



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR**

TESIS DE DOCTOR EN INGENIERÍA QUÍMICA

**“TÉCNICAS METAHEURÍSTICAS APLICADAS AL  
DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE CAÑERÍAS”**

*Paola Patricia Oteiza*

BAHIA BLANCA

ARGENTINA

2015





**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR**

TESIS DE DOCTOR EN INGENIERÍA QUÍMICA

**“TÉCNICAS METAHEURÍSTICAS APLICADAS AL  
DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE CAÑERÍAS”**

*Paola Patricia Oteiza*

BAHIA BLANCA

ARGENTINA

2015



## **PREFACIO**

Esta Tesis se presenta como parte de los requisitos para optar al grado Académico de Doctor en Ingeniería Química, de la Universidad Nacional del Sur y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta Universidad u otra. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en el ámbito del Departamento de Ingeniería Química durante el período comprendido entre el 24 de Agosto de 2010 y el 12 de Agosto de 2015, bajo la dirección de la Dra. Nélidea Beatriz Brignole, Profesora Adjunta del Departamento de Ciencias e Ingeniería de la Computación e Investigadora Independiente del CONICET (PLAPIQUI-UNS) y el Mg. Carlos Eugenio Gigola, Investigador Principal Contratado del CONICET.

Paola Patricia Oteiza



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR  
Secretaría General de Posgrado y Educación Continua

La presente tesis ha sido aprobada el ..../..../..... , mereciendo la calificación de .....(.....)



## **Agradecimientos**

Quisiera dedicar la finalización de esta Tesis Doctoral a todas aquellas personas que me han acompañado y facilitado su apoyo, consejo y ánimo a lo largo de este proceso, sin las cuales no hubiera sido posible lograr este objetivo.

En primer lugar quiero agradecer a la Dra. Nélidea Beatriz Brignole y al Mg. Carlos Eugenio Gigola, por brindarme sus valiosos conocimientos y experiencia profesional. Ellos me han animado y alentado a dar pasos muy importantes en este sendero y me han permitido aprender mucho sobre la investigación.

Por otro lado, le estoy muy agradecida al Departamento de Ingeniería Química, a la Universidad Nacional de Sur, a la Planta Piloto de Ingeniería Química (PLAPIQUI), a la Comisión de Investigaciones Científicas (CIC) y al Concejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), por ofrecerme los medios y herramientas con los cuales hacer esto posible.

Quiero expresar mi agradecimiento a mis padres, Walter y Mónica, por su eterna entrega y capacidad para mantener la ilusión por una meta alcanzable y porque han sido una indudable referencia y guía durante estos años.

Tampoco puedo dejar de agradecer a mi hermano, Gustavo, porque aún desde la distancia he recibido incondicional apoyo y cariño.

Un especial agradecimiento a mi compañero de vida, Ángel, por su incomparable mezcla de paciencia, comprensión, amor y sentido del humor. Confío en poder acompañarte en tus proyectos futuros tal y como tú lo has hecho conmigo. Seguimos caminando juntos.

Finalmente, a todos mis amigos y compañeros, por brindarme su aliento, cariño, compañía y apoyo en este camino.

*Paola P. Oteiza*





## **RESUMEN**

La mayoría de los yacimientos petroleros y gasíferos en el mundo están dispersos y ubicados en zonas remotas, alejadas de los centros de consumo y procesamiento. Por lo tanto, una logística que optimice la ubicación de las líneas de transporte, centros de almacenamiento y plantas de procesamiento del producto final es esencial para maximizar la rentabilidad de la actividad. La factibilidad del potencial uso de la gasolina natural como materia prima petroquímica incentivó nuestro análisis de la logística de distribución de líneas de transporte que permita alcanzar volúmenes de producción adecuados para su posterior transformación en productos de mayor valor.

El objetivo central de esta tesis consiste en aprovechar herramientas computacionales modernas para la optimización del diseño de redes de cañerías. Por consiguiente, en esta investigación hemos incluido el desarrollo de técnicas metaheurísticas, su diseño, aplicación y cuidadosas comparaciones.

Las principales contribuciones de esta tesis son:

- ✓ Desarrollo de un modelo general para el problema de logística de redes de transporte de gasolina natural. El modelo desarrollado es muy relevante en el plano nacional dado que una región elegida como caso de estudio corresponde a la Provincia de Santa Cruz (Argentina) donde existen yacimientos dispersos, los cuales presentan una importante producción de gasolina natural.
- ✓ Análisis comparativo de varias técnicas metaheurísticas de optimización para resolver el problema de diseño óptimo de redes de cañerías.
- ✓ Implementación de nuevas técnicas metaheurísticas para el desarrollo de modelos de optimización. Se adoptó un enfoque estratégico basado en la hibridación de un algoritmo metaheurístico. Simulated Annealing fue implementado y enlazado con

el conocido paquete de software GAMS. De esta forma, se obtuvo el algoritmo híbrido que denominamos SAG (sigla proveniente de: Simulated Annealing with GAMS). El propósito de SAG es encontrar una óptima distribución de la red.

- ✓ Elaboración de un paquete general de software cuyo objetivo es minimizar el costo total de una red de cañerías e identificar la localización estratégica de los nodos concentradores, en los cuales el producto extraído de yacimientos dispersos puede ser almacenado para ser finalmente transportado a plantas de procesamiento. Este diseño también tiene en cuenta las características geográficas de la zona en estudio.
- ✓ El análisis y comparación de desempeño entre los algoritmos Simulated Annealing y Algoritmos Genéticos. Estos algoritmos brindaron buenos resultados con excelentes tiempos de cómputo.
- ✓ Análisis de las respuestas dinámicas de la producción de los yacimientos. En general, la producción de hidrocarburos es afectada por diversas causas, por ejemplo por la explotación de nuevos pozos o por el agotamiento de pozos existentes.
- ✓ Diseño de un sistema de control óptimo del volumen de gasolina natural en el nodo concentrador mediante Algoritmos Genéticos. El objetivo perseguido fue contemplar la dinámica de los pozos y garantizar el suministro a la planta de procesamiento.
- ✓ Empleo de una estrategia paralela que ofrece notables mejoras en cuanto al tiempo de cómputo.

## **ABSTRACT**

Most oil and gas fields are scattered all over the world, being located in remote areas far away from the consumption or processing centers. Therefore, an optimized logistic system for the transport lines, storage centers and product processing plants is essential to maximize industrial profitability. The feasibility of the potential employment of natural gasoline as a petrochemical raw material encouraged our analysis of the logistics of transportation lines that allows reaching suitable production volumes for their further processing into more valuable products.

The main goal of this thesis is to take advantage of modern computing tools to optimize the design of pipeline networks. Therefore, in our research the development of metaheuristic techniques, their design, application and judicious comparison have been included.

The main contributions of this thesis are the following:

- ✓ The development of a general model for the network problem associated to the logistics for natural gasoline transport. This model is particularly relevant at national level since the area that was chosen as a case of study is Santa Cruz province (Argentina) where there are scattered fields in which there is an important production of natural gasoline.
- ✓ The comparison of several metaheuristic techniques for the optimization of pipeline-network design problems.
- ✓ The implementation of new metaheuristic techniques for the development of optimization models. A tactic approach was adopted, which is based on the hybridization of a metaheuristic algorithm. Simulated Annealing was implemented and linked with the well-known GAMS software. Thus, the hybrid algorithm, which we called SAG (Simulated Annealing with GAMS), was obtained aiming at

getting an efficient distribution of pipeline networks for the transportation of liquid hydrocarbons.

- ✓ The preparation of a general software package in order to minimize the total piping costs and to identify strategic locations for the concentrating nodes, where the product extracted from scattered fields can be stored prior to being transported to processing plants. Geographical features of the related region were taken into account in the design.
- ✓ The performance analysis and the algorithmic comparison between Simulated Annealing and Genetic Algorithm were carried out. These algorithms yielded good results with excellent computing times.
- ✓ The analysis of the dynamic responses of field production. Generally, hydrocarbon production is affected by varied causes, for instance by the exploiting of new wells or the exhaustion of existing ones.
- ✓ The design of an optimal control system for the volume of natural gasoline in the concentrating node by means of Genetic Algorithms. The control objective was to contemplate well dynamics in order to ensure the supply to the processing plant.
- ✓ The use of a parallel strategy that offers significant improvements in terms of computing times.

# ÍNDICE

## CONTENIDO DE LA TESIS

RESUMEN .....	ix
ABSTRACT .....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xvii
ÍNDICE DE TABLAS .....	xxi
<b>CAPÍTULO 1:</b> .....	<b>23</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	
1.1 <i>Introducción</i> .....	25
1.2 <i>Gasolina Natural</i> .....	29
1.3 <i>Objetivos</i> .....	32
1.4 <i>Optimización de Redes de Transporte</i> .....	33
1.5 <i>Metodología</i> .....	35
1.5.1 <i>Redes de Cañerías</i> .....	35
1.5.2 <i>Técnicas Metaheurísticas de Optimización</i> .....	36
1.5.2.1 <i>Simulated Annealing</i> .....	40
1.5.2.2 <i>Algoritmos Genéticos</i> .....	41
1.6 <i>Estructura de la Tesis</i> .....	43
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>45</b>
<b>GASOLINA NATURAL PARA LA PRODUCCIÓN DE ETILENO</b>	
2.1 <i>Introducción</i> .....	47
2.2 <i>Materias Primas</i> .....	48
2.3 <i>Análisis de Oferta y Demanda Mundial de Etileno</i> .....	51
2.4 <i>Análisis de Oferta y Demanda de Etileno en Argentina</i> .....	52
2.5 <i>Evaluación Económica y Financiera</i> .....	55
2.6 <i>Integración Vertical y Horizontal</i> .....	60
2.6.1 <i>Mercado de Polietileno, Polipropileno y Aromáticos</i> .....	61
2.6.1.1 <i>Oferta y Demanda Mundial</i> .....	61
2.6.1.2 <i>Oferta y Demanda en Argentina</i> .....	63
2.6.2 <i>Análisis de Precios</i> .....	64
2.7 <i>Evaluación Económica y Financiera de la Planta Integrada</i> .....	66
2.8 <i>Análisis de Sensibilidad</i> .....	67

2.9 Conclusiones .....	68
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>69</b>
<b>SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)</b>	
3.1 Introducción .....	71
3.2 Sistemas de Información Geográfica (SIG) .....	71
3.3 Componentes de un SIG .....	72
3.3.1 Hardware .....	74
3.3.2 Software .....	74
3.3.3 Base de Datos .....	74
3.3.4 Recurso Humano .....	75
3.3.5 Procedimientos .....	75
3.4 gvSIG® .....	76
3.5 Características Geográficas de la Provincia de Santa Cruz .....	77
3.6 Conclusiones .....	81
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>83</b>
<b>DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE CAÑERÍAS</b>	
4.1 Introducción .....	85
4.2 Aplicación de Técnicas Clásicas .....	85
4.3 Análisis FODA .....	88
4.4 Modelo de Transporte de la Gasolina Natural .....	90
4.4.1 Modelo Matemático Mediante Grafos .....	90
4.4.1.1 Metodología .....	92
4.4.1.2 Resultados .....	95
4.4.2 Modelo Matemático Conceptual .....	96
4.4.2.1 Restricciones del Modelo .....	98
4.4.2.2 Resultados .....	99
4.5 Conclusiones .....	101
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>103</b>
<b>OPTIMIZACIÓN DE REDES DE CAÑERÍAS MEDIANTE SIMULATED ANNEALING</b>	
5.1 Introducción .....	105
5.2 Formulación del Problema .....	106
5.2.1 Formulación del Prototipo .....	106
5.2.2 El Bloque “MAIN” .....	107

5.2.2.1	<i>Función Objetivo</i> .....	107
5.2.2.2	<i>Restricciones del Problema</i> .....	110
5.2.3	<i>Desempeño del Prototipo</i> .....	111
5.3	<i>Desarrollo del Optimizador</i> .....	114
5.3.1	<i>Optimizador SAG</i> .....	114
5.3.2	<i>Desempeño del Optimizador</i> .....	115
5.4	<i>Conclusiones</i> .....	120
<b>CAPÍTULO 6</b>	.....	123
<b>TÉCNICAS METAHEURÍSTICAS APLICADAS AL DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE CAÑERÍAS</b>		
6.1	<i>Introducción</i> .....	125
6.2	<i>Formulación Matemática</i> .....	125
6.3	<i>Técnicas Metaheurísticas para el Diseño de Redes de Cañerías</i> .....	129
6.4	<i>Estrategia Computacional</i> .....	130
6.4	<i>Discusión de Resultados</i> .....	130
6.5	<i>Conclusiones</i> .....	135
<b>CAPÍTULO 7</b>	.....	137
<b>DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL SISO MEDIANTE ALGORITMOS GENÉTICOS</b>		
7.1	<i>Introducción</i> .....	139
7.2	<i>Caso de Estudio</i> .....	140
7.3	<i>Modelo Matemático del Sistema a Controlar</i> .....	142
7.4	<i>Sistema a Lazo Abierto</i> .....	145
7.5	<i>Sistema a Lazo Cerrado</i> .....	147
7.5.1	<i>Controladores PI y PID</i> .....	148
7.5.2	<i>Ajuste de Parámetros Mediante Algoritmos Genéticos</i> .....	150
7.6	<i>Evaluación de Desempeño y Resultados</i> .....	152
7.7	<i>Conclusiones</i> .....	156
<b>CAPÍTULO 8</b>	.....	157
<b>DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL MIMO MEDIANTE ALGORITMOS GENÉTICOS</b>		
8.1	<i>Introducción</i> .....	159
8.2	<i>Sistema MIMO</i> .....	161
8.3	<i>Matriz de Ganancias Relativas (RGA)</i> .....	162
8.4	<i>Sistema de Control Realimentado-Anticipativo de un Sistema MIMO</i> .....	165

8.4.1 Ajuste de Controladores Mediante Algoritmos Genéticos .....	165
8.4.2 Evaluación de Desempeño y Resultados .....	169
8.5 Conclusiones .....	174
<b>CAPÍTULO 9</b> .....	<b>177</b>
<b>CONCLUSIONES</b>	
9.1 Conclusiones .....	179
9.2 Principales Contribuciones.....	179
9.3 Trabajos Futuros.....	184
<b>ANEXO A</b> .....	<b>187</b>
<b>ANEXO B</b> .....	<b>189</b>
<b>ANEXO C</b> .....	<b>191</b>
<b>ANEXO D</b> .....	<b>192</b>
<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>203</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: <i>Cuencas y principales yacimientos</i> .....	27
Figura 1.2: <i>Principales plantas y cuencas de obtención de gasolina natural en Argentina</i> ...	29
Figura 1.3: <i>Producción de gasolina natural proveniente de las diferentes cuencas</i> .....	30
Figura 1.4: <i>Producción de gasolina natural proveniente de las plantas de tratamiento</i> .....	30
Figura 1.5: <i>Separación Primaria</i> .....	31
Figura 1.6: <i>Separación Secundaria</i> .....	32
Figura 1.7: <i>Pseudoalgoritmo de Simulated Annealing</i> .....	41
Figura 1.8: <i>Pseudoalgoritmo de Algoritmo Genético</i> .....	43
Figura 2.1: <i>Materias primas para producción de etileno a nivel mundial</i> .....	49
Figura 2.2: <i>Adición de capacidad de etileno por región</i> .....	52
Figura 2.3: <i>Balanza comercial de etileno en toneladas</i> .....	53
Figura 2.4: <i>Oferta, consumo aparente y potencial de etileno: Escenario 1</i> .....	54
Figura 2.5: <i>Oferta, consumo aparente y potencial de etileno: Escenario 2</i> .....	55
Figura 2.6: <i>Oferta y demanda de polietileno a nivel mundial</i> .....	62
Figura 2.7: <i>Oferta y demanda de polipropileno a nivel mundial</i> .....	62
Figura 2.8: <i>Evolución de la oferta y demanda de polietileno y polipropileno en Argentina</i> ..	63
Figura 2.9: <i>Precio medio de mercado interno y de exportación de gasolina natural</i> .....	65
Figura 2.10: <i>Precios de exportación de productos</i> .....	65
Figura 2.11: <i>Análisis de sensibilidad</i> .....	67
Figura 3.1: <i>Componentes de un SIG</i> .....	73
Figura 3.2: <i>Visualización de la herramienta gvSIG®</i> .....	77
Figura 3.3: <i>Ríos y rutas en la provincia de Santa Cruz</i> .....	78
Figura 3.4: <i>Grilla de nodos concentradores</i> .....	79
Figura 3.5: <i>Alturas Absolutas de la provincia de Santa Cruz (Gonzales y Rial 2003)</i> .....	80
Figura 3.6: <i>Ejemplo sobre el análisis de las características geográficas</i> .....	81
Figura 4.1: <i>Resultados de los métodos centro de gravedad y exacto de la cuadrícula</i> .....	87
Figura 4.2: <i>Gráfico obtenido el análisis FODA</i> .....	89
Figura 4.3: <i>Resumen y clasificación de las consideraciones</i> .....	90
Figura 4.4: <i>Ubicación de los nodos <math>S_i</math> y de los posibles nodos finales <math>S_o</math></i> .....	92
Figura 4.5: <i>Grafo con <math>S_o</math> en Río Gallegos (Estado 1) y nodo concentrador <math>N_k</math></i> .....	93
Figura 4.6: <i>Grafo con <math>S_o</math> en Puerto Santa Cruz (Estado 2a) y nodo concentrador <math>N_k</math></i> .....	93

