contra la corrida para la planta de sulfatos

La gráfica no muestra rachas positivas o negativas, lo cual es satisfactorio al momento de concluir que no existe una correlación específica entre los errores, situación óptima para suponer que la independencia de los residuos no fue violada y por lo tanto, no existe necesidad de corregir el problema.

Cabe anotar que es de suma importancia para un diseño factorial que no exista presencia de curvatura, porque esto indicaría un síntoma fuerte a la hora de escoger el diseño para el análisis estadístico de los datos. La gráfica siguiente, muestra que no hubo curvatura en el modelo planteado.

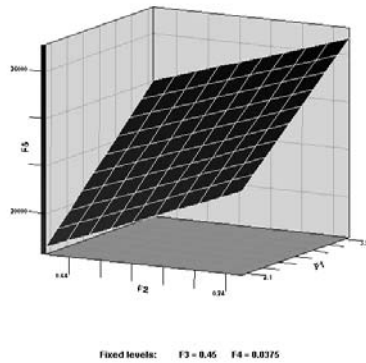


Figura 8 Gráfica de presencia de curvatura en el modelo de diseño factorial para la planta de sulfatos

Las figuras de idoneidad del modelo para los diferentes productos tratados en este documento, pueden ser consultadas en los anexos.

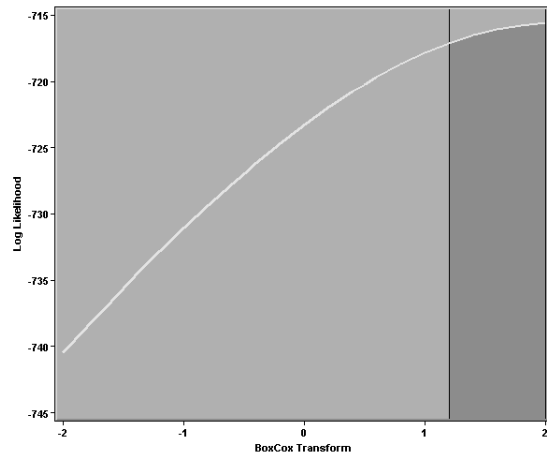


Figura 9 Gráfica de recomendaciones para transformación de la variable respuesta para la planta de sulfatos

Esta gráfica concluye que la transformación actual de la función de carga es la óptima, debido a que le da poder a la prueba, hecho muy satisfactorio, porque así

confirma nuevamente, la validez de los datos frente a los supuestos de normalidad donde $\varepsilon_{ijkl} \approx NIID(0, \sigma^2)$.

4.3.7 Parámetros recomendados por el análisis de variancia.

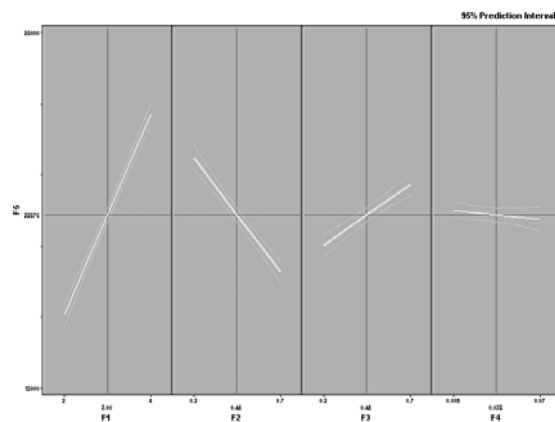


Figura 10 Gráfica de predicción de parámetros que optimizan la función de carga para la planta de sulfatos

Según la gráfica, a medida que se aumenta el número de franjas, la función de carga se maximiza, lo mismo que hijos generados de mejores padres, mientras que la fracción de mejores padres y probabilidad de mutación, tienen un efecto contrario sobre la variable respuesta. A partir de esta información, se puede concluir que los factores recomendados a los siguientes niveles, minimizan la función objetivo número de franjas 2, fracción de mejores padres 70%, hijos generados por mejores padres al 20% y probabilidad de mutación al 0.07. Para confirmar esta conclusión, se usó la herramienta de optimización que presenta el

software. Estos valores fueron tomados de la superficie de respuesta de la Figura 8.

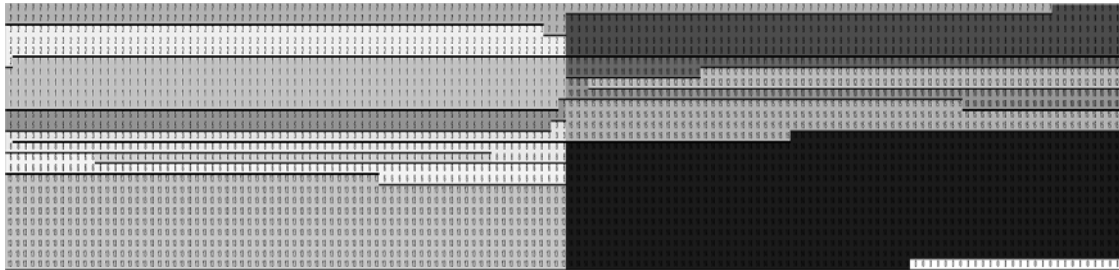
	F1	F2	F3	F4	F5
1	2	0.7	0.7	0.005	17969.83617
2	2	0.7	0.7	0.02125	18069.25881
3	2	0.7	0.575	0.005	18078.458207
4	2	0.7	0.575	0.02125	18149.091269
5	2	0.7	0.7	0.0375	18168.681449
6	2	0.7	0.45	0.005	18187.080243
7	2	0.7	0.575	0.0375	18219.724331
8	2	0.7	0.45	0.02125	18228.923727
9	2	0.7	0.7	0.05375	18268.104088
10	2	0.7	0.45	0.0375	18270.767212
11	2	0.7	0.575	0.05375	18290.357393
12	2	0.7	0.325	0.005	18295.702279
13	2	0.7	0.325	0.02125	18308.756186
14	2	0.7	0.45	0.05375	18312.610697
15	2	0.7	0.325	0.0375	18321.810094
16	2	0.7	0.325	0.05375	18334.864001
17	2	0.7	0.2	0.07	18341.381635
18	2	0.7	0.325	0.07	18347.917908
19	2	0.7	0.45	0.07	18354.454181
20	2	0.7	0.2	0.05375	18357.117305
21	2	0.7	0.575	0.07	18360.990455
22	2	0.7	0.7	0.07	18367.526728
23	2	0.7	0.2	0.0375	18372.852975
24	2	0.7	0.2	0.02125	18388.588645
25	2	0.7	0.2	0.005	18404.324315

Tabla 16 Datos optimizados por el software SAS para sulfatos

Se obtuvo 25 posibilidades que minimizan la respuesta. De acuerdo con los datos obtenidos en la tabla, se puede concluir que la mejor combinación es 2 franjas, 70% para fracción de padres, 70% para hijos generados por mejores padres y 0.005 para probabilidad de mutación. Para una función de carga de 17969.83 se debe tener en cuenta validar el modelo, frente a la consecución lógica del proceso de producción de sulfatos, lo cual puede transformar en forma drástica, la solución que se obtuvo.