Figura 4.7: Grafo con $S_o$ en Puerto Santa Cruz (Estado 2b) y nodo concentrador $N_k$ .....	94
Figura 4.8: Ángulos de un yacimiento con respecto al nodo concentrador y la planta .....	99
Figura 4.9: Ángulos para la multiplicidad de yacimientos.....	99
Figura 4.10: Ubicación del nodo Concentrador $N_k$ en el Estado E1.....	100
Figura 4.11: Ubicación del nodo Concentrador $N_k$ en el Estado E2b.....	101
Figura 5.1: Diagrama de flujo del optimizador .....	107
Figura 5.2: Representación gráfica de una infraestructura típica de yacimientos .....	108
Figura 5.3: Red de cañerías óptima para cada caso de estudio .....	112
Figura 5.4: Distribución de la red de la Alternativa A .....	117
Figura 5.5: Red de cañerías óptima para el Ejemplo 1 .....	118
Figura 5.6: Red de cañerías óptima para el Ejemplo 2 .....	119
Figura 5.7: Convergencia de SAG .....	120
Figura 6.1: Representación de la solución .....	131
Figura 6.2: Comparación del desempeño de los algoritmos .....	133
Figura 6.3: Distribución de la red de cañerías óptima.....	135
Figura 7.1: Distribución de la red de cañerías extraída de la Figura 5.4 .....	141
Figura 7.2: Esquema simplificado de la red de transporte .....	141
Figura 7.3: Sistema a controlar .....	142
Figura 7.4: Diagrama del sistema sin control .....	145
Figura 7.5: Respuesta del sistema a lazo abierto considerando como variable de salida $F_3$ .....	146
Figura 7.6: Diagrama del sistema sin control .....	146
Figura 7.7: Respuesta del sistema a lazo abierto considerando como variable de salida $h$ .....	147
Figura 7.8: Diagrama del sistema SISO con control PID .....	148
Figura 7.9: Diagrama del sistema SISO con control PI .....	148
Figura 7.10: Representación del individuo .....	150
Figura 7.11: Diagrama de bloques de cada iteración del Algoritmo Genético con Simulink .....	152
Figura 7.12: Respuesta a un escalón del controlador PI diseñado por Z-N .....	153
Figura 7.13: Respuesta a un escalón del controlador PID diseñado por Z-N .....	153
Figura 7.14: Comportamiento de la función de aptitud.....	154
Figura 7.15: Respuesta bajo control PI diseñado con el Algoritmo Genético .....	155
Figura 7.16: Respuesta bajo control PID diseñado con el AG .....	155
Figura 8.1: Sistema de control Realimentado-Anticipativo integrado.....	162

---

Figura 8.2: <i>Diagrama de bloques de la propuesta</i> .....	166
Figura 8.3: <i>Representación del individuo</i> .....	166
Figura 8.4: <i>Cruzamiento Punto Simple</i> .....	167
Figura 8.5: <i>Cruzamiento Dos Puntos</i> .....	168
Figura 8.6: <i>Cruzamiento Scattered</i> .....	168
Figura 8.7: <i>Diagrama de bloques de cada iteración del Algoritmo Genético con Simulink</i> .	169
Figura 8.8: <i>Diagrama de caja vertical para los cruzamientos Heurístico y Scattered</i> .....	171
Figura 8.9: <i>Diagrama de Algoritmo Genético Paralelo</i> .....	172
Figura 8.10: <i>Respuestas a una perturbación escalón para cruzamiento Heurístico</i> .....	174
Figura 8.11: <i>Respuestas a una perturbación escalón para cruzamiento Scattered</i> .....	174
Figura D.1: <i>Diagrama de caja vertical para cruzamiento Dos Puntos</i> .....	198
Figura D.2: <i>Diagrama de caja vertical para cruzamiento Simple Puntos</i> .....	198
Figura D.3: <i>Diagrama de caja vertical para cruzamiento Intermedio</i> .....	199
Figura D.4: <i>Diagrama de caja vertical para cruzamiento Aritmético</i> .....	199



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: <i>Producción de gasolina natural durante el año 2014</i> .....	28
Tabla 2.1: <i>Parámetros económicos</i> .....	53
Tabla 2.2: <i>Flujo neto de caja</i> .....	66
Tabla 4.1: <i>Factores ponderados</i> .....	88
Tabla 4.2: <i>Producción de Gasolina Natural y Gas Natural en la Cuenca Austral</i> .....	91
Tabla 4.3: <i>Distancias entre los yacimientos y las plantas [Km]</i> .....	91
Tabla 4.4: <i>Valoración para el Estado 1</i> .....	95
Tabla 4.5: <i>Valoración para el Estado 2a</i> .....	95
Tabla 4.6: <i>Valoración para el Estado 2b</i> .....	96
Tabla 4.7: <i>Resultados de la variable x para el Estado E1</i> .....	100
Tabla 4.8: <i>Resultados de la variable x para el Estado E2b</i> .....	101
Tabla 5.1: <i>Resultados obtenidos para cada configuración de nodos</i> .....	113
Tabla 5.2: <i>Costos y distancias para cada alternativa planteada para el ejemplo 1</i> .....	116
Tabla 5.3: <i>Costos y distancia cubierta por las redes óptimas para el Ejemplo 1 con nodos en <math>N_6</math> y <math>N_{24}</math></i> .....	117
Tabla 5.4: <i>Costos distancia cubierta por las redes óptimas para el Ejemplo 2</i> .....	119
Tabla 6.1: <i>Configuración de parámetros para el Algoritmo Genético</i> .....	133
Tabla 6.2: <i>Configuración de parámetros para Simulated Annealing</i> .....	133
Tabla 6.3: <i>Resultados computacionales para cada algoritmo</i> .....	134
Tabla 7.1: <i>Dimensiones del tanque</i> .....	142
Tabla 7.2: <i>Parámetros de los controladores</i> .....	153
Tabla 8.1: <i>Configuración de parámetros para el Algoritmo Genético</i> .....	167
Tabla 8.2: <i>Resultados obtenidos para cada cruzamiento</i> .....	170
Tabla 8.3: <i>Parámetros de los controladores obtenidos para cada cruzamiento</i> .....	170
Tabla 8.4: <i>Resultados obtenidos del Algoritmo Genético paralelo</i> .....	173
Tabla 8.5: <i>Parámetros de los controladores obtenidos para cada cruzamiento</i> .....	173
Tabla A.1: <i>Distancias obtenida en gvSIG® [Km]</i> .....	187
Tabla A.2: <i>Diferencia de alturas entre yacimientos, nodos y plantas obtenida en gvSIG® [m]</i> .....	188
Tabla B.1: <i>Distancias obtenida en gvSIG® [Km]</i> .....	189

Tabla B.2: <i>Costos de construcción de cada camino <math>e_{ij}</math> [US\$/t]</i> .....	190
Tabla C.1: <i>Parámetros de los controladores para cada corrida</i> .....	191
Tabla D.1: <i>Parámetros obtenidos para cruzamiento Scattered (30 corridas)</i> .....	192
Tabla D.2: <i>Parámetros obtenidos para cruzamiento Dos Puntos (30 corridas)</i> .....	193
Tabla D.3: <i>Parámetros obtenidos para cruzamiento Simple Punto (30 corridas)</i> .....	194
Tabla D.4: <i>Parámetros obtenidos para cruzamiento Intermedio (30 corridas)</i> .....	195
Tabla D.5: <i>Parámetros obtenidos para cruzamiento Heurístico (30 corridas)</i> .....	196
Tabla D.6: <i>Parámetros obtenidos para cruzamiento Aritmético (30 corridas)</i> .....	197
Tabla D.7: <i>Parámetros obtenidos para cruzamiento Heurístico en paralelo (30 corridas)</i> .	200
Tabla D.8: <i>Parámetros obtenidos para cruzamiento Scattered en paralelo (30 corridas)</i> ...	201

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

---

### *Contenido del Capítulo*

En este capítulo se presentan los incentivos para investigar técnicas metaheurísticas aplicables al diseño óptimo de redes de cañerías que permitan el transporte de gasolina natural. Se realiza una introducción sobre la complejidad del problema y se justifica la necesidad del presente trabajo.

Se definen los objetivos perseguidos, la metodología y los medios utilizados para lograr las metas deseadas. Finalmente, se muestra la forma en que está organizada esta tesis, con una breve explicación de cada capítulo.





## **1.1 Introducción**

En Argentina existen 19 cuencas sedimentarias, con una superficie total de aproximadamente 1.750.000 km<sup>2</sup>. Actualmente sólo las siguientes cinco cuencas producen hidrocarburos: Noroeste, Cuyana, Neuquina, Golfo de San Jorge y Austral. Estas cuencas tienen gran cantidad de pozos productivos de gas y petróleo que se encuentran ubicados lejos de las plantas de procesamiento o centros de consumo.

La Cuenca Austral abarca la provincia de Santa Cruz, Tierra del Fuego y una porción de la plataforma continental argentina. Mientras que la Cuenca Golfo San Jorge comprende la zona meridional de la provincia del Chubut, la parte norte de la provincia de Santa Cruz y gran parte de la plataforma continental argentina en el Golfo San Jorge. Las reservas comprobadas al año 2013 de estas cuencas son de 13.559 Mm<sup>3</sup> de petróleo y 110.355 MMm<sup>3</sup> de gas en la Cuenca Austral y de 251.163 Mm<sup>3</sup> de petróleo y 47.849 MMm<sup>3</sup> de gas para la Cuenca Golfo San Jorge (Secretaría de Energía, 2015a).

En la Figura 1.1 se observa que en la provincia de Santa Cruz se encuentra parte de las cuencas Austral y Golfo San Jorge, destacándose yacimientos importantes como Pico Truncado, Cañadón Seco, Cañadón León, Barda las Vegas, Campo Boleadoras Este y Campo Bremen entre otros. Se estudió el estado de los yacimientos (agotados, tapados, etc.), su producción, el estado de explotación de nuevos yacimientos y la ubicación exacta de los mismos. Durante el año 2014 esta provincia aportó aproximadamente el 22 % de la producción de petróleo y el 9% de la de gas del país (Secretaría de Energía, 2015b). En base a la producción de gas, se seleccionaron los yacimientos en los cuales, se distingue una producción secundaria de gasolina natural (Tabla 1.1). Actualmente la gasolina natural no es aprovechada en nuestro país, se mezcla y transporta con el crudo o es acumulada en los

yacimientos. Por lo tanto, se justifica la elaboración detallada de un modelo de transporte ad hoc.

Se seleccionaron dos posibles puntos geográficos para la localización de la planta de procesamiento teniendo en cuenta fundamentalmente la necesidad de disponer de facilidades para el transporte marítimo, de energía y de agua. Los puntos escogidos son: Puerto Santa Cruz y Río Gallegos (Figura 1.1). En Río Gallegos se encuentra el Puerto Punta Loyola que actualmente exporta los productos primarios de los yacimientos. Por otra parte, en Puerto Santa Cruz hay proyectos industriales que harán que la exportación sea viable gracias al crecimiento industrial de la zona.

Como se puede observar en la Figura 1.1 los yacimientos seleccionados se encuentran agrupados en dos grandes grupos y alejados de las potenciales localizaciones de la planta. Por lo tanto, se obtuvieron las distancias entre los yacimientos y las plantas. Con este estudio, se pudo analizar la localización de los centros de almacenamiento y de las líneas de transporte hacia la planta de procesamiento.

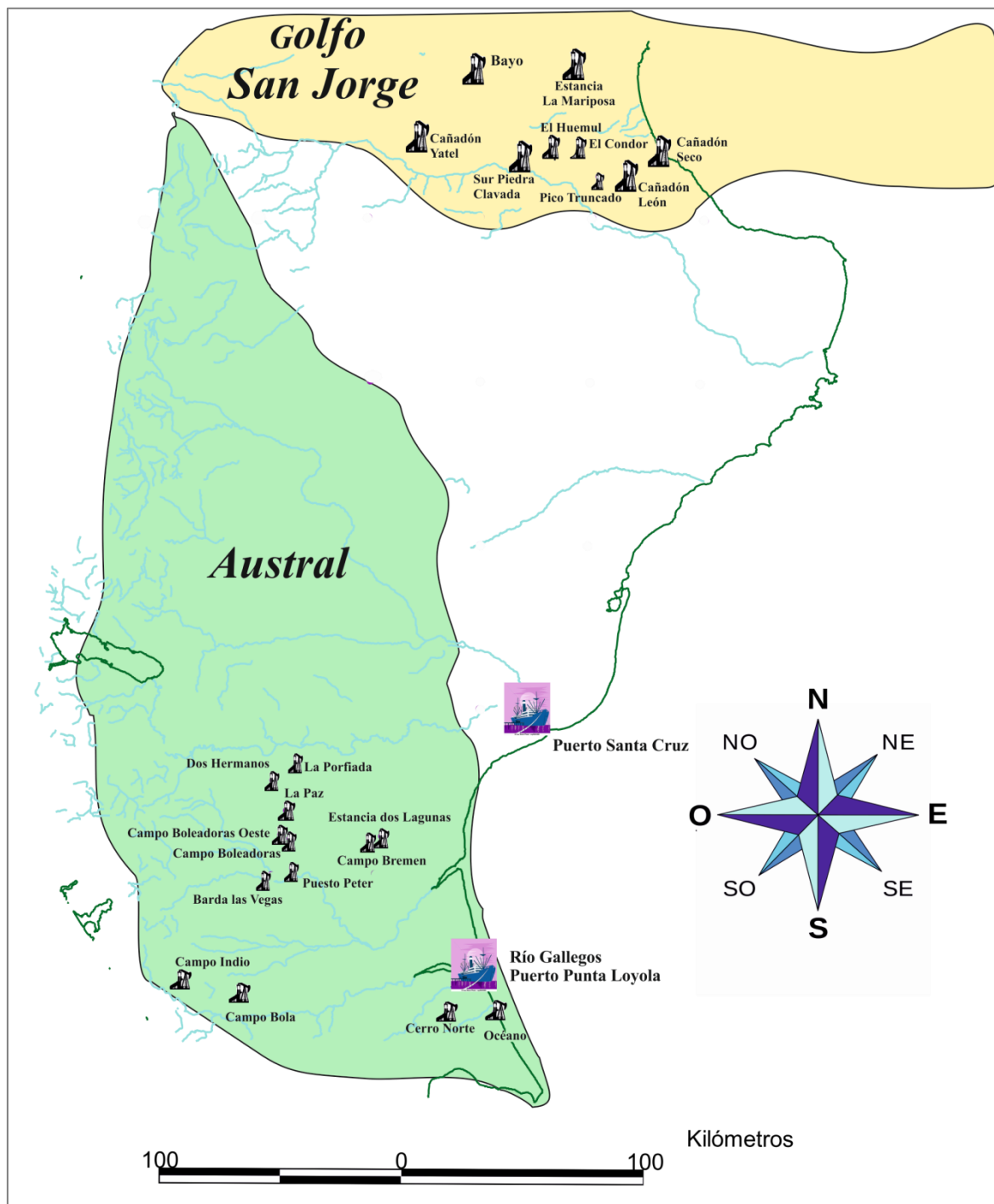


Figura 1.1: Cuencas y principales yacimientos

Cuenca	Yacimientos	Producción [m <sup>3</sup> ]
Austral	Cerro Norte	3033
	Océano	4487
	Campo Bola	5762
	Campo Indio	14464
	Barda la Vegas	414
	Campo Bremen	929
	Puesto Peter	3620
	Estancia dos Lagunas	1615
	Campo Boleadora	708
	Campo Boleadora Oeste	9972
	La Paz	7661
	Dos Hermanos	208
	La Porfiada	1234
Golfo San Jorge	Sur Piedra Clavada	8482
	Pico Trucado	1978
	Cañadón León	7739
	Cañadón Yatel	16224
	El Huemul	14300
	El Cóndor	3432
	Cañadón Seco	7104
	Bayo	954
	Estancia la Mariposa	4382

**Tabla 1.1:** Producción de gasolina natural durante el año 2014

Cabe destacar que no existen líneas de transporte específicas para gasolina natural en la provincia de Santa Cruz. En algunos casos, su transporte debe realizarse desde los yacimientos donde se producen hacia aquellos que están conectados a oleoductos. En estos casos, este traslado se efectúa por camiones, lo cual es riesgoso teniendo en cuenta las condiciones climáticas de la región. Por lo tanto, es esencial diseñar y localizar líneas de

transporte, ubicar centros de almacenamiento y plantas con el fin de aprovechar la gasolina natural como materia petroquímica y brindar condiciones de mayor seguridad operativa.

Por otra parte, la producción de gasolina natural puede ser afectada por diversas causas. Por ejemplo, por la explotación de nuevos pozos o por el agotamiento de pozos existentes. Por lo tanto, es necesario tener en cuenta esta dinámica en el modelo de transporte. Un desafío de este diseño es establecer los parámetros necesarios de un control óptimo en el tanque de almacenamiento para lograr una coordinación eficiente de suministros y garantizar el abastecimiento a la planta de procesamiento. Se necesita minimizar los costos fijos y operativos de la red de transporte y al mismo tiempo maximizar la disponibilidad de materia prima. Esto implica plantear un problema multi-objetivo dinámico.

## 1.2 Gasolina Natural

En Argentina existen importantes fuentes de obtención de gasolina natural. En la Figura 1.2 se muestran las principales plantas y cuencas de las cuales se obtiene la misma.



**Figura 1.2:** Principales plantas y cuencas de obtención de gasolina natural en Argentina

En la Figura 1.3 se observa la producción total de gasolina natural proveniente de las cuencas productoras de gas y petróleo de los años 2008-2013. Por otra parte, en la Figura 1.4 se reporta la producción de gasolina natural en toneladas proveniente de las principales plantas de acondicionamiento de gas natural en el mismo periodo (IPA, 2013; 2014). Se puede observar una declinación de la producción de gasolina natural en las empresas Mega S.A. y Refinor ligada a la disminución de la producción de gas natural (Secretaría de Energía, 2015b).

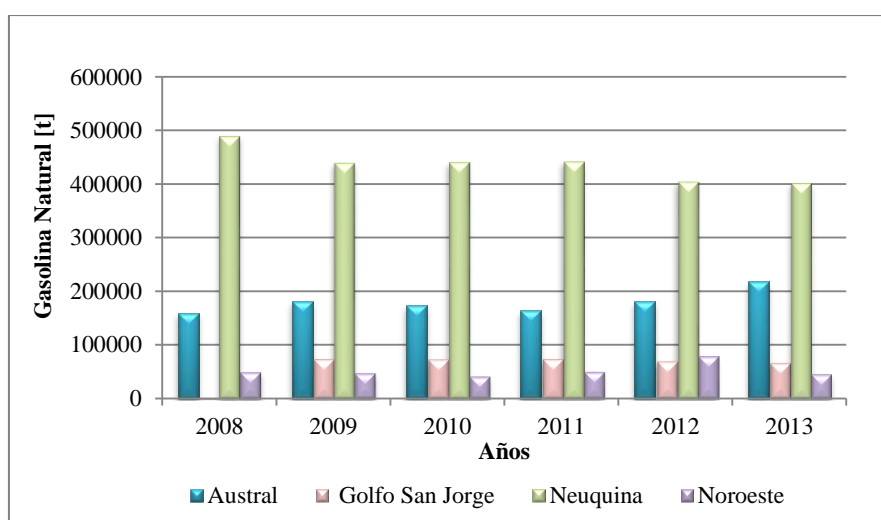


Figura 1.3: Producción de gasolina natural proveniente de las diferentes cuencas

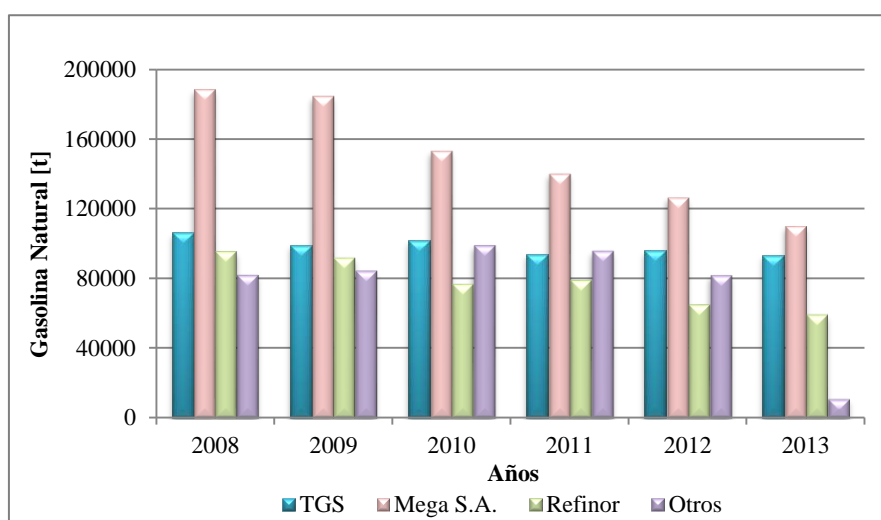
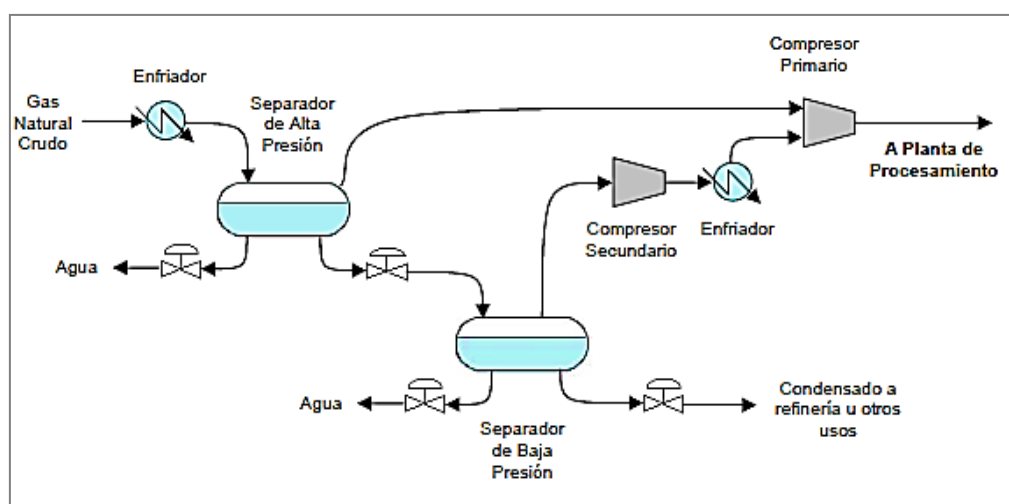


Figura 1.4: Producción de gasolina natural proveniente de las plantas de tratamiento

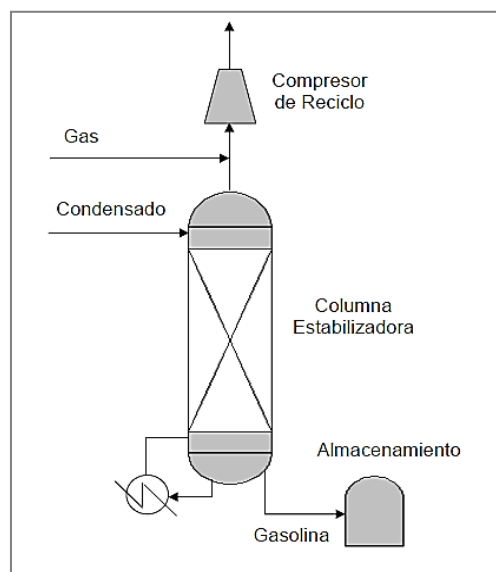
La capacidad de producción total de gasolina natural en nuestro país es aproximadamente 1.2 MMT/año (IPA, 2013; 2014). De la producción total en las plantas de acondicionamiento de gas natural aproximadamente el 20% es exportada como materia prima. El destino de la producción restante permanece sin reportar. Se presume que dicha fracción se mezcla con el crudo.

La gasolina natural se obtiene como producción secundaria de yacimientos de gas húmedo. El gas emerge de los pozos al disminuir su presión y temperatura y por el fenómeno de condensación retrógrada permite separar una fracción líquida (condensados) constituida por propano, butano, pentano e hidrocarburos superiores. En la Figura 1.5 se muestra esta separación en boca de pozo denominada Separación Primaria.



**Figura 1.5:** Separación Primaria

El condensado obtenido tiene alta volatilidad y para facilitar el manejo y el transporte es necesario reducirla. Por lo tanto, se realiza la estabilización, que consiste en el despojo (en Inglés: Stripping) de los hidrocarburos livianos (propano y butano). De esta forma se obtiene una fracción líquida denominada gasolina natural. En la Figura 1.6 se puede observar el proceso de despojo denominada Separación Secundaria (Kidnay y Parrish, 2006).



**Figura 1.6:** Separación Secundaria

En principio, la gasolina natural se podría utilizar como materia prima para la obtención de etileno-propileno por craqueo térmico, a partir de los cuales se obtienen polietileno y polipropileno. Hemos demostrado que la gasolina natural constituye un sustituto atractivo para la producción de etileno en Argentina (Cañete *et al.*, 2012), lo que da mayor justificación al presente estudio. Actualmente, para que un proyecto petroquímico resulte económicamente atractivo es necesario considerar la instalación de plantas de gran escala. Esto implica que la disponibilidad de grandes volúmenes de materia prima es esencial. Por lo tanto, la interconexión de los distintos yacimientos con la eventual planta petroquímica debe ser analizada mediante procedimientos modernos que optimicen el transporte, minimicen las inversiones y además tengan en cuenta la paulatina declinación de los pozos y/o el potencial agregado de nuevas fuentes de producción

### 1.3 Objetivos

El objetivo general de esta tesis es generar conocimiento sobre técnicas de trazado óptimo de líneas de transporte de hidrocarburos líquidos desde yacimientos remotos hacia plantas de proceso.



Se analizará la logística y el diseño óptimo de líneas de transporte de hidrocarburos líquidos que permitirán alcanzar volúmenes de producción adecuados para su posterior transformación en productos de mayor valor.

Se pretende alcanzar los siguientes objetivos específicos:

- ✓ Optimizar la ubicación y el diseño de líneas de transporte de gasolina natural para ser empleada como materia prima petroquímica, considerando yacimientos de gas y la posible localización de plantas en la provincia de Santa Cruz.
- ✓ Incorporar la dinámica de los yacimientos mediante un sistema de control de volumen en los nodos concentradores para garantizar el suministro a la eventual planta de procesamiento.

Con este propósito se planifica contribuir al desarrollo de un paquete integrado y robusto para la optimización rigurosa del recorrido de redes de transporte, tanto en estado estacionario como dinámico.

#### ***1.4 Optimización de Redes de Transporte***

Existe gran variedad de problemas relacionados con el transporte de hidrocarburos que han sido abordados con diversas técnicas de optimización. Buchanan *et al.* (1990) proponen una metodología basada en la aplicación de programación matemática para estudiar diferentes alternativas de inversión. Por su parte, Van der Heever *et al.* (2001) elaboran un modelo para determinar el número de cada tipo de plataformas que se deben instalar, así como sus capacidades y el grado de comunicación con el resto del sistema mediante gasoductos. En este caso, se decide trabajar con los perfiles no lineales de presión, aproximándolos con funciones cuadráticas o cúbicas. El modelo matemático resultante es de carácter mezcla-entera no lineal (MINLP), aplicado a múltiples períodos. Se demuestra en este trabajo que el agregado de reglas fiscales complejas incrementa notablemente el Valor

Presente Neto del proyecto. Adicionalmente, se presenta un algoritmo heurístico basado en el concepto para de descomposición Lagrangiana aplicado a un caso de Estados Unidos. La función objetivo que se minimiza incluye diferentes tipos de costos fijos y operativos, impuestos, tarifas, ingresos, etc. Otro enfoque (Hernán-González *et al.*, 2009) no lineal importante que contempla factores dinámicos consiste en el planteo de un modelo dinámico mediante un sistema de ecuaciones diferenciales parciales.

En general, todos estos enfoques presentan severas limitaciones prácticas en términos de tiempo de cómputo y de adaptación a problemas locales, cuya correcta aplicación implicaría además un trabajo adicional: el desarrollo de un modelo económico que se acomode a la realidad local. Es interesante destacar que Iyer y Grossmann (1998) usaron programación lineal con buenos resultados para un modelo económico diferente al planteado por Van der Heever *et al.* (2001). Si bien los perfiles de presión son funciones no lineales con la cantidad de petróleo/gas acumulada que fue extraída, en el artículo se realiza en todos los períodos una línealización de estos perfiles mediante interpolación por partes. El modelo es entonces de tipo lineal mixto-entero.

La logística de los hidrocarburos es un tema muy amplio y de difícil generalización, con respecto al cual las técnicas de optimización elegidas pueden variar de acuerdo al enfoque. Las decisiones relacionadas con estos problemas de optimización se pueden clasificar en estratégicas, tácticas y operativas (Bilgen y Ozkarahan, 2004).

Los trabajos relativos a decisiones estratégicas consideran el problema como de planificación a largo plazo con incertidumbre, demandas, consumos esperados e inversiones que varían a lo largo del tiempo con niveles de riesgo variables que deben ser tenidos en cuenta. Por ende, la definición del horizonte de planeamiento está íntimamente relacionada con las variables elegidas. En estos casos, algunos autores (Tarhan *et al.*, 2009) han empleado técnicas estocásticas con éxito. Kabirian y Reza Hemmati (2007) realizaron un modelado

estratégico integrado con búsquedas heurísticas en el entorno real de Irán, mientras que García Sánchez (2007) planteó el problema de programación mediante una técnica metaheurística con un motor de búsqueda tabú para España. Así, la naturaleza del problema es significativamente diferente según las características del decisor y el entorno donde opera la red de transporte.

Con respecto a las decisiones operativas, las tareas de planificación y programación de las operaciones son relevantes y se refieren a un horizonte temporal breve. Un ejemplo de este tipo de decisiones se encuentra en Cafaro *et al.* (2011), donde presentaron una formulación mixta entera lineal de tiempo continuo novedosa para la planificación de las operaciones a corto plazo de los sistemas de cañerías. Por otra parte, Rejowski y Pinto (2003) propusieron una programación mixta entera lineal para la programación de un sistema de distribución de productos.

Por último, las decisiones tácticas se encuentran entre las decisiones estratégicas y operacionales en cuanto al tiempo de horizonte. Neiro y Pinto (2004) formularon un MINLP para abordar el problema de la planificación de la cadena logística del petróleo desde el punto de vista táctico, incorporando todos los elementos de transporte.

## **1.5 Metodología**

### **1.5.1 Redes de Cañerías**

En la literatura se ha abordado una gran variedad de trabajos que tratan el diseño de redes de cañerías. En algunos casos, las redes de cañerías ya están instaladas y se debe determinar el uso más rentable. Por ejemplo, Boschetto *et al.* (2011) propusieron un modelo genérico de planificación operativa mixto-entero lineal que optimiza el volumen de productos y la dirección del flujo en cañerías existentes, con el fin de alcanzar los objetivos de almacenamiento teniendo en cuenta la demanda de los consumidores. En contraste, Cafaro *et*

*al.* (2011) presentaron una nueva formulación para la planificación operacional a corto plazo de cañerías con estructura en forma de árbol, con el objetivo de encontrar la óptima diagramación de bombas y distribución de productos que minimicen los costos operativos. Así, en los modelos denominados de planificación y diagramación también está incluido el diseño de redes de cañerías. Por su parte, Moura *et al.* (2008) propusieron un nuevo algoritmo combinatorio híbrido que combina estrategias constructivas heurísticas con un modelo de programación con restricciones.

En muchos casos el problema de diseño de redes se refiere a la determinación de su topología, es decir básicamente a la configuración de las conexiones entre nodos. Esto está relacionado con varios factores, tales como la distancia entre nodos, conexiones físicas, velocidad de transmisión y propiedades de los fluidos. Por ejemplo, Andre *et al.* (2013) consideraron en un único modelo de optimización la topología y dimensionamiento de cañerías para el transporte de hidrógeno en estado gaseoso. En cambio, en De la Cruz *et al.* (2003) se abordó la optimización de la topología para redes de oleoductos, mientras Adb-El-Barr (2009) ha cubierto otro campo de aplicación: las clásicas redes de comunicación.

Dada la importancia y complejidad de estos problemas se han presentado numerosos trabajos de optimización cuyos algoritmos abordan numerosos objetivos a la vez y, en consecuencia, demandan importantes tiempos de cómputo. Por lo tanto, las técnicas metaheurísticas empleadas en la optimización son una alternativa de gran interés computacional.

### ***1.5.2 Técnicas Metaheurísticas de Optimización***

Existen muchos escenarios científicos e industriales que pueden formularse como problemas de optimización. Por ejemplo, puede ser necesario minimizar tiempos, costos o riesgos, o maximizar beneficios, calidad o eficiencia. Una gran cantidad de los problemas de

optimización que se presentan en ingeniería y economía suelen ser difíciles de resolver, siendo a veces imposible su resolución en forma exacta en un tiempo razonable. En estos casos, una alternativa moderna consiste en recurrir a algoritmos heurísticos que proveen "buenas soluciones", útiles en la práctica y con tiempos aceptables.

Estos algoritmos pueden ser heurísticos o metaheurísticos implementados en forma totalmente general o específica, es decir especialmente diseñados para un problema en particular. Las técnicas metaheurísticas (Glover y Kochenberger, 2003), son estrategias iterativas que guían el proceso de búsqueda, son algoritmos no exactos y generalmente son no deterministas. La palabra heurística proviene de una palabra griega con un significado relacionado con el concepto de encontrar. El término heurístico se usa para referirse a un procedimiento que trata de aportar soluciones a un problema con un buen rendimiento, en lo referente a la calidad de las soluciones (robustez) y a los recursos empleados (eficiencia). El prefijo meta también proviene del griego que significa adyacente y en este caso se refiere a algoritmos que están cerca de las heurísticas. Las técnicas metaheurística son una buena alternativa cuando no existe un método exacto de resolución o existe un método exacto pero que consume demasiado tiempo para ofrecer la solución óptima, cuando surgen limitaciones de tiempo o se necesita un paso intermedio para obtener una solución inicial para la aplicación de otra técnica. Por lo tanto, las metaheurísticas son estrategias inteligentes para diseñar o mejorar procedimientos heurísticos muy generales con un alto rendimiento.

Estas técnicas son procedimientos de búsqueda que no garantizan la obtención del óptimo global del problema y se basan en la aplicación de reglas relativamente sencillas. A diferencia de los heurísticos, las técnicas metaheurísticas tratan de huir de óptimos locales orientando la búsqueda en cada momento dependiendo de la evolución del proceso de búsqueda.

Con respecto a la estrategia de búsqueda, una característica que debería ser común a toda buena metaheurística consiste en un balance entre un proceso de intensificación para explotar el espacio de búsqueda en las cercanías de una solución de buena calidad y un proceso de diversificación para explorar diversas regiones del espacio de búsqueda. El balance entre exploración y explotación afectará directamente la calidad de la solución encontrada y el tiempo utilizado para obtenerla.

Las técnicas metaheurísticas incluyen los siguientes algoritmos: colonias de hormigas, algoritmos evolutivos, búsqueda local, Simulated Annealing y búsqueda tabú. Estas técnicas se pueden clasificar en dos grupos: basadas en trayectoria y en población. Los métodos basados en trayectoria manipulan en cada paso un único elemento del espacio de búsqueda. La principal característica de estos métodos es que parten de una solución y, mediante la exploración de soluciones similares en el espacio de búsqueda, van actualizando la solución actual, formando una trayectoria. Por otra parte, los métodos basados en población trabajan en cada iteración con un conjunto de soluciones, usualmente denominado población. De esta forma, los algoritmos basados en población proveen una forma natural e intrínseca de explorar el espacio de búsqueda.

La aplicación de las técnicas metaheurísticas es especialmente interesante en problemas de optimización combinatoria (Blum y Roli, 2003). En estos problemas las variables de decisión son enteras (o al menos discretas) en las que, generalmente, el espacio de soluciones está formado por un conjunto de valores de dichas variables. Sin embargo, se pueden aplicar también a problemas de otro tipo, como con variables continuas.

La lógica de las técnicas metaheurísticas es similar: el punto de partida es una solución (o conjunto de soluciones) que típicamente no es óptima. A partir de ella se obtienen otras similares, de entre las cuales se elige una que satisface algún criterio, a partir de la cual

comienza de nuevo el proceso. Este proceso se detiene cuando se cumple un criterio de convergencia establecido.

Estos recursos consisten en sistematizar ideas para desarrollar algoritmos eficientes que encuentren soluciones satisfactorias para problemas de optimización de gran importancia práctica. Los cuales, en la mayoría se denominan NP-duros debido a su dificultad para encontrar una solución óptima (Leeuwen, 1998). Por ser simples, muy eficientes y relativamente fáciles de diseñar e implementar, estas técnicas también son útiles cuando se desea resolver problemas cuyo modelo matemático es de difícil formulación.

Últimamente varias técnicas metaheurísticas se han desarrollado exitosamente con fines variados. Marcoulaki *et al.* (2012) presentaron un marco de optimización basado en la optimización estocástica para el diseño de las cañerías y de los equipos empleados para la transmisión de fluido. A su vez, Sahinidis (2004) .presentó un breve resumen de optimización estocástica. Analizó y contrastó diversas filosofías relevantes de modelado, como la programación estocástica robusta, programación probabilística y programación dinámica estocástica. Luego Rios y Sahinidis (2013) presentaron una revisión de algoritmos derivados libres, seguido de una comparación sistemática de 22 implementaciones relacionadas utilizando un conjunto de prueba de 502 problemas. Considerando problemas convexos y no-convexos. Por otra parte, Osiadacz y Górecki (1995) realizaron un estudio exhaustivo de la optimización de redes de distribución de agua y gas mediante métodos heurísticos, procedimientos exactos que consideran la posibilidad de diámetros continuos y métodos de optimización discretos. Recientemente, André *et al.* (2013) resolvieron el problema de diseño de una red de transmisión de hidrógeno por medio de un método de búsqueda local y lo compararon con su propio procedimiento con la heurística de búsqueda Tabú.