4.4 DISTRIBUCIÓN DE PLANTA FINAL

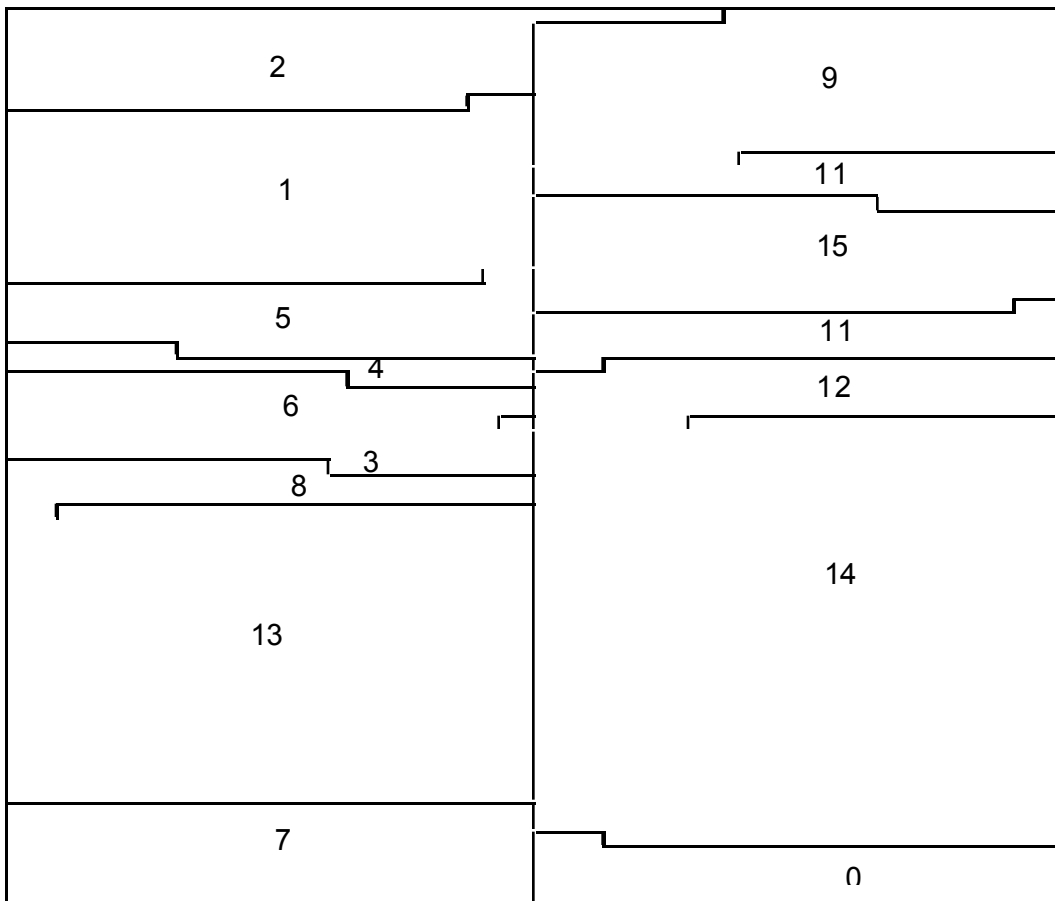
De acuerdo con los parámetros recomendados por el diseño factorial general, se corrió nuevamente la macro de visual Basic para 15 réplicas y se obtuvieron los siguientes resultados para un ancho de 2,70% para fracción de padres, 70% de hijos generados por mejores padres y 0.005 de probabilidad de mutación. Se obtuvo una función de carga 13068.46324 en la generación 80 y fue el menor dato que se logró dentro de las 15 réplicas, y el mayor dentro de las 15 réplicas, fue 25109.78566 que se alcanzó en la generación 40.



1	Almacen de materia pr
2	Molienda
3	Servicio de agua sulfat
4	Reacción sulfato
5	Decantación y lavado
6	Almacenamiento de ac
7	Cristalización
8	Almacenamiento de su
9	Almacenamiento de su
10	Lodos
11	Molienda
12	Filtración
13	Pesaje
14	MP Bauxita
15	Cristalización

Figura 11 Distribución de planta sulfato final para un área rectangular de 150m X 25m

Por tratarse de un nuevo diseño, se optó por mostrar otro tipo de posibilidades de interés, como la adecuación de la planta de sulfatos en un área disponible cuadrada de 62 m X 62 m. La solución que se muestra a continuación, se obtuvo con valor de función de carga de 17617.34368, localizada en la generación 97 que fue la mínima de 15 réplicas, dada por los parámetros optimizados y calculados anteriormente.



1. Almacen de materia prima
2. Molienda
- 3.Servicio de agua sulfato
- 4.Reacción sulfato
5. Decantación y lavado de gases
- 6.Almacenamiento de acido sulfurico
- 7.Cristalización
- 8.Almacenamiento de sulfato a y b
- 9.Almacenamiento de sulfato
10. Lods
11. Molienda
12. Filtración
- 13.Pesaje
- 14.MPBauxita
- 15.Cristalización

Figura 12 Distribución de planta sulfato final para un área cuadrada de 62m X 62m

Se hizo también, un diseño inicial para cada tipo de producto (anexos), y por último, se entregó esta propuesta que es el diseño de la planta con todos los productos incluidos. Cabe anotar que los parámetros escogidos para obtener la

solución que se presenta a continuación, tienen que ver con los resultados obtenidos en los diseños de experimentos que se desarrollaron con anterioridad.

Los parámetros que se tuvieron en cuenta, se muestran en la siguiente tabla:

Producto	Franjas	Fracción mejores	Hijos	Mutación	Función de carga	Generación	Area	Tiempo
Sulfatos	2	70%	70%	0.005	13068.46324	80	150X25	224.6
	2	70%	70%	0.005	17617.34368	97	62X62	223.9
PAC	2	70%	70%	0.07	100139.4731	50	18X20	24.6
Detergentes	2	70%	70%	0.07	116230.4432	93	29X10	18.9
	2	70%	70%	0.07	170152.5806	37	17X17	18.9
	4	70%	20%	0.05	190525.5073	33	29X10	19.5
	4	70%	20%	0.05	212137.5176	28	17X17	20.7
Silicato liquido	2	70%	20%	0.05	929395.6184	89	22X22	28.8
	2	70%	70%	0.07	924570.6836	43	22X22	28.3
Metasilicato	2	70%	20%	0.005	707185.2264	96	40X40	92.2
	2	70%	70%	0.07	707150.7538	26	40X40	91.0
Silicato solido	2	70%	20%	0.005	5654062.679	75	44X44	111.7
	2	70%	70%	0.07	5695501.255	7	44X44	111.7
Planta general	2	70%	20%	0.005	589083656.3	83	70X70	425.1
	2	70%	70%	0.07	587642201.4	84	70X70	422.2
	4	70%	20%	0.005	1127244086	99	70X70	431.1
	4	70%	70%	0.07	1118797342	99	70X70	436.9

Tabla 17 Resultados obtenidos para las configuraciones en planta

Este fue el diseño final que se logró, teniendo en cuenta la combinación de parámetros que minimizaron la función de carga:

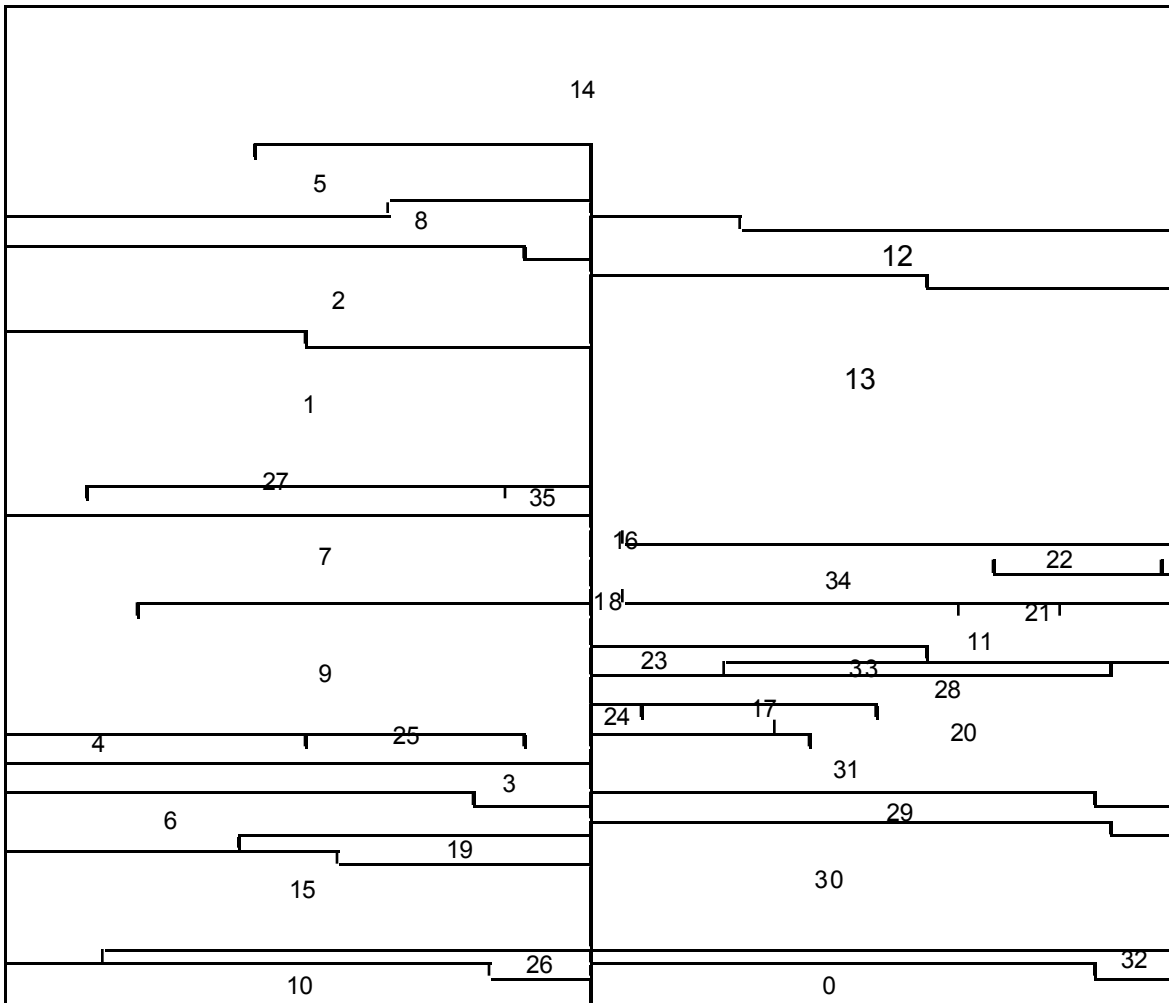


Figura 13 Distribución en planta final para todos los productos para un área de 70m X 70m (2 franjas)

La nomenclatura que se usó en este diseño, se describe a continuación:

DEPENDENCIAS PARA LA PLANTA GENERAL DE PRODUCTOS QUIMICOS

PANAMERICANOS

1. Almacenamiento de materia prima
2. Molienda
3. Servicio de agua

4. Reacción sulfato
5. Decantación y lavado de gases
6. Almacenamiento de ácido sulfúrico
7. Cristalización
8. Almacenamiento de sulfato A y B
9. Almacenamiento de sulfato
10. Lodos
11. Molienda
12. Filtración
13. Pesaje
14. MP bauxita
15. Cristalización
16. Almacenamiento de ácido clorhídrico
17. Silo de preparación de ácido (PAC)
18. Reactor
19. Almacenamiento de producto terminado (PAC)
20. Depósito de materia prima (PAC)
21. Filtración
22. Lodos
23. Silo de almacenamiento (detergentes)
24. Empaque y pesaje
25. Mezcla
26. Empaque producto terminado (detergentes)
27. Disolvente (silicato líquido)

28. Almacenamiento de carbonato de sodio
29. Mezcla (silicato sólido)
30. Horno
31. Empaque (silicato sólido)
32. Mezcla (metasilicato)
33. Evaporador
34. Cristalización
35. Molienda

4.5 VALIDACIÓN DEL DISEÑO

Dadas las condiciones específicas de cada uno de los productos que se fabrican en PQP, se concluyó con el ingeniero de procesos que los diseños no satisfacen las restricciones de vecindad para el proceso de sulfato B sólido, ya que los departamentos de cristalización y reacción deben ser cercanos, y dentro de las soluciones que se obtuvieron no se integran a estas. Bajo este nuevo supuesto se considero un diseño empírico de lo que se desea para PQP, y nuevamente se corre el programa en VB bajos los parámetros estimados para lograr obtener una solución más cercana, a las necesidades de diseño. En este nuevo diseño donde se considero que los costos de transporte de materiales de pesaje hacia materias

primas y productos terminados sean asumidos por los proveedores y clientes de la compañía este se presenta en el anexo 25.

CONCLUSIONES

- El programa utilizado en visual Basic, tiene gran aplicabilidad en la solución de problemas de distribución en planta y es muy versátil, a la hora de trabajar como plataforma para desarrollar nuevas versiones.
- Al validar los resultados obtenidos, se encontró que es necesario considerar restricciones de vincidad, ya que existen procesos donde algunas dependencias deben ir juntas, para lograr un sentido lógico frente al sistema productivo. Es el caso de la planta de sulfatos cuya solución obtenida, separa el departamento de reacción de los de cristalización que no es conveniente para el desarrollo de estas actividades.
- Para el desarrollo de nuevos modelos de distribución en planta para la empresa PQP, se debe separar los almacenes de materia prima y producto terminado, según su estado físico químico (sólido y líquido). Lo cual no se consideró en esta investigación.
- En cuanto la utilización eficiente del espacio es conveniente, el diseño de plantas cuadradas ya que el espacio que se disponible es menor frente al espacio excedente en los diseños de plantas rectangulares.