En esta tesis, se utilizan dos técnicas modernas metaheurísticas: Simulated Annealing y Algoritmos Genéticos, para lograr el objetivo general perseguido.

### 1.5.2.1 *Simulated Annealing*

El algoritmo Simulated Annealing es un método de búsqueda por entornos caracterizado por un criterio probabilístico de aceptación de soluciones vecinas basado en termodinámica que se adapta a lo largo de su ejecución (Kirkpatrick *et al.*, 1983). Hace uso de una variable llamada Temperatura ( $T$ ) cuyo valor determina en qué medida pueden ser aceptadas soluciones vecinas peores que la actual. La variable  $T$  se inicializa a un valor alto, denominado Temperatura inicial ( $T_0$ ) y se va reduciendo en cada iteración mediante un mecanismo de enfriamiento hasta alcanzar una Temperatura final ( $T_f$ ). En cada iteración se genera un número concreto de vecinos, que puede ser fijo para toda la ejecución o depender de la iteración. Cada vez que se genera un vecino, se aplica el criterio de aceptación para evaluar si sustituye a la solución actual. Si la solución vecina es mejor que la actual, se acepta automáticamente, tal como se haría en la búsqueda local clásica. En cambio, si es peor, aún existe la probabilidad de que el vecino sustituya a la solución actual. Esto permite al algoritmo salir de óptimos locales, en los que en la búsqueda local clásica quedaría atrapada. Esta probabilidad (Ec. 1.1) depende de la diferencia entre la solución actual y la vecina ( $\delta$ ) y  $T$ :

$$P_{\text{aceptación}} = e^{-\frac{\delta}{T}} \quad (\text{Ec. 1.1})$$

A mayor temperatura, mayor probabilidad de aceptación de soluciones peores. Así, el algoritmo acepta soluciones mucho peores que la actual al principio de la ejecución (exploración) pero no al final (explotación). A menor diferencia ( $\delta$ ), mayor probabilidad de aceptación de soluciones peores. Una vez finalizada la iteración, es decir, tras generar soluciones vecinas, se enfría la temperatura y se pasa a la siguiente iteración. En la Figura 1.7 se puede observar el pseudoalgoritmo de Simulated Annealing.



<b>Procedimiento del Simulated Annealing (<math>T_0</math>, Iter, Cad)</b>	
$Temp = T_0$	% La temperatura es inicializada
$X_{actual} = \text{Inicialización}()$	% Una solución al azar es obtenida
<b>Desde</b> $i = 1$ <b>iter</b> <b>Hacer</b>	% El número de iteraciones es establecido
<b>Desde</b> $j = 1$ <b>Cad</b> <b>Hacer</b>	% La temperatura es mantenida
$X_{nuevo} = \text{Perturb}(X_{actual})$	% Una solución vecina es generada
$\Delta = f(X_{nuevo}) - f(X_{actual})$	% La diferencia entre las soluciones es evaluada
<b>Si</b> $(U(0,1) < e^{(-\delta/T)})$ <b>o</b> $(\delta < 0)$ <b>Entonces</b>	% El criterio de aceptación es aceptado
$X_{actual} = X_{nuevo}$	% La solución es actualizada
<b>Fin Si</b>	
<b>Fin Condicional</b>	
$Temp = T_0 / (i + 1)$	% La temperatura de enfriamiento disminuye
<b>Fin Lazo</b>	

**Figura 1.7:** Pseudoalgoritmo de Simulated Annealing

### 1.5.2.2 Algoritmos Genéticos

Los Algoritmos Genéticos (Goldberg, 1989; Holland, 1992) constituyen el paradigma más completo de la Computación Evolutiva, es decir, reúnen de modo natural todas las ideas fundamentales de dicho enfoque. Son muy flexibles, ya que pueden adoptar con facilidad nuevas ideas. Además, se pueden combinar fácilmente con otros paradigmas y enfoques aunque estos no tengan relación con la Computación Evolutiva. Estos algoritmos son métodos numéricos estocásticos de búsqueda de soluciones cuasi-óptimas. Un Algoritmo Genético trabaja con una población inicial de individuos. Cada individuo de la población constituye una potencial solución del problema y es evaluado usando una función de aptitud especificada para el problema a ser resuelto. A cada individuo se le asigna un valor o puntuación, relacionado con la calidad de dicha solución. Cuanto mayor sea la adaptación de un individuo al problema, mayor será la probabilidad de que el mismo sea seleccionado para reproducirse, cruzando su material genético con otro individuo seleccionado de igual forma. Este cruce producirá nuevos individuos, descendientes de los anteriores, los cuales comparten algunas de las características de sus padres. De esta manera, se produce una nueva población

de posibles soluciones, la cual reemplaza a la anterior. Así, a lo largo de las generaciones, las buenas características se propagan a través de la población. Favoreciendo el cruce de los individuos mejor adaptados, van siendo exploradas las zonas más prometedoras del espacio de búsqueda. Si el Algoritmo Genético ha sido bien diseñado, la población convergerá hacia una solución óptima del problema.

La ventaja más importante de los Algoritmo Genéticos es que son intrínsecamente paralelos. La mayoría de los otros algoritmos son en serie y sólo pueden explorar el espacio de soluciones hacia una solución en una dirección al mismo tiempo. Si la solución que descubren resulta sub-óptima, no se puede hacer otra cosa que abandonar todo el trabajo hecho y empezar de nuevo. Sin embargo, ya que los Algoritmo Genéticos tienen descendencia múltiple, pueden explorar el espacio de soluciones en múltiples direcciones a la vez. Si un camino resulta ser un callejón sin salida, pueden eliminarlo fácilmente y continuar el trabajo en avenidas más prometedoras, dándoles una mayor probabilidad en cada ejecución de encontrar la solución. Además, han demostrado su efectividad al no caer en óptimos locales y hallar el óptimo global incluso en escenarios muy complejos. En la realidad, a menudo no hay manera de indicar si cierta solución es el óptimo global o sólo un óptimo local muy prometedor. Sin embargo, aunque un Algoritmo Genético no devuelva siempre una solución perfecta, casi siempre puede devolver al menos una muy buena solución. En la Figura 1.8 se muestra el pseudocódigo para un Algoritmo Genético.

**Procedimiento Algoritmo Genético**

*Generar una población inicial.*

*Evaluar la función de aptitud de cada individuo.*

**Mientras** no finalice **Hacer**

*Seleccionar dos individuos de la anterior generación, para el cruce (probabilidad de selección proporcional a la función de aptitud del individuo).*

*Cruzar con cierta probabilidad los dos individuos obteniendo dos descendientes.*

*Mutar los dos descendientes con cierta probabilidad.*

*Evaluar la función de aptitud de los dos descendientes mutados.*

*Insertar los dos descendientes mutados en la nueva generación.*

*Si la población ha convergido **Entonces***

*Finalizar: = **Verdadero***

**Fin Mientras**

**Figura 1.8:** Pseudoalgoritmo de Algoritmo Genético

## 1.6 Estructura de la Tesis

El trabajo realizado en esta Tesis está organizado en 9 capítulos.

En el **Capítulo 1** se exponen las principales razones que motivaron el desarrollo de este trabajo, se presenta la metodología utilizada para el desarrollo de la Tesis y se plantean los objetivos que se pretenden alcanzar en la misma.

Luego en el **Capítulo 2** se realizó un estudio técnico-económico de pre-factibilidad para analizar la conveniencia de utilizar la gasolina natural como materia prima petroquímica. Se corroboró que la gasolina natural constituye un sustituto atractivo para la producción de etileno en Argentina.

Seguidamente, en el **Capítulo 3** se realizó el estudio y la revisión bibliográfica de los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Este trabajo fue útil para seleccionar un paquete de software que ayude a analizar y caracterizar caminos que constituyan una red óptima de transporte de gasolina natural.

En el **Capítulo 4** tomando como caso de estudio la Cuenca Austral se realizó un análisis para evaluar la propuesta mediante FODA. Se presentan los primeros modelos

matemáticos resueltos en GAMS (Sistema General de Modelado Algebraico). En base a los resultados preliminares obtenidos en este capítulo se demuestra la necesidad de implementar una metodología de optimización mediante un recurso heurístico que permita explorar y explotar adecuadamente el espacio de búsqueda.

Consecutivamente, en el **Capítulo 5** se trabajó en el desarrollo del Optimizador SAG. Con este propósito, se adoptó un enfoque táctico basado en la hibridación (Luna Valero, 2008) de la técnica metaheurística Simulated Annealing junto con GAMS con el objetivo de resolver el problema de diseño de redes de cañerías en la provincia de Santa Cruz (Argentina).

Luego, en el **Capítulo 6** se analizó y comparó el desempeño en el diseño óptimo de una red de cañerías de las metaheuristicas Simulated Annealing y Algoritmos Genéticos.

En los **Capítulos 7 y 8**, se analizó la respuesta dinámica de la producción de los yacimientos y se incorporó en el modelo. Además, se diseñó un sistema de control óptimo de volumen de gasolina natural en los tanques de almacenamiento, con el objetivo de garantizar el suministro a la planta de procesamiento. Para ello, se implementó un Algoritmo Genético que hemos diseñado especialmente con esta finalidad.

Finalmente, el **Capítulo 9** expone las conclusiones alcanzadas mediante esta investigación y se perfilan posibles lineamientos de trabajo futuro.

## CAPÍTULO 2

# GASOLINA NATURAL PARA LA PRODUCCIÓN DE ETILENO

---

### *Contenido del Capítulo*

En este capítulo se presenta un análisis técnico-económico detallado de la potencial utilización de gasolina natural como materia prima para la producción de etileno en Argentina.

Se propone el uso de gasolina natural para incrementar la producción de olefinas (etileno, propileno) por craqueo térmico como alternativa al empleo de etano. La factibilidad de la propuesta se fundamenta mediante un análisis técnico-económico preliminar, efectuado en base a la producción nacional del mencionado recurso.

Los resultados obtenidos demuestran que existen ventajas económicas en el empleo de gasolina natural como materia prima petroquímica, lo que justifica el estudio de redes de transporte específicas.



## 2.1 Introducción

El gas natural es uno de los recursos energéticos más importantes a nivel mundial, dado que representa la quinta parte del consumo energético total (GASNOR, 2011). Es la segunda fuente de energía más utilizada, siendo el primer lugar ocupado por el petróleo y, de acuerdo a los expertos en este sector, el gas natural continuará ocupando dicha posición por no menos de veinte años (EIA, 2011). Es un recurso fundamental que contribuye a satisfacer necesidades humanas básicas, tales como la cocción de alimentos, la calefacción y el transporte. Es además la principal materia prima en importantes procesos industriales en Argentina, entre los que se encuentran la producción de polietileno, fertilizantes (urea), PVC y amoníaco. El gas natural está compuesto principalmente por metano ( $\text{CH}_4$ , 80-95%), etano ( $\text{C}_2\text{H}_6$ , 4-8%), hidrocarburos superiores y otros componentes menores, tales como nitrógeno ( $\text{N}_2$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ). El gas natural, una vez extraído del yacimiento, es sometido a distintas etapas de separación y acondicionamiento, para luego ser inyectado en los gasoductos troncales. Existen básicamente dos etapas de separación: la Separación Primaria llevada a cabo en el mismo yacimiento del cual es extraído el gas y la Separación Secundaria realizada en las plantas de procesamiento. De estas etapas se obtiene la gasolina natural (ver Capítulo 1, Sección 1.1).

El etileno, uno de los productos petroquímicos más importantes de la Argentina, se utiliza a su vez como materia prima para la producción de productos petroquímicos claves, tales como polietileno, poliestireno y PVC. El proceso más empleado para la producción de etileno es el de craqueo térmico de hidrocarburos, tales como etano, propano, naftas, etc. Esta tecnología es bien conocida y es ampliamente aplicada. El proceso de producción de etileno a partir de nafta es básicamente el mismo que a partir de gasolina natural. Teniendo en cuenta las cantidades mencionadas anteriormente (ver Capítulo 1, Sección 1.1) y el escaso valor

agregado de la gasolina natural en Argentina, se propone en este capítulo su uso como materia prima petroquímica. Además, las proyecciones de la demanda futura de etileno (Boletín Informativo IPA, 2010) son realmente prometedoras.

En los últimos años el suministro de materias primas a las principales plantas petroquímicas se ha vuelto un tema de preocupación. El incremento en el consumo doméstico de gas natural durante la temporada invernal, hace que sea necesario restringir el suministro de gas natural al sector industrial, donde es utilizado fundamentalmente como materia prima y combustible, de forma de satisfacer así los requerimientos del sector doméstico. Como consecuencia, la balanza comercial para algunos productos petroquímicos específicos en Argentina, ha arrojado resultados negativos en los últimos años. La búsqueda de materias primas alternativas se vuelve entonces extremadamente necesaria.

Los mercados locales y mundiales para los productos petroquímicos mencionados se están expandiendo rápidamente. Resulta fundamental entonces incorporar capacidad adicional. En Argentina, la gran dependencia del gas natural y sus derivados, junto con el hecho de que la producción del mismo resulta insuficiente para satisfacer los requerimientos de los consumidores, exigen una utilización eficiente y racional de los recursos disponibles. En este análisis, la gasolina natural surge como un recurso alternativo de interés.

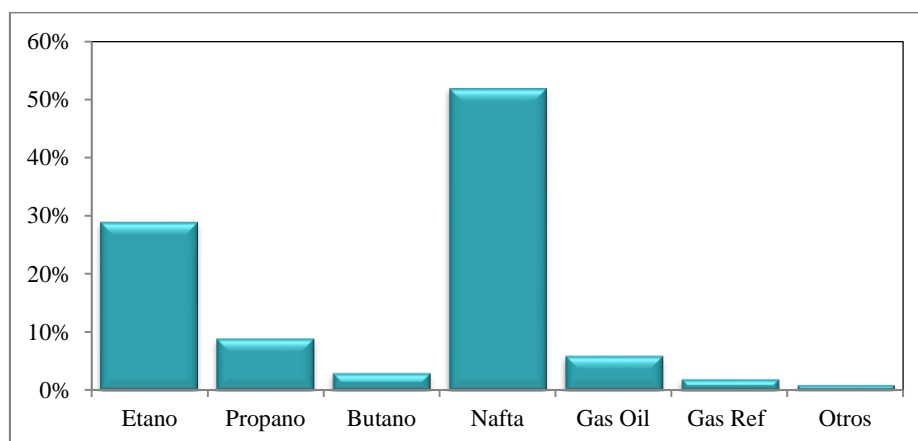
## **2.2 Materias Primas**

Históricamente, en aquellas regiones donde el gas natural es un recurso abundante, el etano ha sido la materia prima más utilizada para la producción de etileno, no solo por el menor costo de producción frente a materias primas alternativas, sino también por el mayor rendimiento en etileno. Para las regiones donde el gas natural es un recurso más bien escaso, tales como Europa y algunos países del Este Asiático (China, Japón, Corea del Sur, etc.), la materia prima más utilizada es la nafta, dado que puede ser fácilmente almacenada y



transportada. Cuando se reporta la utilización de nafta como materia prima en la literatura, esta fracción incluye comúnmente la contribución de la gasolina natural de manera implícita.

La Figura 2.1 resume las diferentes materias primas empleadas para la producción de etileno a nivel mundial (Seddon, 2010).



**Figura 2.1:** Materias primas para producción de etileno a nivel mundial

El proceso de producción de etileno a partir de nafta, la cual representa cerca del 50% del consumo total de materias primas disponibles, es una tecnología bien conocida. Existen plantas eficientes de producción de etileno a partir de nafta en todo el mundo. En Estados Unidos las materias primas preferidas para la producción de etileno son el etano (37,3%) y la nafta (29,6%), mientras que el propano representa solo un 18%.

En contraste, la mayor parte de la materia prima utilizada para la producción de etileno en la Unión Europea es nafta con una proporción menor proveniente del gas natural (etano, propano, etc.). La nafta representa un 72% de la producción total, mientras que el etano solo un 7%. En Medio Oriente existe un dominio claro del craqueo de etano por sobre otras fuentes. El etano representa un 67%, mientras que la nafta y el propano representan un 14 y 10% respectivamente. En el Lejano Oriente la nafta se presenta como la materia prima principal con 72%. El etano representa solo un 11% (Seddon, 2010). En Argentina el etano es

la principal materia prima como fuente de etileno por craqueo térmico, representando el 93% de la producción, mientras que el propano y la nafta representan sólo un 7% (APLA, 2012).

El rendimiento de la gasolina natural como materia prima es básicamente el mismo que para una nafta liviana (0,36 kg etileno/kg nafta). Este rendimiento es menor con respecto a la utilización de Etano (0,8 Kg etileno/ Kg etano) (Miller, 1969). Por otra parte, emplear gasolina natural, aumenta significativamente la obtención de productos secundarios de valor comercial: propileno, butenos y gasolina de pirólisis. La gasolina de pirólisis posee, a su vez, un alto contenido de aromáticos (Benceno, Tolueno y Xileno: BTX), productos de importante valor agregado. Si bien la gasolina natural es una materia prima de mayor costo en relación al etano, la obtención de subproductos de alto valor por craqueo térmico realza la conveniencia de su empleo para obtención de etileno.

La falta de gas natural durante la temporada invernal en Argentina durante los años 2010 y 2011 (Meninato, 2010; La Nación, 2011), motivan el empleo de gasolina natural por sobre el etano. En invierno el consumo doméstico de gas natural aumenta notablemente y las capacidades actuales no son suficientes para satisfacer la demanda. La gasolina natural también se encuentra sujeta a estos cambios estacionales, aunque no completamente, dado que la etapa de Separación Secundaria es la única afectada por las restricciones al suministro. En este punto, se debe tener en cuenta que la mayor parte de la gasolina natural se obtiene en la etapa primaria de separación de gas natural. Además, el suministro de gasolina natural se puede garantizar fácilmente, dada la facilidad con que esta puede ser almacenada al ser un hidrocarburo líquido.

En cuanto a los consumos de energía promedio para los crackers de etano y nafta (sin considerar el consumo eléctrico), estos son de aproximadamente 14,6 GJ/t y 21,8 GJ/t de etileno respectivamente (Ren *et al.*, 2006). A partir de la capacidad calorífica y densidad promedio del gas combustible alimentado a los crackers de etano de la empresa Dow

Chemical Bahía Blanca, sería necesario disponer de 750.000 m<sup>3</sup>/día de gas combustible para producir aproximadamente 620.000 t/año de polietileno. La mayor parte de este gas combustible proviene de una alimentación fresca de etano el resto proviene de una corriente de gas de reciclaje que contiene básicamente etano no reaccionado e hidrógeno. El requerimiento de gas natural para un proceso a partir de etano es entonces elevado, no solamente por el consumo de etano como materia prima, sino también por el consumo de gas natural como combustible para el cracker.