- Al aumentar el número de franjas durante el diseño, el costo se incrementa, debido a un resultado lógico porque se trataba de corredores de acceso o muros que provocan mayor distanciamiento entre cada una de las facilidades.
- Para lograr una mayor validación de los datos para la aproximación en la obtención de soluciones factibles, se debe dar más interés en recolectar los datos estadísticos de los flujos de materiales a través de un estudio de métodos y movimientos.
- A partir del diseño de experimentos que se realizó, se obtuvieron parámetros tendientes a minimizar la función de carga, donde las franjas deben ser dos, fracción de mejores padres del 70%, hijos generados por mejores padres 70% y probabilidad de mutación de 0.07. El número de réplicas aplicado al diseño, garantizó su idoneidad, aunque el recurso tiempo es costoso.
- Para investigaciones posteriores, es recomendable considerar el crecimiento futuro de la planta para generar soluciones frente a las necesidades futuras de demanda creciente muy acorde con la visión proyectada por PQP.
- Se presentaron mejoras sobre la función objetivo, desde un 80% para las soluciones que se lograron, lo cual representa un criterio de decisión adecuado al momento de escoger la distribución de planta a partir de los algoritmos genéticos.
- Para esta investigación y las necesidades futuras de plantas industriales, sería conveniente que la distribución en planta, además de hacer más eficiente la parte productiva, tuviera en consideración los impactos ambientales, puesto que ellos pueden generar costos sociales futuros irreversibles y en consecuencia,

sería ideal una propuesta para mitigarlos, minimizando los flujos contaminantes que resulten de cada procesos, localizándolos en facilidades donde sea tratados antes de ser liberados al medio ambiente.

- En próximas investigaciones, se debe considerar algunos cambios en el modelo, tales como que los departamentos se traslapen, opción que no fue dada por el modelo descrito en esta investigación.
- Bajo las recomendaciones dadas por PQP se sugiere tener en cuenta estética a la hora de ubicación de los tanques de almacenamiento y productos terminados, ya que el hecho de estar juntos satisface esta condición.
- Entre más complejo sea el problema, el tiempo de ejecución en la localización de la solución es mayor es el caso de la planta de sulfatos, que en promedio el tiempo utilizado en cada corrida fue de 224,25 segundos, ya que esta tiene 15 departamentos e información de tres flujos de materiales en forma simultánea, mientras que la planta de detergentes y limpiabordes, con 7 departamentos el tiempo computacional empleado fue en promedio de 19.5 segundos.

BIBLIOGRAFÍA

ARMOUR G. y BUFFA E. *A heuristic algorithm and simulation approach to relative locations facilities*. En: Management Science, Vol. 9. 1963, 294-309 pp.

DAVIS, L. *Job Shop Scheduling With Genetic Algorithms*. Proceedings of an International Conference on Genetic Algorithms, 1985, 136-140 pp.

DAVIS, L. and Coombs, S. *Genetic Algorithms and Communication Link Speed Design: Theoretical Considerations*. Proceedings of the Second International Conference on Genetic Algorithms. 1987, 252-256 pp.

GARCÍA Diana Algoritmos genéticos para distribución en planta, Tesis de Maestría, Universidad de Los Andes, 2001.

GOLDBERG, D. E. *Computer-aided Gas Pipeline Operation Using Genetic Algorithms and Rule Learning*. Doctoral Dissertation. Ciudad: University of Michigan, 1983.

GOLDBERG D. E. *Genetic Algorithms in search, optimization and machine learning*. Ciudad: Addison Wesley Publishing Company, 1989.

HOUSE, R. L. and Dagli, C. H. *An Approach to Three-Dimensional Packing Using Genetic Algorithms*. En: Intelligent Engineering Systems Through Artificial Neural. En: *Networks*, Vol. 2, C. H. Dagli, L. I. Burke and Y. C. Shin, editors. New York: ASME Press, 1992, 937-942 pp.

ISLIER A.A *A genetic algorithm approach for multiple criteria facility layout design*. En: International Journal of Production Research, Vol. 36, número 6, 1998, 1549-1569 pp.

KOOPMANS, T. C. and Beckmann, M. *Assignment Problems and the Location of Economic Activities*. En: *Econometría*, 25. 1957, 53-76 pp.

MONTGOMERY, Douglas, *Diseño y análisis de experimentos*. 1991

PICONE C. J. y WILHELM W. E. *A perturbation scheme to improve Hillier's solution to the facilities layout problem*. En: *Management Science*, Vol. 30, número 10. octubre de 1984, 1238-1249 pp.

STORER, R. H., Wu, S. D. and Vaccari, R. *New Search Spaces for Sequencing Problems With Application to Job Shop Scheduling*. En: *Management Science* 38, Ciudad: 1992, 1495-1509 pp.

SYSWERDA, G. *Schedule Optimization Using Genetic Algorithms*. Handbook of Genetic Algorithms, editor, L. Davis. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991, 332-349 pp.

TAM K. Y. y LI S. H. *A hierarchical approach to the facility layout problem*. En: International Journal of Production Research, Vol. 29, número 1. 1991, 165-184 pp.

TOMPKINS , J. A., WHITE , J. A, BOZER , Y. A, TANCHOCO , J. M. A y
TREVINO , J., *Facilities Planning*, New York:, Wiley 1996.

WELGAMA P.S. y GIBSON P. R. *A construction algorithm for the machine layout problem with fixed pick-up and drop-off points*. En: International Journal of Production Research, Vol. 31, número 11, 1993, 2575-2590 pp.

Anexo 1 Idoneidad del modelo PAC

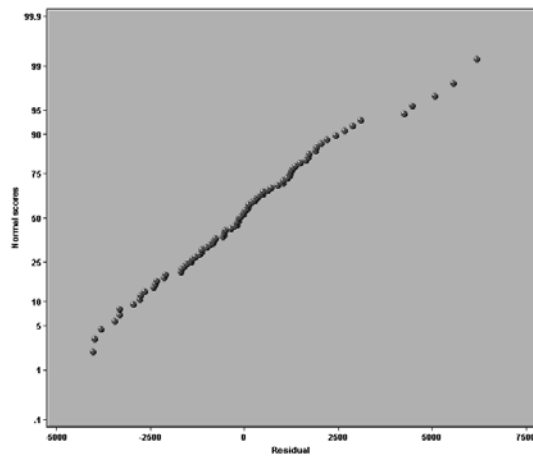


Figura 14 Gráfica de probabilidad normal de los residuos

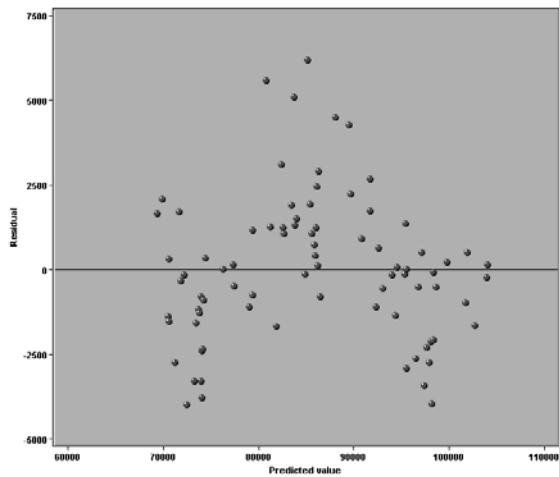


Figura 15 Gráfica de residuos contra valores ajustados

Anexo 2 Idoneidad del modelo PAC

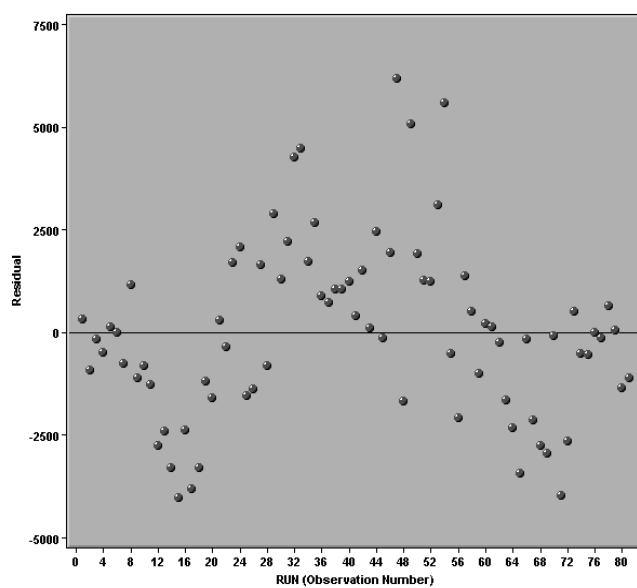


Figura 16 Gráfica de residuos contra corridas

Anexo 3 Parámetros recomendados PAC

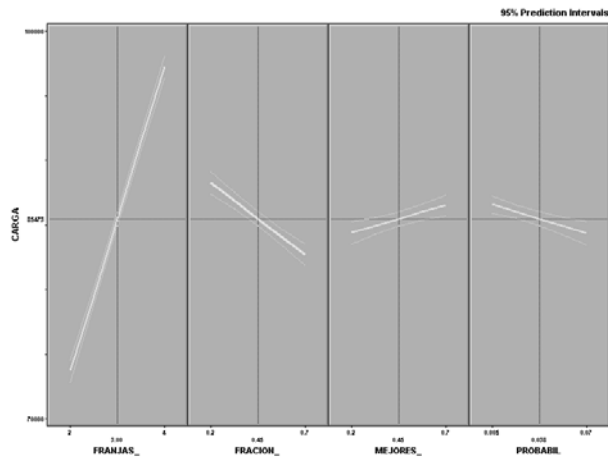


Figura 17 Comportamiento de cada factor frente a la función de carga

Francias	Fracion mejores padres	mejores padres generados	probabilidad de mutacion	CARGA
2	0.7	0.7	0.07	69398.367842
2	0.7	0.575	0.07	69707.771283
2	0.7	0.7	0.05375	69708.992035
2	0.7	0.45	0.07	70017.174725
2	0.7	0.7	0.0375	70019.616229
2	0.7	0.575	0.05375	70132.249234
2	0.7	0.325	0.07	70326.578167
2	0.7	0.7	0.02125	70330.240423
2	0.7	0.45	0.05375	70555.506433
2	0.7	0.575	0.0375	70556.727185
2	0.7	0.2	0.07	70635.981608
2	0.7	0.7	0.005	70640.864617
2	0.7	0.325	0.05375	70978.763631
2	0.7	0.575	0.02125	70981.205136
2	0.575	0.2	0.07	71037.306224
2	0.7	0.45	0.0375	71093.838141
2	0.575	0.325	0.07	71230.180396
2	0.7	0.2	0.05375	71402.02083
2	0.7	0.575	0.005	71405.683087
2	0.575	0.45	0.07	71423.054568
2	0.45	0.2	0.07	71438.63084
2	0.575	0.575	0.07	71615.92874
2	0.7	0.325	0.0375	71630.949096
2	0.7	0.45	0.02125	71632.169848
2	0.575	0.2	0.05375	71749.872046

Tabla 19 Parámetros recomendados que minimizan la función de carga

Anexo 4 Planta final PAC

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

DEPENDENCIAS PARA EL PROCESO DE POLICLORURO DE ALUMINIO

1. Almacenamiento de Ácido Clorhídrico
2. Silo de preparación de ácido
3. Reactor
4. Almacenamiento de producto terminado
5. Depósito de materia prima
6. Servicio de agua
7. Filtración
8. Lodos
9. Pesaje

Figura 18 Distribución recomendada para el producto policloruro de aluminio para un área disponible de 18m X 20m

Anexo 5 Idoneidad del modelo para detergentes y limpiabordes

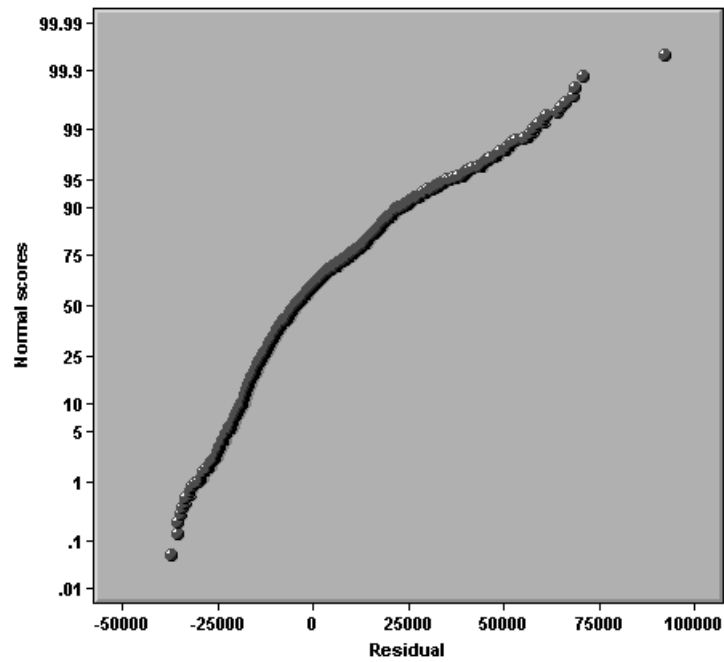


Figura 19 Gráfica de probabilidad normal de los residuos⁴

⁴ Residuos potencialmente distanciados. La gráfica indica que no hubo una tendencia en línea recta y por lo tanto, fueron violados los supuestos de normalidad.

Anexo 6 Idoneidad del modelo detergentes y limpiabordes

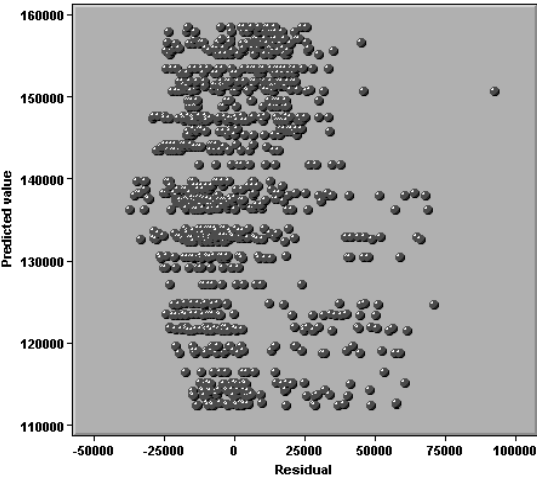


Figura 20 Gráfica de residuos contra valores ajustados⁵

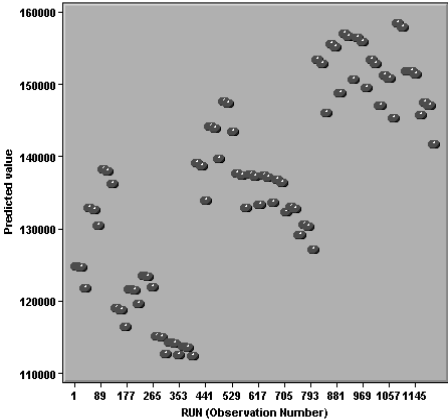


Figura 21 Gráfica de residuos contra corridas⁶

⁵ La gráfica no presenta efecto embudo, pero los datos tienen cierto patrón que obligó a transformar los datos.