Las naftas son utilizadas en todo el mundo como materia prima para la producción de etileno (ver Figura 2.1), con lo que las especificaciones técnicas de proceso se encuentran bien establecidas. Esta tecnología es básicamente la misma que la empleada para gasolina natural como materia prima.

### ***2.3 Análisis de Oferta y Demanda Mundial de Etileno***

La producción de etileno a nivel mundial está liderada por América del Norte, el Lejano Oriente y la Unión Europea. En los últimos años se destaca un incremento notable en la capacidad productiva en Medio Oriente, para posicionarse también al nivel de los principales productores (Holmquist, 2010). La Figura 2.2 (True, 2010) muestra la evolución en la capacidad mundial de etileno por región. A partir de 2013, el gráfico se basa en los nuevos proyectos de etileno.

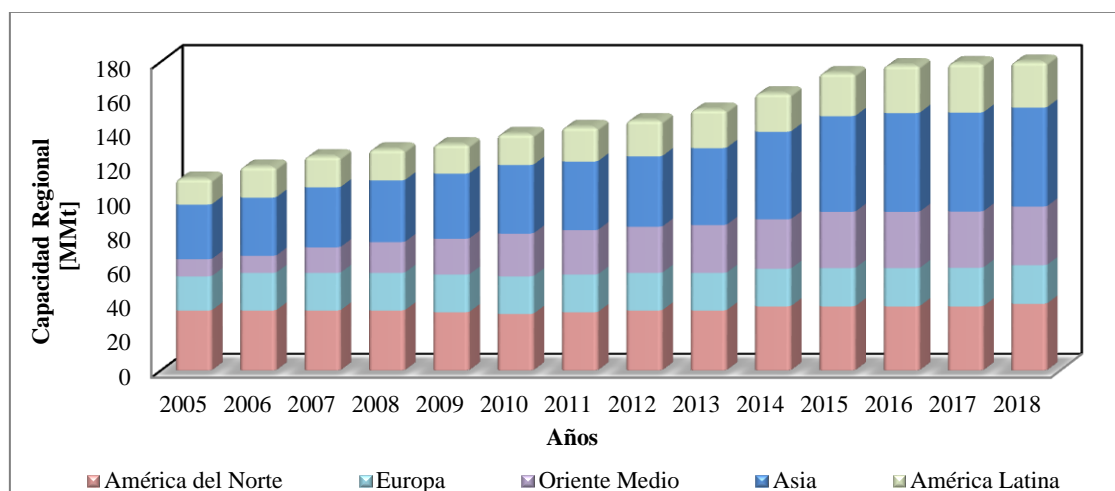


Figura 2.2: Adición de capacidad de etileno por región

Como se observa en la Figura 2.2, la capacidad de etileno a nivel mundial registra un incremento anual promedio en los últimos seis años de aproximadamente un 3%. Estados Unidos y algunos países de Medio Oriente se presentan como los principales exportadores de etileno. En América Latina existen tres países que poseen plantas de producción de etileno de magnitud considerable: Brasil y México son los mayores productores, mientras que Argentina posee una capacidad instalada de aproximadamente 750.000 t/año. La mayor producción se encuentra en Brasil (3.952.000 t/año), que posee seis plantas de gran escala. En Argentina, en la provincia de Santa Fe, existen dos plantas de producción de etileno (52.000 t/año) de menor escala, cuya materia prima se basa en propano y nafta (APLA, 2012).

#### 2.4 Análisis de Oferta y Demanda de Etileno en Argentina

Un análisis a futuro del mercado de etileno en Argentina puede realizarse en base a la proyección de la información proyectada en la Figura 2.3. Para este estudio, se realizó un ajuste por regresión lineal múltiple de los datos de importación y producción de etileno durante los años 2003 y 2010. Luego, se realizó una proyección de dichos valores en el tiempo.

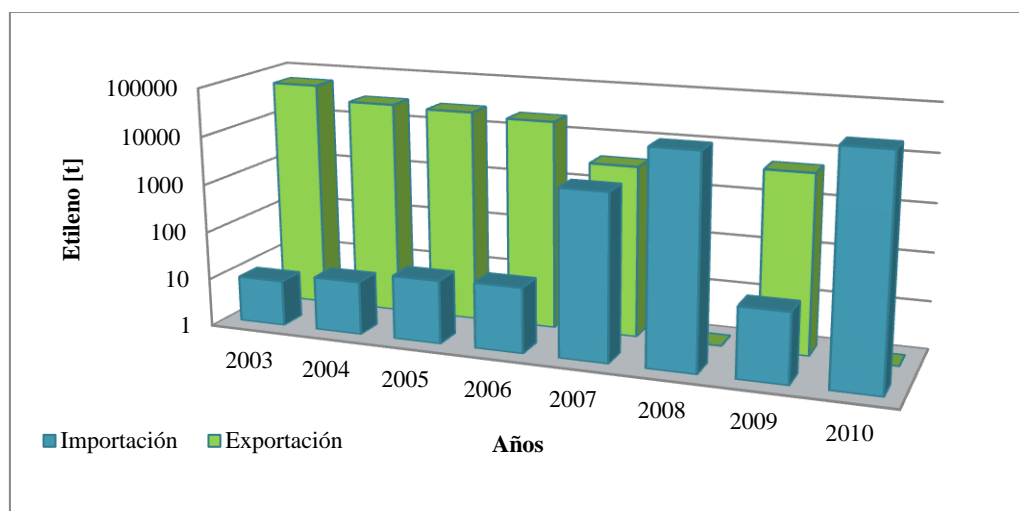


Figura 2.3: Balanza comercial de etileno en toneladas

La oferta de etileno corresponde a la producción local sumada a la cantidad importada, mientras que la demanda (también conocida como consumo aparente) surge de restar a la oferta la cantidad exportada. La importación de etileno y los valores de producción, entre los años 2003 y 2010, fueron ajustados estadísticamente por regresión lineal a través de los parámetros macroeconómicos que mejor explican la evolución en el tiempo de las variables consideradas (Baca Urbina, 2003). La disponibilidad de etano (IPA, 2009; 2010; 2011) como materia prima para la producción de etileno, es un parámetro macroeconómico fundamental que debe ser considerado para la proyección en el tiempo de la producción e importación de etileno. En la Tabla 2.1 se muestran los parámetros económicos que habitualmente se utilizan para el análisis de la oferta y la demanda.

Parámetro Económico	Fuente
Producto Bruto Interno (PBI)	CEI, 2010
Tasa de inflación	CEI, 2010, DPEyC, 2011
Tasa de cambio (o tipo de cambio)	CEI, 2010
Precio del gas natural (tarifa industrial para grandes consumidores)	ADIGAS, 2011
Tasa de inflación	INDEC*, DPEyC, 2011

\*INDEC: Instituto Nacional de Estadísticas y Censos

Tabla 2.1: Parámetros económicos

El mejor ajuste para la producción de etileno se obtuvo cuando se consideró la tasa de inflación y la producción de etano como parámetros clave. En el caso del ajuste de la importación de etileno, los parámetros más representativos fueron el precio del gas natural y el tipo de cambio.

Luego de realizar el ajuste de la producción e importación de etileno, es necesario proyectar dichos valores en el tiempo. No se realizó un ajuste para la exportación de etileno dado que dicha cantidad es nula en 2010 y, dadas las condiciones actuales, se considera que se mantendrá en este nivel en los próximos años. El incremento en la importación de etileno parece indicar que, mientras los inconvenientes en el suministro de gas natural persistan, la exportación de etileno se mantendrá en cero. Considerando nula la exportación de etileno a partir de 2010, la oferta y la demanda coinciden, por lo que se recurre además al cálculo de una nueva variable denominada consumo potencial, que permite analizar las condiciones futuras del mercado. El consumo potencial de etileno fue calculado a partir de los valores de demanda de sus principales derivados, los cuales son polietileno, poliestireno y PVC (IPA, 2009; 2010; 2011). Este consumo se calculó considerando no solo la producción local de los principales derivados, sino también las cantidades importadas de los mismos.

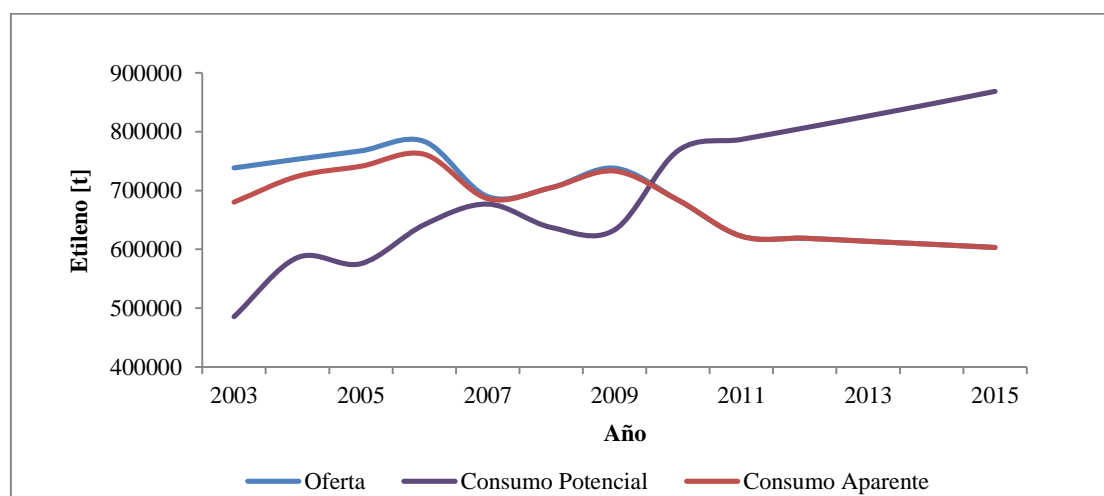
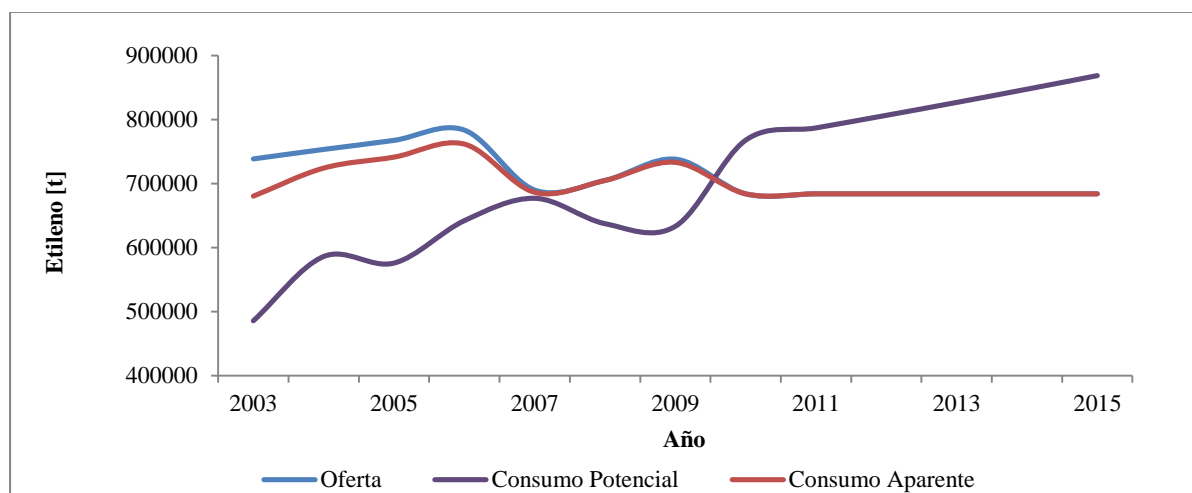


Figura 2.4: Oferta, consumo aparente y potencial de etileno: Escenario 1



**Figura 2.5:** Oferta, consumo aparente y potencial de etileno: Escenario 2

Las Figuras 2.4 y 2.5 muestran la oferta, el consumo aparente y potencial de etileno proyectados en el tiempo. Para la proyección del consumo potencial de etileno a partir de 2011, se consideró un crecimiento promedio anual del 2,5%, el cual es un valor bastante conservador. La industria de polietileno registra un crecimiento anual promedio del 7% en los últimos cinco años, la de PVC un 1,3% y la de poliestireno un 3,6%. La producción de etileno a partir de una materia prima alternativa al etano, la gasolina natural, surge entonces como una opción prometedora en el corto y mediano plazo. Como se observa en la Figura 2.4, el consumo potencial de etileno superará a la oferta en aproximadamente 265.000 toneladas en 2015. En cambio, para el segundo escenario (Figura 2.5), la brecha será de 185.000 toneladas en el mismo año. Además, en la Figura 2.5 se consideró que la oferta de etileno se mantendrá constante a partir de 2010, ya sea porque no existirán inconvenientes en el suministro de materias primas, o bien porque la importación de etileno aumenta para compensar un eventual déficit.

## 2.5 Evaluación Económica y Financiera

La necesidad de la utilización de los recursos locales disponibles, a los que se les da escaso valor en nuestro país, resulta un punto fundamental para motivar la aplicación de una

política económica adecuada que regule este aspecto; el objetivo principal es darle valor a recursos hoy en día poco explotados. Por otro lado, los nuevos proyectos de explotación del recurso de gas no convencional en Argentina (Revista Petroquímica, 2015) permitirían contar también con un mayor suministro de gasolina natural, por lo que el requerimiento de materia prima no sería un inconveniente.

Se realizó una evaluación económica preliminar de la propuesta, para la cual se consideró una planta con una capacidad instalada de 500.000 t/año de etileno, esta planta requiere aproximadamente 1,4 MMt/año de gasolina natural, capacidad cercana a la producción actual en el país (1,2 MMt/año). En este caso se considera disponible la producción total de gasolina natural, incluyendo la fracción exportada en la actualidad como materia prima.

En primer lugar, para la evaluación económica, se ha llevado a cabo una estimación de la inversión inicial total. La inversión total está representada por la inversión de capital fijo más el capital de trabajo (también denominado capital circulante). La inversión de capital fijo comprende la inversión en el terreno donde la planta será instalada, el equipamiento necesario, equipos, cañerías y materiales, las instalaciones de servicio, supervisión de ingeniería, etc. Para la estimación del costo de compra de todo el equipamiento involucrado se necesita en primer lugar estudiar el proceso, para luego sí poder definir el tipo de equipo, número de unidades, tamaños, entre otros parámetros fundamentales. Entre dichos parámetros característicos se pueden mencionar: diámetro de la columna, tipo de intercambiador de calor, potencia del compresor, caudales, presión de descarga de las bombas, etc. En este análisis los datos fueron tomados parcialmente de la literatura (Esposito, *et al*, 1997) y el resto proviene de información disponible. Una vez calculados los parámetros característicos mencionados, se procede al cálculo de costos de cada uno de los equipos (Peters y Timmerhaus, 1991). Para actualizar los costos se utilizaron los índices de costos de



Marshall & Swift del año 2011 (Chemical Engineering, 2011). El capital de trabajo se calculó como un porcentaje (17%) de la inversión total, basado en el capital de trabajo empleado en proyectos de similar característica. La inversión total obtenida (incluyendo offsites) corresponde a una planta de etileno instalada en los Estados Unidos, de forma que se utilizó un factor de corrección (Boletín Informativo IPA, 2011) para obtener el valor real aplicado a una planta instalada en la Argentina.

En segundo lugar se estimó el costo de producción, el cual representa los egresos anuales de la planta. Dicho costo se calculó considerando el costo de materias primas, mano de obra, mantenimiento, impuestos, etc. El costo neto surge de restar a los costos totales anuales, los ingresos por la exportación de los coproductos obtenidos (propileno, C<sub>4</sub> y gasolina de pirólisis) (ICIS, 2011). El propileno es utilizado mayoritariamente como materia prima para la producción de polipropileno. La corriente de C<sub>4</sub> es utilizada como materia prima para la obtención de butadieno, contiene entre un 45 y 50% (p/p) de butadieno. La gasolina de pirólisis es un producto con un alto contenido de aromáticos que es utilizada ya sea para su mezcla con naftas o como alimentación en una unidad de extracción de BTX, donde el objetivo principal es la aislación de benceno de alta pureza.

Para el análisis de ingresos se considera también la venta de etileno en el mercado internacional, se consideró el precio spot promedio del etileno para el año 2011 (ICIS, 2011).

Además se consideraron los siguientes parámetros clave para el análisis de inversión y costos:

**Inversión total:** compra de equipos (bombas centrífugas, compresores, demetanzadora, fraccionador de etileno, torre de enfriamiento, etc.), instalación de equipos, aislación y pintura, cañerías, terreno, ingeniería y supervisión. Cabe destacar en este caso, que la inversión de capital total para una planta de producción de etileno a partir de naftas

(líquidos) es aproximadamente un 40% superior a la de una planta que emplea etano (gas) como materia prima.

**Costo de producción:** materias primas, mano de obra, mantenimiento y reparaciones, seguros, gastos administrativos, costos de distribución y venta. El costo de producción promedio de etileno en este análisis es de aproximadamente 1.120 US\$/t (Lippe, 2011)

**Ingresos:** precios spot para etileno y los diferentes coproductos obtenidos (ICIS, 2011).

Hasta el momento no existe un precio establecido para la gasolina natural como materia prima petroquímica en Argentina, dado que no hay plantas de producción de etileno a partir de gasolina natural en nuestro país. De acuerdo a esto resulta necesario estimar el precio que estaría dispuesto a aceptar el productor de gasolina natural, tomando en cuenta el precio actual de la misma en el mercado interno como punto de partida. El objetivo se centra en lograr que los productores puedan obtener un cierto beneficio a partir de la comercialización de la gasolina natural como materia prima para la producción de etileno en lugar de comercializarla en el mercado interno. Teniendo en cuenta esto, se considera un precio estimado 2% superior al precio actual en el mercado interno (594 US\$/t) (Secretaría de Energía, 2011). El precio propuesto de adquisición de la materia prima para la producción de etileno es entonces de 605 US\$/t.

Se consideró un periodo de 15 años para este estudio. Este período es utilizado para realizar una proyección de los beneficios futuros del proyecto. Se calcularon tres parámetros fundamentales para evaluar la conveniencia del proyecto: el Valor Presente Neto (*VPN*), la tasa interna de retorno (*TIR*) y el período de repago. El *VPN* y la *TIR* pueden ser utilizados en forma indistinta para evaluar la factibilidad de que el proyecto sea aceptado. El *VPN* es la suma de todos los flujos de caja, llevados al momento en que se lleva a cabo la inversión, menos la inversión inicial, mientras que la *TIR* es la tasa de interés para la cual el *VPN* se hace cero. El proyecto debería ser aceptado cuando:

- *El VPN es mayor a cero;*
- *La TIR es mayor a la tasa de descuento empleada.*

Para el cálculo de la tasa de descuento es necesario evaluar el costo de oportunidad del dinero invertido, el cual es el costo de cualquier actividad medida en términos de la mejor alternativa perdida. La tasa de descuento fue calculada a través del Modelo de Fijación de Precios de Activos de Capital (CAPM, por sus siglas en inglés) de la siguiente manera:

$$E_i = R_f + \beta (R_m - R_f) + R_p \quad (\text{Ec.2.1})$$

La tasa de interés libre de riesgo ( $R_f$ ) es la tasa de rendimiento de los bonos del tesoro norteamericano a 30 años, el cual fue un 3,27% en Octubre de 2011 (Bloomberg, 2011). El retorno esperado del mercado ( $R_m$ ) es el índice Merval promedio de periodo 2002-2011, el cual fue del 34,74% (IAMC 2010; 2011). El coeficiente de volatilidad ( $\beta$ ) representa la volatilidad relativa de las acciones de empresas petroleras y petroquímicas (Merval, 2011), y es de 0,69. Como tasa de riesgo país para Argentina ( $R_p$ ) se utiliza el valor correspondiente a Octubre de 2011 y es de 861 puntos básicos o 8,61% (BCRA, 2011) El valor obtenido para el retorno esperado sobre el capital ( $E_i$ ) es de 33,6%. Este valor de  $E_i$  tiene incorporada la inflación, de forma que se debe descontar la tasa de inflación para obtener el  $E_i$  real. La tasa de inflación promedio para años 2002-2011 (18,7%) fue descontada entonces del  $E_i$  anterior para dar una tasa de 14,9%. Esta tasa de descuento es aceptable para proyectos de este tipo.

La depreciación fue calculada por el método lineal para un período de 20 años, con un valor residual calculado por el método del valor de libro. Los valores de ingresos utilizados corresponden a los valores netos de impuesto a los ingresos brutos (1,5%). Otro parámetro relevante es el impuesto a las ganancias, el cual es del 35%. Se asume además que la planta opera al 100% de su capacidad instalada.

La inversión total se calculó para una planta establecida en los Estados Unidos, por lo que luego se afectó dicho valor por un factor de 1,44 para su instalación en Argentina (Boletín Informativo IPA, 2011). El costo de inversión de este proyecto en Argentina es de 1.565 MMUS\$ (incluyendo offsites).

En principio el análisis de la rentabilidad de la propuesta, surgen resultados negativos, por lo que esta debería ser descartada. Esto se debe, principalmente, a la elevada inversión inicial y los altos costos operativos vinculados en su mayor parte al costo de adquisición de la gasolina natural. Considerando estos resultados y teniendo en cuenta además que el etileno, propileno y gasolina de pirólisis son en general productos intermedios en la cadena productiva, se realizó una integración vertical y horizontal de la propuesta para incrementar el margen de ganancia.

## ***2.6 Integración Vertical y Horizontal***

Al realizar la evaluación financiera del proceso de producción de etileno se obtuvieron resultados negativos, con un VPN menor a cero y una TIR menor a la tasa de descuento considerada. Esto es indicativo de que el proyecto debería ser descartado. El mismo exige una inversión considerable y los costos operativos también son de magnitud, debido fundamentalmente al elevado precio de la materia prima. Tanto el etileno como el propileno requieren además de refrigeración para su transporte y comercialización, por lo que los costos son aún mayores. Sin embargo, el estudio de la obtención de productos de mayor valor, a partir de etileno, propileno y gasolina de pirólisis, arroja resultados promisorios.

En función de los resultados mostrados en la Sección 2.5, se propone sumar valor al etileno, y a algunos coproductos obtenidos mediante el procesamiento de los mismos. El etileno podría ser enviado a una planta de producción de polietileno de baja densidad (LDPE, por sus siglas en inglés), para la elaboración de film. El propileno podría ser integrado a una

planta de producción de polipropileno. La gasolina de pirólisis, compuesta principalmente por aromáticos, podría ser enviada a una unidad de fraccionamiento donde se obtendría Benceno, Tolueno y una mezcla de Xilenos. Estos son productos de amplia utilización en la industria petroquímica. Aproximadamente el 80% del Benceno producido en nuestro país es empleado para la producción de etilbenceno. Este último es empleado para la fabricación de estireno, el cual es a su vez utilizado principalmente en la elaboración de poliestireno. El tolueno y xileno son utilizados básicamente como solvente y como aditivo para naftas. El proceso de obtención de aromáticos se realiza comúnmente a través de extracción líquido-líquido con solventes. En este proceso se obtiene además una corriente de gasolina pesada, la cual es utilizada comúnmente para su mezcla con otras naftas, para aumentar el octanaje de las mismas. La corriente de  $C_4$  podría ser exportada, tal como se ha considerado en el análisis anterior. La corriente de  $C_4$  se almacena en estado líquido a temperatura ambiente y presión de entre 2 y 4 kg/cm<sup>2</sup>. Se considera en principio que los productos obtenidos serán comercializados en el mercado de exportación. Además, en este análisis se tomará una relación etileno/polietileno y propileno/polipropileno de 1. La gasolina de pirólisis contiene aproximadamente un 60% de aromáticos, dentro de la cual el 55% corresponde a Benceno, 33% a Tolueno y el 12% restante a Xileno.

## ***2.6.1 Mercado de Polietileno, Polipropileno y Aromáticos***

### ***2.6.1.1 Oferta y Demanda Mundial***

La producción de poliolefinas, tanto polietileno como polipropileno, está creciendo notablemente desde hace algunos años y las proyecciones en el corto plazo deparan también un crecimiento considerable. En las Figuras 2.6 y 2.7 se observa la evolución de la capacidad, demanda y tasa operativa a nivel mundial de producción de polietileno y polipropileno en los últimos años y proyectada a 2018.

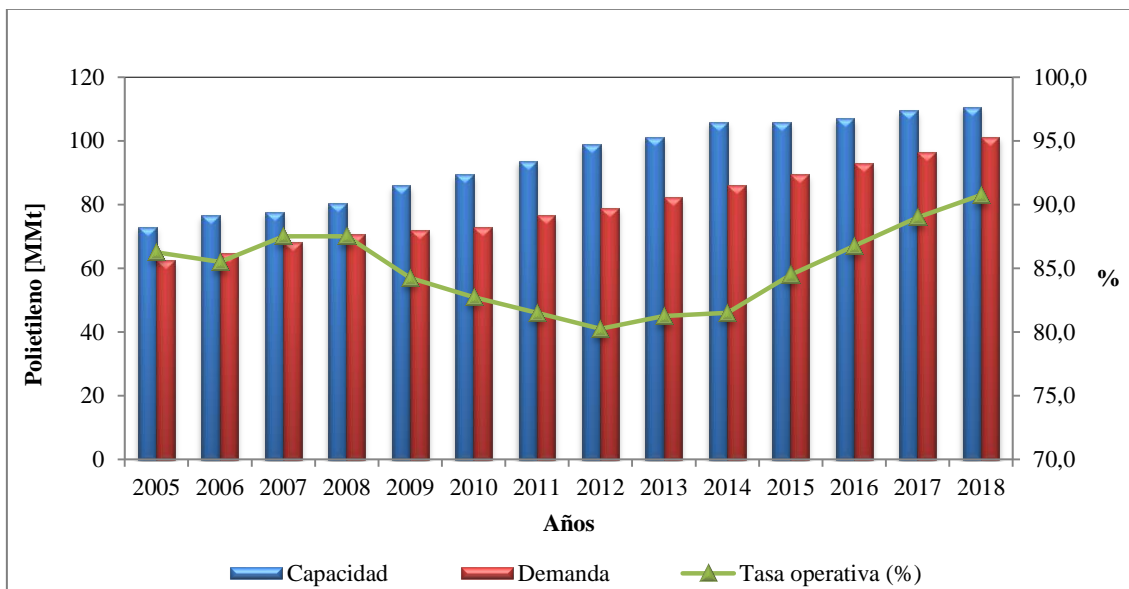


Figura 2.6: Oferta y demanda de polietileno a nivel mundial

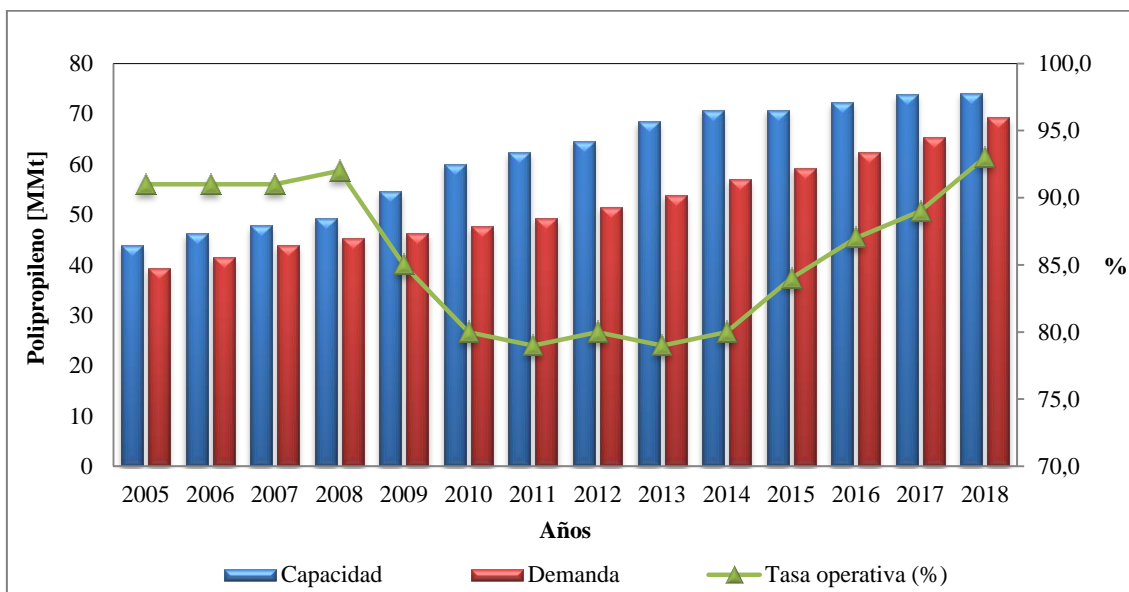


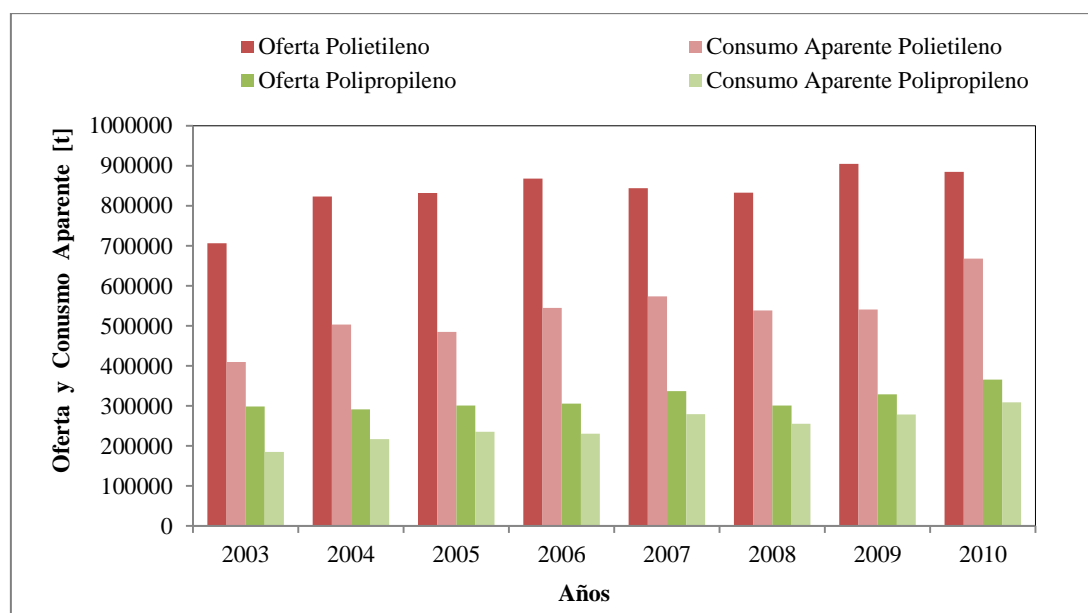
Figura 2.7: Oferta y demanda de polipropileno a nivel mundial

En ambas figuras se observa una notable caída en la capacidad operativa, sobre todo en la industria del polipropileno. Tanto la crisis económica mundial de 2009, como los problemas de abastecimiento de materias primas a la industria de poliolefinas, han ocasionado un crecimiento muy acotado de la demanda de dichos productos en los últimos años. Esta situación desencadenó a su vez una reducción notable de la capacidad operativa.

En los próximos años se proyecta un aumento muy importante de la capacidad operativa global, basado sobre todo en el aprovechamiento de materias primas de bajo costo, como el etano, propano y butano (Holmquist, 2010). Se proyecta un crecimiento promedio anual de la oferta de derivados de etileno a nivel mundial del 2,5%.

### 2.6.1.2 Oferta y Demanda en Argentina

En la Figura 2.8 se observan la oferta y demanda (consumo aparente) de polietileno y polipropileno a nivel local (IPA, 2009; 2010; 2011).



**Figura 2.8:** Evolución de la oferta y demanda de polietileno y polipropileno en Argentina

De la Figura 2.8 se puede observar que la oferta de polietileno y polipropileno han crecido en promedio a una tasa del 3,5 y 3,2% respectivamente. El consumo aparente de ambos productos ha crecido también, aunque a un ritmo notablemente mayor, siendo las tasas de 7,8 y 8% en cada caso. Estos resultados muestran de manera clara la necesidad del aumento de la producción de estas poliolefinas en nuestro país. Más allá de las grandes variaciones del mercado de poliolefinas a través de los años, este mercado resulta prometedor en el corto y mediano plazo, tanto a nivel mundial como local.

Como se mencionó anteriormente los coproductos que serían comercializados en esta propuesta son los productos aromáticos extraídos de la gasolina de pirólisis -Benceno, Tolueno y Xileno- y la corriente cruda de C<sub>4</sub>, la cual se exportará como materia prima para la obtención de Butadieno. Las cantidades aproximadas obtenidas en esta propuesta serían de 124.000 t/año de Benceno, 74.000 t/año de Tolueno, 27.000 t/año de Xileno y 125.000 t/año de C<sub>4</sub>. Todos ellos son productos cuyo mercado se encuentra en la actualidad en expansión. El incremento en la producción de etileno a partir de etano, mayormente en América del Norte y Medio Oriente, y la utilización de LGN (Líquidos del Gas Natural) como materia prima en lugar de naftas, en Europa Occidental, hace que se reduzca también la producción de aromáticos y de C<sub>4</sub> en dichas regiones, por lo que podría existir aquí un segmento disponible para comercializar los coproductos obtenidos.

El mercado Asiático, fundamentalmente China e India, serían básicamente los posibles destinos para comercializar los productos y coproductos mencionados. La industria de derivados en ambos países muestra un crecimiento notable en los últimos años. En cuanto a esto, en 2012 se impulsó a la creación de un acuerdo de integración entre el Mercosur y la República Popular China, lo que permitiría colocar a nuestro país como un potencial proveedor de materias primas a dicho país.

### **2.6.2 Análisis de Precios**

En la Figura 2.9 se observa el precio medio de comercialización interna y de exportación de gasolina natural en nuestro país entre 2005 y 2010. El precio de comercialización interno (Secretaría de Energía, 2011) surge de promediar el precio de comercialización en las distintas provincias.



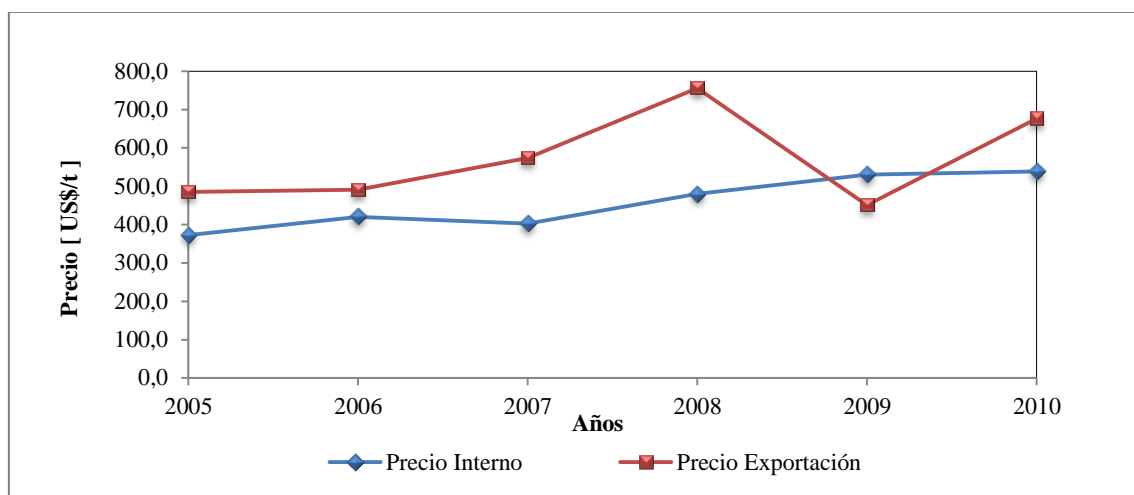


Figura 2.9: Precio medio de mercado interno y de exportación de gasolina natural

En 2009 se observa una notable caída en el precio de la gasolina natural, lo cual se debe a la crisis económica mundial de fines de 2008. El incremento promedio en el precio de mercado interno de la gasolina natural en el período 2005-2010 es de un 8% anual. En la Figura 2.10 se reportan los precios de exportación de polietileno, polipropileno y aromáticos (IPA, 2009; 2010; 2011).