⁶ En la figura, se puede observar una fuerte correlación entre los residuos, lo cual indica que la suposición de independencia fue violada.

Anexo 7 Parámetros recomendados para detergentes y limpiabordes

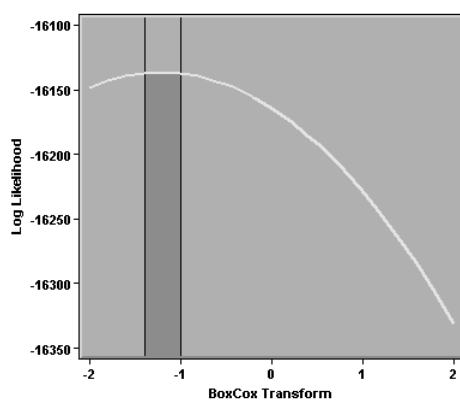


Figura 22 Recomendación del software frente a la transformación de los datos⁷

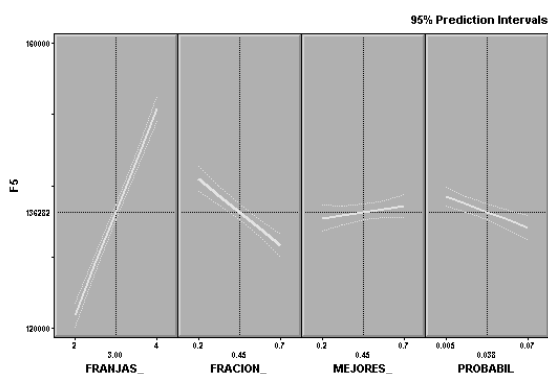


Figura 23 Gráfica comportamiento de cada factor frente a la función de carga

⁷ Dados los análisis SAS anteriores, se recomendó una transformación de los datos de $1/\text{carga}$ para igualar las variancias, y a su vez, minimizar la media de cuadrados de las interacciones, lo cual conduce a lograr que los residuos se distribuyan de forma normal.

Anexo 8 Parámetros que minimizan la respuesta detergentes y limpiabordes

Franjas	Fracion mejores padres	mejores padres generados	probabilidad de mutacion	F5
2	0.7	0.7	0.07	112269.75147
2	0.7	0.575	0.07	112369.67398
2	0.7	0.45	0.07	112469.5965
2	0.7	0.325	0.07	112569.51901
2	0.7	0.7	0.05375	112605.55832
2	0.7	0.2	0.07	112669.44152
2	0.7	0.575	0.05375	112768.60835
2	0.7	0.45	0.05375	112931.65839
2	0.7	0.7	0.0375	112941.36517
2	0.7	0.325	0.05375	113094.70842
2	0.7	0.575	0.0375	113167.54272
2	0.7	0.2	0.05375	113257.75846
2	0.7	0.7	0.02125	113277.17202
2	0.7	0.45	0.0375	113393.72028
2	0.7	0.575	0.02125	113566.47709
2	0.7	0.7	0.005	113612.97887
2	0.7	0.325	0.0375	113619.89784
2	0.7	0.2	0.0375	113846.07539
2	0.7	0.45	0.02125	113855.78217
2	0.7	0.575	0.005	113965.41147
2	0.7	0.325	0.02125	114145.08725
2	0.7	0.45	0.005	114317.84407
2	0.7	0.2	0.02125	114434.39233
2	0.7	0.325	0.005	114670.27667

Tabla 20 Parámetros recomendados sin transformación

Anexo 9 Resultados obtenidos con la transformación detergentes y limpiabordes

Variable dependiente: F5

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	64	8.446539E-10	1.319772E-11	16.73	<.0001
Error	1150	9.069742E-10	7.886732E-13		
Total correcto	1214	1.7516282E-9			

R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	F5 Media
0.482211	11.81608	8.88073E-7	7.5158E-6

Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Fracion_mejores_padr	2	5.844827E-11	2.922414E-11	37.05	<.0001
Franjas_	2	6.645981E-10	3.32299E-10	421.34	<.0001
Hijos_padres_gener	2	2.856233E-12	1.428117E-12	1.81	0.1640
probabilidad_de_muta	2	1.343235E-11	6.716176E-12	8.52	0.0002
Franjas_*Fracion_mej	4	2.712205E-11	6.780512E-12	8.60	<.0001
Fracion_m*Hijos_pa	4	2.017489E-11	5.043723E-12	6.40	<.0001
Fracion_m*probabilid	4	7.887255E-12	1.971814E-12	2.50	0.0410
Franjas_*Hijos_pad	4	9.475264E-12	2.368816E-12	3.00	0.0176
Franjas_*probabilida	4	8.31663E-12	2.079157E-12	2.64	0.0327
Hijos_p*probabilid	4	1.004298E-12	2.510744E-13	0.32	0.8658
Franja*Fracio*Hijos	8	4.396995E-12	5.496244E-13	0.70	0.6946
Franja*Fracio*probab	8	1.034327E-11	1.292909E-12	1.64	0.1093
Fracio*Hijos*probab	8	6.895736E-12	8.61967E-13	1.09	0.3653
Franja*Hijos*probab	8	9.702597E-12	1.212825E-12	1.54	0.1396

Tabla 21 ANOVA para detergentes con la transformación recomendada

Anexo 10 Parámetros recomendados con transformación detergentes

Franjas	Fracion mejores padres	mejores padres generados	probabilidad de mutacion	F5
4	0.7	0.2	0.005	6.2975064E-6
4	0.575	0.2	0.005	6.3696058E-6
4	0.7	0.2	0.02125	6.3805106E-6
4	0.2	0.7	0.005	6.4153698E-6
4	0.7	0.325	0.005	6.4362379E-6
4	0.45	0.2	0.005	6.4417053E-6
4	0.575	0.2	0.02125	6.4539231E-6
4	0.2	0.575	0.005	6.4580034E-6
4	0.575	0.325	0.005	6.4629961E-6
4	0.7	0.2	0.0375	6.4635149E-6
4	0.45	0.325	0.005	6.4897542E-6
4	0.2	0.7	0.02125	6.4925192E-6
4	0.2	0.45	0.005	6.500637E-6
4	0.325	0.2	0.005	6.5138047E-6
4	0.7	0.325	0.02125	6.5164654E-6
4	0.325	0.325	0.005	6.5165124E-6
4	0.325	0.45	0.005	6.5192201E-6
4	0.325	0.575	0.005	6.5219278E-6
4	0.325	0.7	0.005	6.5246355E-6
4	0.45	0.2	0.02125	6.5273356E-6
4	0.45	0.45	0.005	6.5378032E-6
4	0.2	0.575	0.02125	6.5379295E-6
4	0.575	0.2	0.0375	6.5382404E-6
4	0.2	0.325	0.005	6.5432705E-6
4	0.575	0.325	0.02125	6.5445366E-6

Tabla 22 Parámetros recomendados para minimizar la carga con los datos transformados

Anexo 12 Distribución final de planta detergentes y limpiabordes

1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	1	1	1	1	1	1	1	1
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	7	7	7
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	7	7	7	7	7	7	7	7
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	7	7	7
6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	7	7	7	7	7	7	7	7
6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	7	7	7	7	7	7	7	7
6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	7	7	7	7	7	7	7	7
6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	7	7	7	7	7	7	7	7
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	7	7	7	7	7	7	7	7
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	7	7	7	7	7	7	7	7
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	7	7	7	7	7	7	7	7
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	7	7	0	0	0	0	0	0

DEPENDENCIAS PARA EL PROCESO DE BASE DE DETERGENTES Y LIMPIABORDES

1. Almacenamiento de materia prima
2. Silo de almacenamiento
3. empaque y pesaje
4. mezcla
5. empaque producto terminado
6. Almacén producto terminado
7. Pesaje

Figura 25 Distribución para detergentes y limpiabordes para un área de 17m X 17m (2 franjas)

Anexo 14 Distribución en planta final para detergentes y limpiabordes

7	7	7	7	7	7	7	7	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1
7	7	7	7	7	7	7	7	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
7	7	7	7	7	3	3	3	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
7	7	7	7	3	3	3	3	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
7	7	7	7	3	3	3	3	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
7	7	7	7	4	4	3	3	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
7	7	7	7	4	4	4	4	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
7	7	7	7	4	4	4	4	2	2	5	5	1	1	1	1	1	1
7	7	7	7	4	4	4	4	6	5	5	5	5	1	1	1	1	1
7	7	7	7	6	6	6	6	5	5	5	5	1	1	1	1	1	1
7	7	7	7	6	6	6	6	5	5	5	5	1	1	1	1	1	1
7	7	7	7	6	6	6	6	5	5	5	5	1	1	1	1	1	1
7	7	7	7	6	6	6	6	5	5	5	5	1	1	1	1	1	1
7	7	7	7	6	6	6	6	5	5	5	5	1	1	1	1	1	1
7	7	7	7	6	6	6	6	5	5	5	5	0	0	0	0	1	1
7	7	7	7	6	6	6	6	6	6	5	5	0	0	0	0	0	0

DEPENDENCIAS PARA EL PROCESO DE BASE DE DETERGENTES Y LIMPIABORDES

1. Almacenamiento de materia prima
2. Silo de almacenamiento
3. empaque y pesaje
4. mezcla
5. empaque producto terminado
6. Almacén producto terminado
7. Pesaje

Figura 27 Distribución en planta para detergentes y limpiabordes para un área de 17m X 17m (4 franjas)

Anexo 18 Matrices de flujos y costos para PAC

DEPENDENCIAS PARA EL PROCESO DE POLICLORURO DE ALUMINIO

1. Almacenamiento de Acido Clorhidrico
2. Silo de preparación de acido
3. Reactor \$/
4. Almacenamiento de Producto terminado
5. Deposito de materia prima
6. Servicio de agua
7. Filtración
8. lodos
9. Pesaje

MATRIZ DE COSTOS EN \$/TON METRO

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1		5022.68							10
2			9056.37						
3							1686.97		
4									
5			190.05						
6		58.76							
7				1468.92				4579.6	
8									
9					46.2				

Tabla 23 Matriz de costos para el producto de PAC

flujo Ton / turno (8 horas)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1		1							10
2			0.38						
3							3		
4									
5			4.1						
6		3							
7				2.2				0.8	
8									
9					2				

Tabla 24 Matriz de flujos para el producto de PAC

Anexo 19 Matrices de flujo y costos para detergentes y limpiabordes

DEPENDENCIAS PARA EL PROCESO DE BASE DE DETERGENTES Y LIMPIABORDES

1. Almacenamiento de materia prima
2. Silo de almacenamiento
3. empaque y pesaje
4. mezcla
5. empaque producto terminado
6. Almacén producto terminado
7. Pesaje

MATRIZ DE FLUJOS TON/TURNO (8 HORAS)

	1	2	3	4	5	6	7
1		7					34
2			0.05				
3				2.4			
4					3		
5						3	
6							
7				0.6			

Tabla 25 Matriz de flujos para el producto de detergentes y limpiabordes

Matriz de costos en \$/Ton metro

	1	2	3	4	5	6	7
1		587.33					2.29
2			3700.00				
3				1282.20			
4					140.95		
5						6166.67	
6							
7				1027.78			

Tabla 26 Matriz de costos para el producto detergentes y limpiabordes⁸

⁸ Se debe tener en cuenta que para estimar los costos de este producto, los recursos que se involucran, sólo son mano de obra.

Anexo 20 Matrices de flujo y costos para el producto de silicato líquido

DEPENDENCIAS PARA EL PROCESO DE SILICATOS DE SODIO LIQUIDOS

1. Almacenamiento de silicato de potasio
2. Disolvedor
3. Servicio de Agua
4. Almacenamiento de producto terminado
5. Pesaje

MATRIZ DE FLUJO Ton/ TURNO

	1	2	3	4	5
1		3			
2				5.5	
3		3			
4					10
5					

Tabla 27 Matriz de flujos para silicato de sodio líquido

MATRIZ DE COSTOS \$/Ton metro

	1	2	3	4	5
1		14840			
2				9440.692408	
3		209.8214451			
4					45.55951234
5					

Tabla 28 Matriz de costos para silicato de sodio líquido

Anexo 21 Matriz de flujos y costos para el producto silicato de sodio sólido

DEPENDENCIAS PARA EL PROCESO DE SILICATOS DE SODIO SOLIDOS

1. Almacenamiento de carbonato de sodio
2. Almacenamiento Arena
3. Mezcla
4. Horno
5. Empaque
6. Almacenamiento de producto terminado
7. pesaje

MATRIZ DE FLUJOS Ton/DÍA

	1	2	3	4	5	6	7
1			32				
2			30				
3				21			
4					24		
5						24	
6							
7	32	30					

Tabla 29 Matriz de flujos para el producto de silicato de sodio sólido

MATRIZ DE COSTOS \$/Ton metro

	1	2	3	4	5	6	7
1			\$ 2166				
2			\$ 2311				
3				\$ 3355			
4					\$ 69323		
5						\$ 63020	
6							
7	\$ 867	\$ 881					

Tabla 30 Matriz de costos para el producto silicato de sodio sólido

Anexo 22 Matrices de flujo y costos para producto de metasilicato

DEPENDENCIAS PARA EL PROCESO DE METASILICATO

1. Almacenamiento materia prima
2. Mezcla
3. Evaporador
4. Cristalización
5. Molienda
6. Almacenamiento y empaque de producto terminado
7. pesaje

MATRIZ DE FLUJOS Ton/día

	1	2	3	4	5	6	7
1		9.5					
2			9.5				
3				7			
4					7		
5						7	
6							
7							

Tabla 31 Matriz de flujos para el producto de metasilicato

MATRIZ DE COSTOS \$/T on metro

	1	2	3	4	5	6	7	8
1		1757.368421						
2			7353.311571					
3				6360				
4					2000			
5						2586		
6								
7								
8								

Tabla 32 Matriz de costos para el producto de metasilicato

Anexo 23 Matrices de flujo para los productos de sulfatos

Dependencias para Sulfatos

1. Almacen de materia prima
2. Molienda
3. Servicio de agua sulfato
4. Reacción sulfato
5. Decantación y lavado de gases
6. Almacenamiento de acido sulfurico
7. Cristalización
8. Almacenamiento de sulfato a y b
9. Almacenamiento de sulfato
10. Lodos
11. Molienda
12. Filtración
13. Pesaje
14. MP Bauxita
15. Cristalización