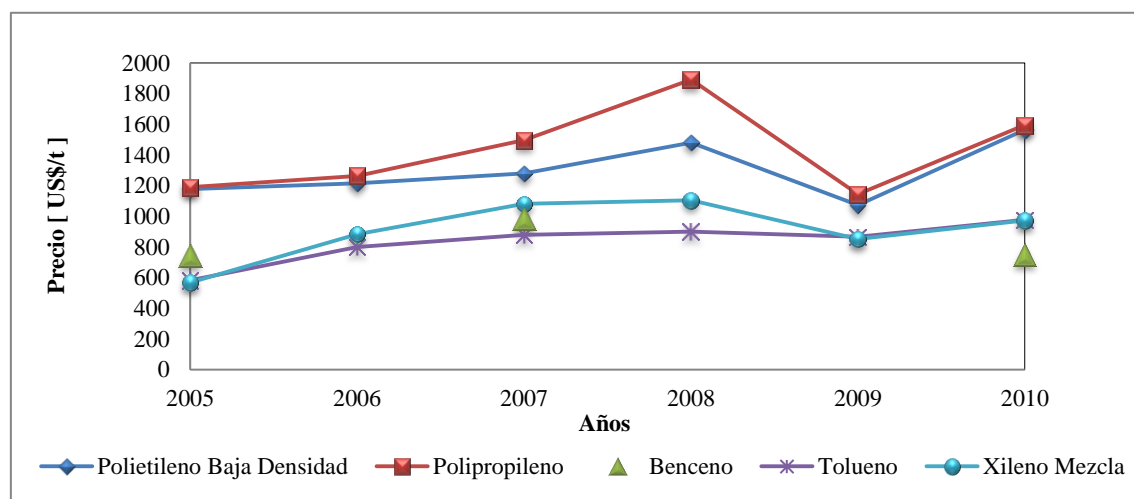


Figura 2.10: Precios de exportación de productos

Como se observa en la Figura 2.10, el precio de los productos, fundamentalmente de las poliolefinas, ha sufrido variaciones notables en los últimos años. En 2006, 2008 y 2009 no se registran precios para el benceno, dado que en dichos años no se ha exportado este producto.

Los precios de los productos y coproductos utilizados en el análisis de la propuesta corresponden a los precios spot promedio para el año 2011 (ICIS, 2011).

## 2.7 Evaluación Económica y Financiera de la Planta Integrada

En la Tabla 2.2 se observan los resultados obtenidos cuando se considera la planta integrada y tomando en cuenta algunas consideraciones expuestas en la Sección 2.6.

Año	0	1-5	6-15
Ingresos		1276,8	1276,8
Gastos		(695,3)	(695,3)
Depreciación		(102,3)	(102,3)
Resultado neto antes de impuestos		479,2	479,2
Impuesto a las ganancias		(167,7)	(167,7)
Resultado neto después de impuestos		311,5	311,5
Depreciación		102,3	102,3
Devolución Capital de trabajo			419,2
Valor de desecho			511,7
<b>Inversión total</b>	(2466,2)		
<b>Flujo neto [MMUS\$]</b>	(2466,2)	<b>413,8</b>	<b>1344,7</b>

Tabla 2.2: Flujo neto de caja

A partir del análisis se distinguen las siguientes observaciones:

- ✓ El costo de producción de polietileno es cercano a los 920 US\$/t.
- ✓ El margen de ganancia de producción de polietileno a partir de gasolina natural es de aproximadamente 800 US\$/t.
- ✓ El VPN es de aproximadamente 80,8 MMUS\$.
- ✓ La TIR es de 15,5% (contra una tasa de descuento considerada del 14,9%).
- ✓ El período de repago es de seis años.

El resultado obtenido del análisis de financiero es en este caso favorable, de modo que resultaría conveniente continuar con el análisis de la propuesta a un nivel de factibilidad.

### 2.8 Análisis de Sensibilidad

Teniendo en cuenta que el análisis actual representa solo un análisis preliminar de la propuesta y considerando además la variabilidad de la economía Argentina y los mercados internacionales, se debe llevar a cabo un análisis de sensibilidad de las variables involucradas. Este análisis busca ilustrar cómo impactan los cambios en algunas de las variables más relevantes sobre el VPN del proyecto.

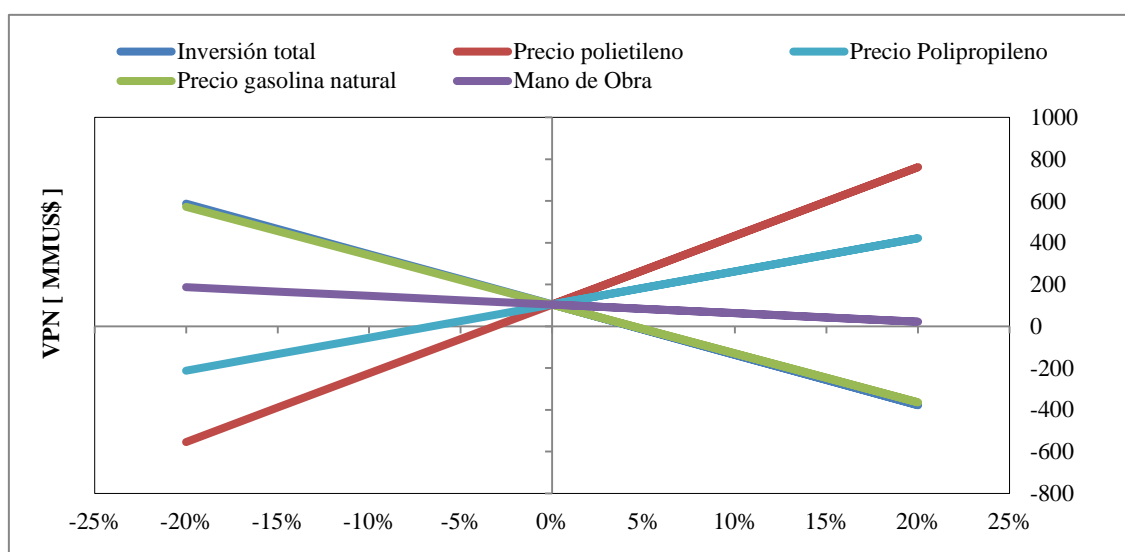


Figura 2.11: Análisis de sensibilidad

En la Figura 2.11 se observa que las variables que generan mayor impacto (mayor pendiente) sobre el VPN del proyecto son los precios de gasolina natural y polietileno. El costo de la gasolina natural representa aproximadamente un 60% del costo de producción total de etileno. La inversión total y la mano de obra exhiben una menor influencia sobre el VPN. Los precios de los coproductos, sobre todo de la corriente de C<sub>4</sub>, poseen un efecto prácticamente despreciable sobre el VPN (no se muestran en la Figura 2.11).

## 2.9 Conclusiones

Utilizar gasolina natural como materia prima sería conveniente en función de que:

- ❖ Puede ser fácilmente almacenada y utilizada ante eventuales inconvenientes en el suministro.
- ❖ Su producción no se encuentra totalmente afectada por las restricciones en el suministro de gas natural a las que se encuentran sometidas las empresas durante el invierno.
- ❖ En nuestro país, actualmente, la gasolina natural es un mero subproducto del proceso de fraccionamiento de gas natural y posee un escaso valor agregado. Aproximadamente un 30% de la producción nacional se exporta como materia prima, mientras que cerca de un 10% se exporta mezclada con el crudo.

El análisis financiero preliminar indicó, en un principio, que la utilización de gasolina natural para la obtención de etileno, propileno y gasolina de pirolisis como productos finales no es un proyecto atractivo. A partir de los resultados obtenidos, se realizó una integración del proceso, en el cual el etileno y el propileno serían empleados para la producción de polietileno y polipropileno respectivamente y la gasolina de pirolisis sería enviada a una unidad de extracción de aromáticos, para la obtención de BTX. Luego de realizar una nueva evaluación financiera, la propuesta arroja resultados positivos, dado al alto precio de los productos y coproductos obtenidos.

Dado el análisis realizado, se observa que se podría explotar un recurso valioso actualmente poco aprovechado en el país. Por lo tanto, puede recomendarse el uso de la gasolina natural para la producción de poliolefinas. Por ende, es importante diseñar una red de cañerías para transportar la gasolina natural hacia las plantas de procesamiento.

Los resultados obtenidos en este capítulo dieron origen a un trabajo publicado en la revista *Petroquímica, Petróleo, Gas & Química* (Cañete *et al.*, 2012).

# CAPÍTULO 3

## SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)

---

### *Contenido del Capítulo*

En este capítulo se introducen los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Se realizó la revisión bibliográfica y el estudio de estos sistemas para manejar información geográfica relevante para el tendido de líneas de transporte.

El objetivo de este estudio es seleccionar un paquete de software que ayude a analizar y caracterizar caminos que constituyan una red óptima de transporte. En base al mismo seleccionamos el programa gvSIG<sup>®</sup> para analizar la geografía de la provincia de Santa Cruz.



### **3.1 Introducción**

Las características geográficas de la provincia de Santa Cruz fueron introducidas mediante la utilización de gvSIG<sup>®</sup>. Esta herramienta está orientada al manejo de Sistemas de Información Geográfica. El objetivo de este análisis es tener en cuenta la geografía de la zona en el diseño de redes de cañerías.

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) (Maguire, 1991) es un sistema informático compuesto por hardware y software específicos, y una base de datos geográficos, capaz de capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar la información geográficamente referenciada, es decir, datos identificados de acuerdo a la ubicación. SIG es útil para resolver problemas complejos de planificación y gestión. La tecnología de los Sistemas de Información Geográfica puede ser utilizada para investigaciones científicas, gestión de recursos, gestión de activos, arqueología, evaluación del impacto ambiental, planificación urbana, cartografía, sociología, geografía histórica, marketing, logística, transporte etc.

La mayor utilidad de un sistema de información geográfica está íntimamente relacionada con la capacidad que posee para construir modelos o representaciones del mundo real a partir de las bases de datos digitales, esto se logra aplicando una serie de procedimientos específicos que generan aún más información para el análisis. Además, SIG es multidisciplinario, ya que usa datos y técnicas de profesionales y disciplinas académicas, y sus aplicaciones se encuentran en diversos campos.

### **3.2 Sistemas de Información Geográfica (SIG)**

SIG es un sistema integrado de medios y métodos informáticos capaces de recoger, verificar, almacenar, gestionar, actualizar, manipular, recuperar, transformar, analizar, mostrar y transferir datos espacialmente referidos, con el objetivo de resolver problemas de planeamiento y administración.

SIG funciona como una base de datos con información geográfica (datos alfanuméricos) que se encuentra asociada por un identificador común a los objetos gráficos de un mapa digital. De esta forma, señalando un objeto se conocen sus atributos e, inversamente, preguntando por un registro de la base de datos se puede saber su localización en la cartografía.

Las principales funciones que se llevan a cabo en un SIG son:

- ✓ Captura de la información: normalmente mediante de digitalización, procesamiento de satélite, fotografías, videos y aéreo-fotogramétricos.
- ✓ Análisis: se realiza tanto con los datos gráficos como no gráficos:
  - Aproximación de objetos sobre un área determinada
  - Coincidencia en la superposición de objetos sobre un mapa.

Un SIG debe tratar de responder: qué, quién, cuándo, dónde, por qué y cómo, por lo tanto se pueden generalizar las siguientes preguntas:

✓ **Localización: ¿Qué hay en este lugar?**

Identificar qué es lo que se encuentra en una determinada localización que puede describirse por su topónimo, por un código clasificado, o por referencias geográficas como latitud, longitud y altura. Esta información puede ser digitada o referenciada gráficamente. Por ejemplo indicar en un plano la ubicación de una empresa de manera que se pueda tener en pantalla su información registrada

✓ **Condición: ¿Dónde sucede...?**

Se busca un determinado lugar que reúna ciertas condiciones, requiere de un análisis espacial de búsqueda, por ejemplo, tener seleccionados en pantalla todas las empresas industriales registradas que tengan un área mayor de 2000 m<sup>2</sup>.



✓ **Tendencia: ¿Qué ha cambiado desde...?**

Permite conocer la variación de algunas características a través de un determinado periodo, por ejemplo, en el transcurso de un año cuántos y cuáles son las nuevas empresas industriales que se han registrado.

✓ **Distribución: ¿Qué patrones de distribución espacial existen?**

Busca determinar en una zona específica, las relaciones que pudieran existir entre dos o más variables. Por ejemplo, en un área definida cuan significativo es la cantidad de empresas que producen gases tóxicos.

### 3.3 Componentes de un SIG

Un sistema de información geográfica está integrado por cinco componentes como se detalla en la Figura 3.1.

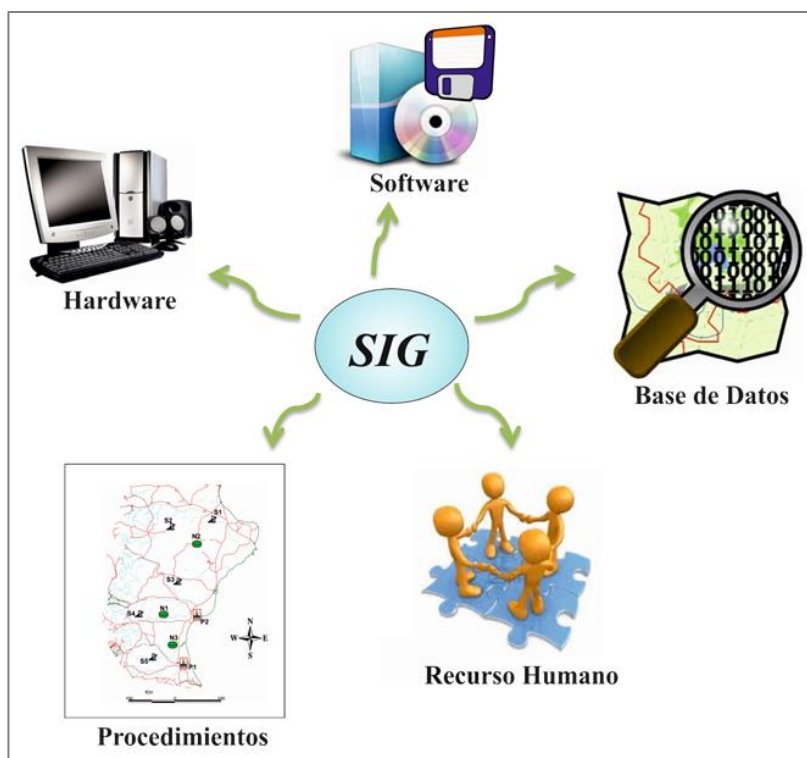


Figura 3.1: Componentes de un SIG

### **3.3.1 Hardware**

Este componente representa el soporte físico del SIG. Está conformado por computadoras donde se desarrollan las distintas tareas de administración y operación del sistema y por los servidores donde se almacenan los datos y se ejecutan ciertos procesos. Además cuenta con periféricos de entrada (como mesas digitalizadoras, scanner, dispositivos de lectura de archivos, etc.) y de salida (como los monitores, impresoras, plotter, etc.) en los cuales se realiza la representación de los datos. También, debe contar con componentes de la red informática para facilitar el intercambio de datos con otros sistemas.

### **3.3.2 Software**

Los programas de SIG cuentan con las funciones y herramientas necesarias para el tratamiento de la información para la entrada de datos, almacenar, manipular, analizar, procesar y desplegar la información geográfica. Estos programas deben contener interfaces gráficas avanzadas, así como un sistema óptimo que manipule las bases de datos.

Existen herramientas gratuitas, con las cuales se puede observar la información geográfica, pero el acceso del público en general a los geo-datos está dominado por los recursos en línea y otros basados en tecnología la cartografía web.

En la actualidad con la alta demanda de datos geográficos y la facilidad de ingresar a Internet, el software SIG tiene una distribución de datos a través de redes que facilita al usuario obtener información.

### **3.3.3 Base de Datos**

La base de datos es la parte más importante de un SIG, y de ellos va a depender los resultados que se puedan obtener. Hay empresas e instituciones públicas que se están especializando en la recolección de la información, es de esperar que en poco tiempo se pueda contar con información actualizada y fácil de adquirir.

La información geográfica tiene tres atributos:

- ✓ Espacial: delimitación espacial de cada uno de los objetos geográficos.
- ✓ Temático: datos asociados a una localización.
- ✓ Temporal: describir los cambios ocurridos en el transcurso del tiempo.

### **3.3.4 Recurso Humano**

El recurso humano necesario para administrar y utilizar SIG se puede dividir en dos tipos:

- ✓ manejo del software
- ✓ tratamiento de la información

Trabajar con los recursos humanos, conformar los equipos, producir cambios en sus hábitos de trabajo, brindar capacitación y obtener resultados en los procesos de trabajo, son tareas difíciles de llevar adelante y la importancia y esfuerzos que se dediquen en este sentido no deben ser subestimados.

Al diseñar e implementar un SIG, deben identificarse claramente los distintos roles de los recursos humanos. Es importante conformar áreas de soporte especializado al sistema. En estas áreas se encuentran programadores, analistas de sistemas, administradores de bases de datos, especialistas en cartografía, etc.

### **3.3.5 Procedimientos**

Para trabajar con un SIG es necesario contar con una estructura organizada que permita obtener un modelo bien diseñado. El modelo plasma las prácticas operativas propias de cada organización, debe existir un modelo que represente la realidad. Una definición clara de los procedimientos a ejecutar resulta imprescindible para una correcta identificación de las necesidades de software, aplicaciones, conformación de la base de datos, hardware y capacitación.

### 3.4 gvSIG®

Existen gran variedad de programas que se utilizan para el tratamiento de la información geográfica. Generalmente, su uso es pago, lo cual constituye una desventaja.

El programa gvSIG® (2014) es de código abierto y cuenta con una licencia GPL (de sus siglas en inglés: General Public License) gratuita. Este programa fue diseñado para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas, la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión. Su principal característica es que dispone de una interfaz amigable y sencilla, siendo capaz de acceder a los formatos más comunes. Además, cuenta con un amplio número de herramientas para trabajar con información de naturaleza geográfica (herramientas de consulta, creación de mapas, redes, etc.) que lo convierten en una herramienta ideal para usuarios que trabajen con la componente territorial.

En la Figura 3.2 se presenta en forma ilustrativa el programa gvSIG®, donde se puede apreciar la forma en que se administra y gestiona la información. La interfaz gráfica de gvSIG® es intuitiva y fácil de manejar, al alcance de cualquier usuario familiarizado con los Sistemas de Información Geográfica (gvSIG Association, 2010).

Está orientado a usuarios finales que manejan información geográfica, profesionales o personal de administraciones públicas. Además, resulta de especial interés en áreas de investigación, debido a que cuenta con una componente I+D+I (Investigación + Desarrollo + Innovación).