Matriz de flujos para producción de Sulfato de Aluminio B sólido (Ton/día)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1		2928	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0		0	51.92	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	2256		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0		588.46	0	42	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	42	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0		0	0	0	42	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	34	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	21.375	0		0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0
13	0	0	0	0	0	70	0	0	0	0	0	0		35	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Tabla 33 Matriz de flujo para sulfato de aluminio B sólido

Matriz de flujos para producción de Sulfato de Aluminio A líquido (Ton/día)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1		0	0	3.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0		18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0		2942.3	0	0	26	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	7	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	18	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Tabla 34 Matriz de flujo para sulfato A líquido

Matriz de flujos para producción de Sulfato de Aluminio B líquido (Ton/día)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1		4.42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0		0	8.64	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0		31.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	12		0	0	26.4	0	4.32	0	0	0	0	0
6	0	0	0	6.5	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	1.728	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0
12	0	0	0	0	24	0	0	0	0	0	0		0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Tabla 35 Matriz de flujo para sulfato B líquido

Anexo 24 Matrices de costos para los productos de sulfatos

Tabla de costos \$/ton metro para producción de sulfato de aluminio B sólido

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1															
2	0	33.22	0	18.48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	67.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0.02	0	35.71	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	96.44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	63.30	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.47	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	836.98	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	7.21	0	0	0	0	0	0	0	0.61	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 36 Matriz de costos para sulfato B sólido

Matriz de costos \$/Ton metro de transporte para producción de sulfato de aluminio A líquido

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1															
2	0		0	160.59	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0		14.10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0.03	0	7.42	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	225.99	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11.57	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 37 Matriz de costos para sulfato A líquido

Tabla de costos \$/Ton metro de transporte para producción de sulfato de aluminio B líquido

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1															
2	0	\$ 254	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0		\$ 83	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	\$ 33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	\$ 89	0	0	\$ 12	0	\$ 12	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	\$ 221	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	\$ 2547	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	\$ 160	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 38 Matriz de costos para sulfato B líquido

Anexo 25 Matrices de distancias

DEPENDENCIAS PARA EL PROCESO DE POLICLORURO DE ALUMINIO

1. Almacenamiento de Acido Clorhidrico
2. Silo de preparaci3n de acido
3. Reactor
4. Almacenamiento de Producto terminado
5. Deposito de materia prima
6. Servicio de agua
7. Filtraci3n
8. lodos
9. Pesaje

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1		6.25m							150m
2			6.25m						
3							4.25m		
4									
5			19.25m						
6		116.25m							
7				6.25m				7.5m	
8									
9					162.5m				

Tabla 39 Matriz de distancias para PAC

DEPENDENCIAS PARA EL PROCESO DE BASE DE DETERGENTES Y LIMPIABORDES

1. Almacenamiento de materia prima
2. Silo de almacenamiento
3. empaque y pesaje
4. mezcla
5. empaque producto terminado
6. Almac3n producto terminado
7. Pesaje

	1	2	3	4	5	6
1		28.75m				90m
2			43.75m			
3				43.75m		
4					1m	
5						
6						
7			30m			

Tabla 40 Matriz de distancias para detergentes y limpiabordes

DEPENDENCIAS PARA EL PROCESO DE SILICATOS DE SODIO LIQUIDOS

1. Almacenamiento de silicato de potasio
2. Disolvedor
3. Servicio de Agua
4. Almacenamiento de producto terminado
5. Pesaje

	1	2	3	4	5
1		1m			
2				1m	
3		78.75m			
4					122.5m
5					

Tabla 41 Matriz de distancias para silicato de sodio líquido

DEPENDENCIAS PARA EL PROCESO DE SILICATOS DE SODIO SOLIDOS

1. Almacenamiento de carbonato de sodio
2. Almacenamiento Arena
3. Mezcla
4. Horno
5. Empaque
6. Almacenamiento de producto terminado
7. pesaje

	1	2	3	4	5	6	7
1			1m				
2			1m				
3				1m			
4					1m		
5						1m	
6							
7	1m	1m					

Tabla 42 Matriz de distancias para silicato de sodio sólido

DEPENDENCIAS PARA EL PROCESO DE METASILICATO

1. Almacenamiento materia prima
2. Mezcla
3. Evaporador
4. Cristalización
5. Molienda
6. Almacenamiento y empaque de producto terminado
7. pesaje

	1	2	3	4	5	6	7
1		1m					
2			1m				
3				1m			
4					1m		
5						1m	
6							
7							

Tabla 43 Matriz de distancias para metasilicato

Anexo 27 Diseño de planta propuesto

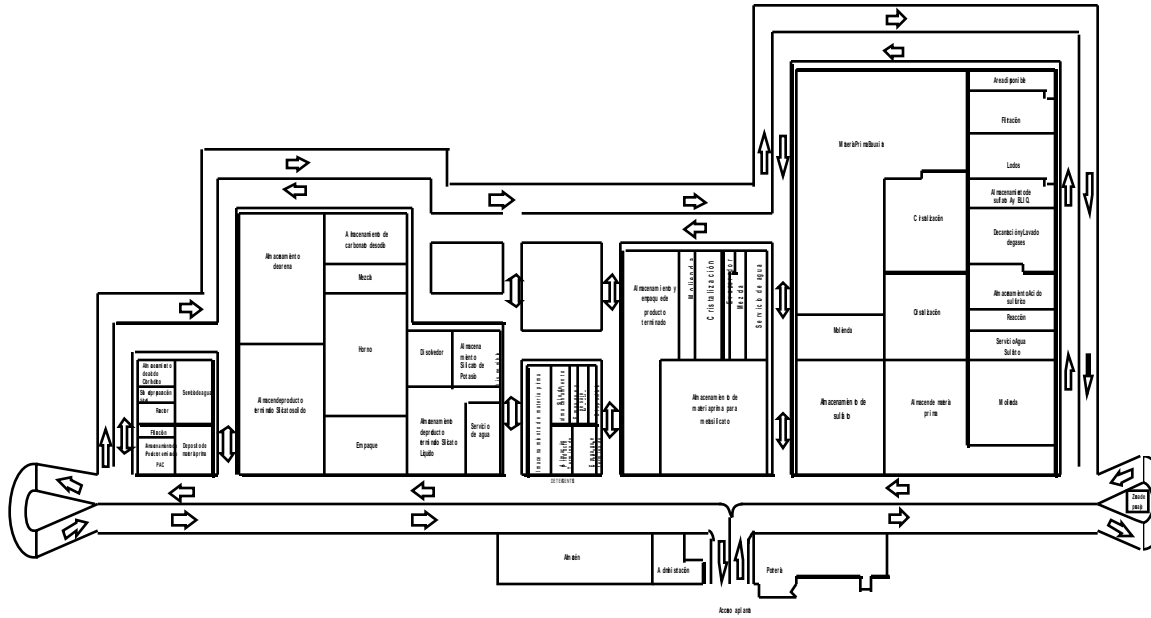


Figura 31 Diseño de planta validada frente a los procesos de PQP