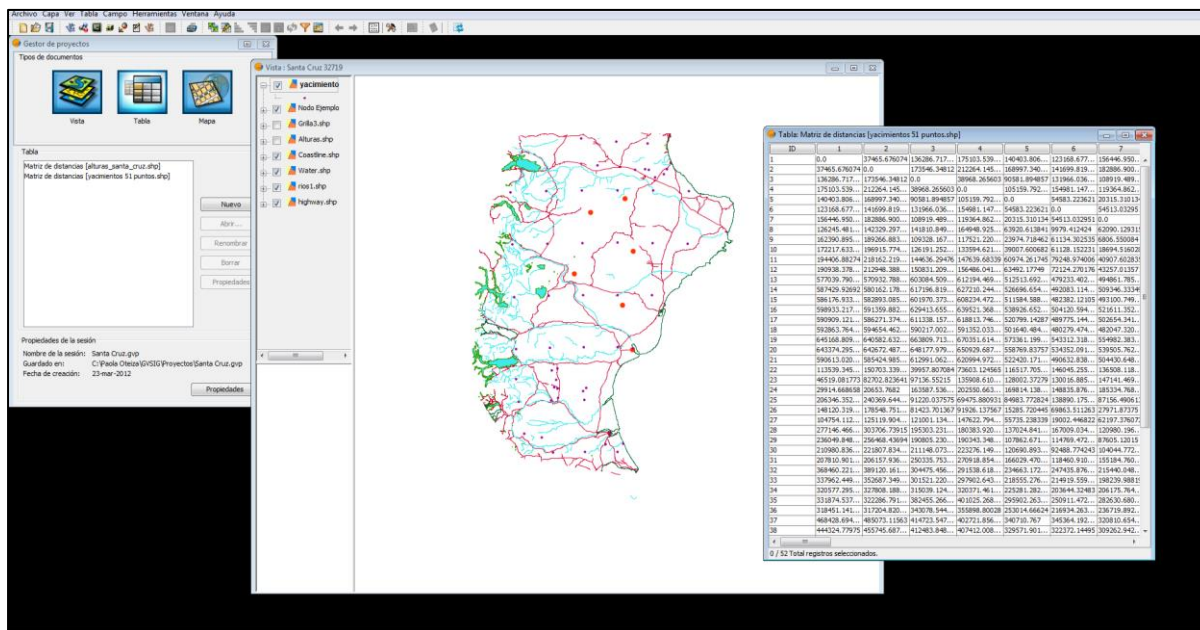
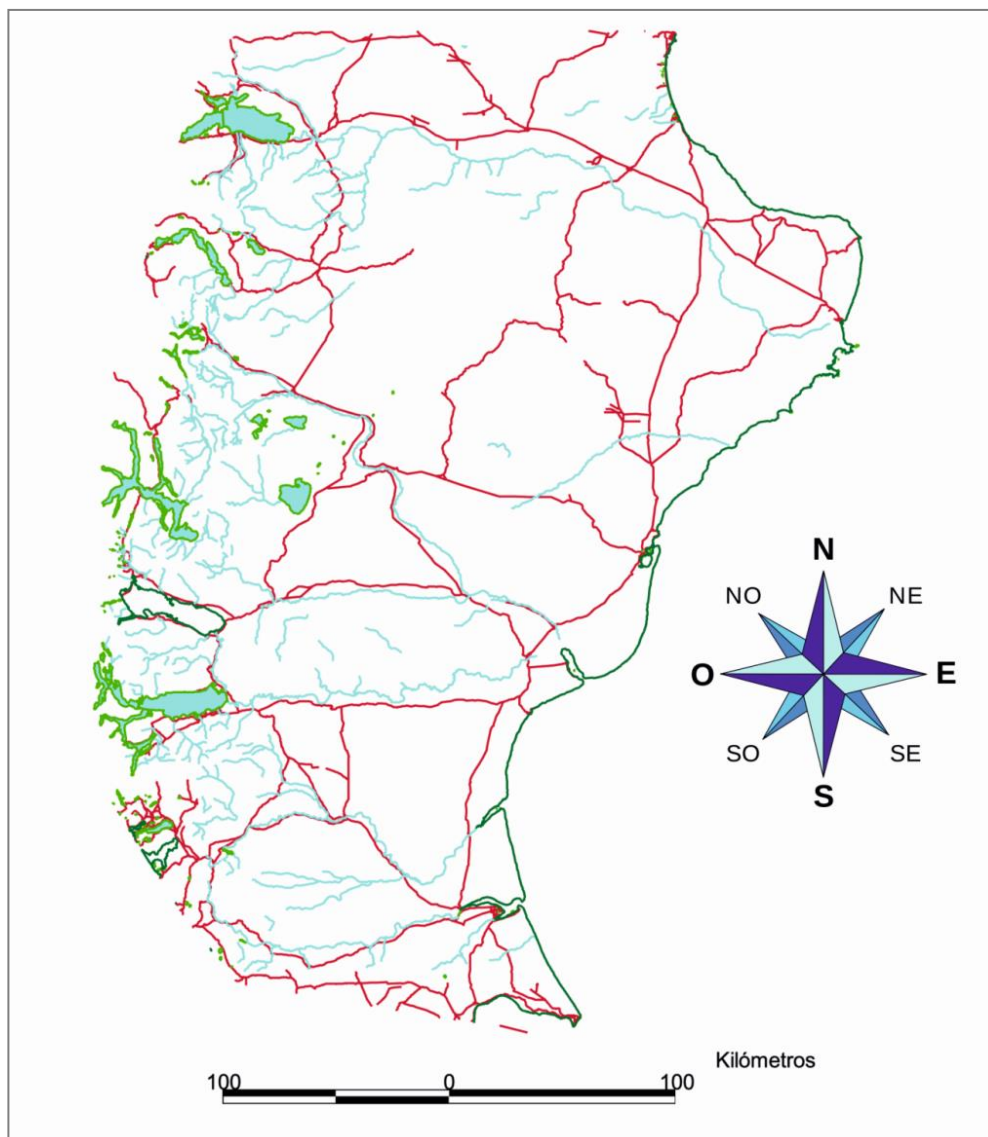


Figura 3.2: Visualización de la herramienta gvSIG®

### 3.5 Características Geográficas de la Provincia de Santa Cruz

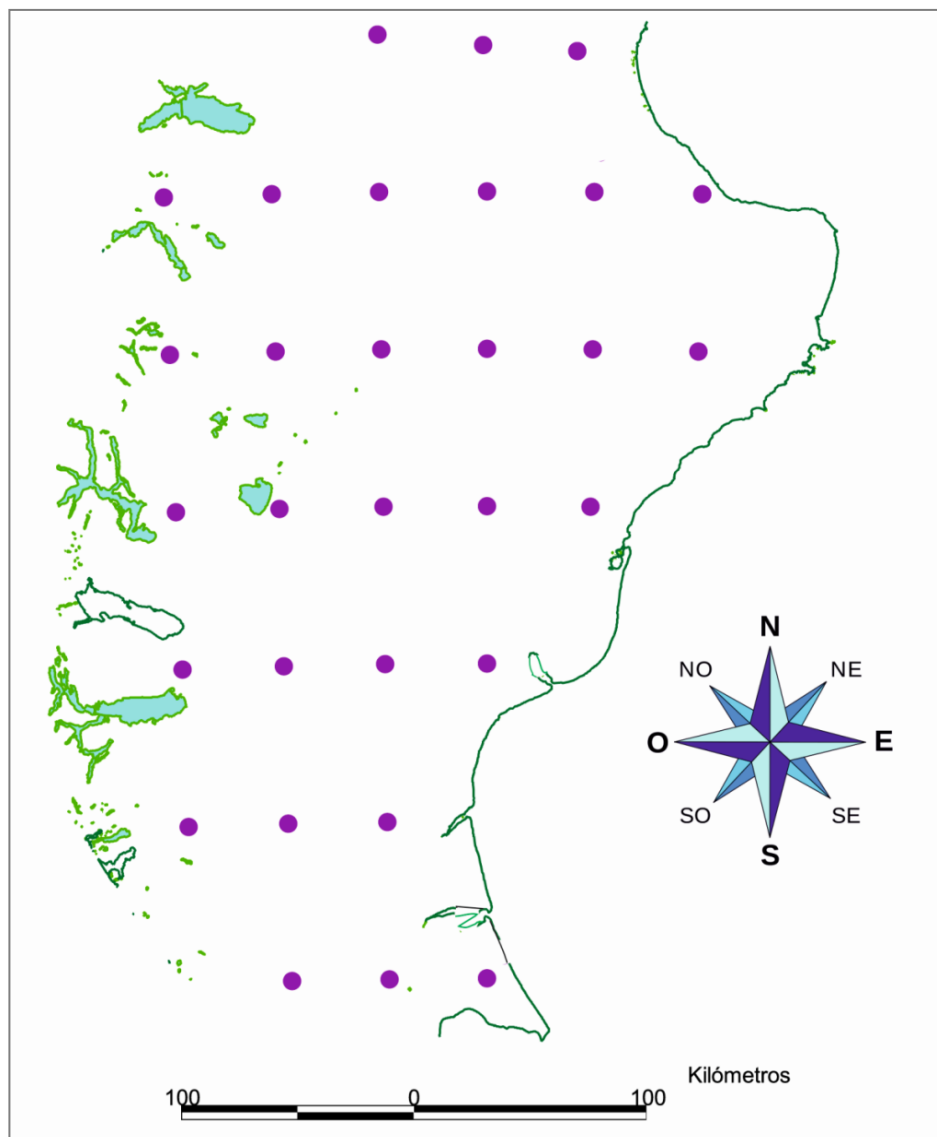
La herramienta gvSIG® fue empleada para describir la complejidad geográfica del área de interés. Las características geográficas son importantes debido a que afectan al costo de construcción de la red. Este costo se incrementa cuando la cañería debe atravesar ríos, rutas o apreciables cambios de nivel. Para el caso del área de estudio las características geográficas fueron tomadas de bases de datos disponibles en Internet. (Secretaría de Energía, 2012). Se analizaron estas características mediante gvSIG® para ser empleadas en el diseño de la red. Además, se obtuvieron las distancias que existen entre los yacimientos ( $S_i$ ) y las posibles plantas de procesamiento ( $P_i$ ) y de esta forma podemos visualizar la distribución de yacimientos en la zona de estudio. La matriz de distancias se puede observar en el Anexo A (Tabla A.1).

En la Figura 3.3 se muestra el mapa generado por gvSIG®, donde se pueden observar líneas rojas que corresponden a las rutas y caminos que se encuentran en Santa Cruz y líneas celestes que corresponden a los principales ríos.



**Figura 3.3:** Ríos y rutas en la provincia de Santa Cruz

La herramienta gvSIG<sup>®</sup> también se utilizó para generar una grilla de nodos concentradores en los cuales se ubicarían los centros de almacenamiento. La grilla se realizó ubicando nodos con una distancia que varía entre 50 y 100 Km, de esta forma pudimos generar una red de 28 nodos (Figura 3.4). Estos nodos se utilizaron para la selección de las potenciales localizaciones de los centros de almacenamiento en los Capítulos 5 y 6.



**Figura 3.4:** Grilla de nodos concentradores

En la Figura 3.5 se muestran las alturas absolutas de la provincia, mientras que en la provincia. Se analizaron las zonas en las que se encuentran los yacimientos, los nodos concentradores y las plantas. Finalmente, se generó una matriz de diferencia de altura entre ellos (Tabla A.2). Estas alturas obviamente tienen influencia en el costo de bombeo.

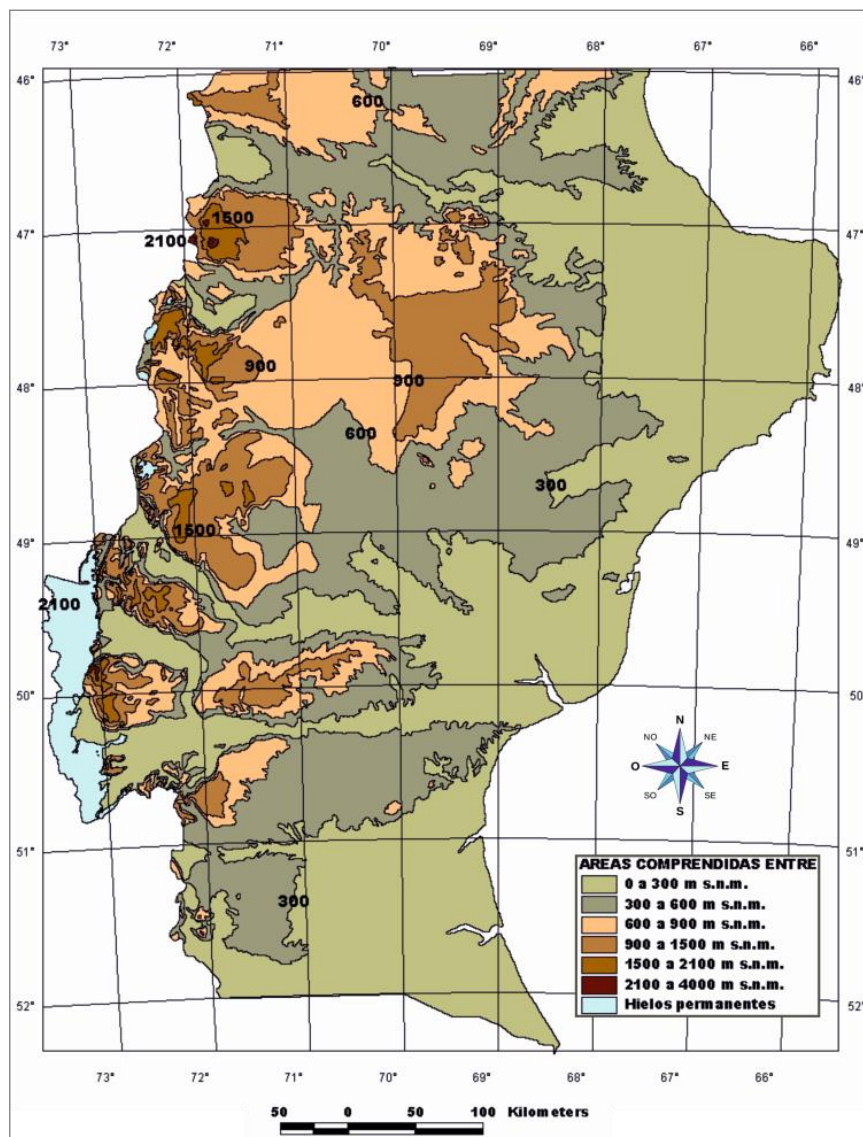


Figura 3.5: Alturas Absolutas de la provincia de Santa Cruz (Gonzales y Rial 2003)

A continuación, se muestra un ejemplo de aplicación de la información geográfica obtenida. Se tomó un yacimiento y su conexión con un nodo concentrador y la planta de procesamiento. En la Figura 3.6 se puede apreciar los ríos y rutas que se encuentran entre las conexiones, las diferencias de altura y la distancia entre los puntos. Estas características fueron analizadas para ser contempladas en el diseño de la red de transporte.



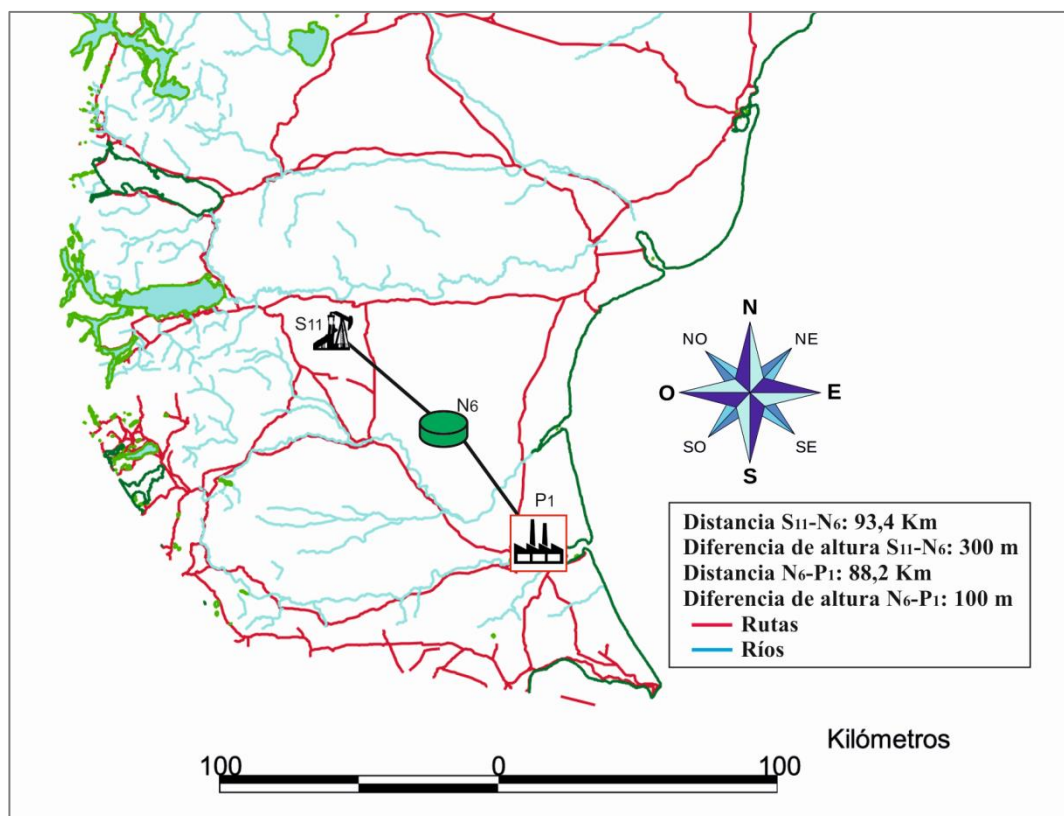


Figura 3.6: Ejemplo sobre el análisis de las características geográficas

### 3.6 Conclusiones

Los Sistemas de Información Geográfica son buenos para construir modelos realistas a partir de bases de datos digitales, que se pueden aplicar en investigaciones científicas, gestión de recursos, gestión de activos, arqueología, evaluación del impacto ambiental, planificación urbana, cartografía, sociología, geografía histórica, marketing, logística, transporte, etc.

En la actualidad con la alta demanda de datos geográficos y la facilidad de ingresar a Internet, los paquetes de software SIG tienen una distribución de datos a través de redes que facilita al usuario obtener información. La calidad de estos paquetes se basa principalmente en su riqueza de datos geográficos precisos y confiables.

La revisión bibliográfica y el estudio de los sistemas SIG en esta tesis fue útil como base para seleccionar un paquete de software que ayude a analizar y caracterizar caminos que constituyan una red óptima de transporte de gasolina natural. La herramienta gvSIG® (2014)

fue empleada para estudiar la geografía del terreno de los casos de estudio y capturar la complejidad del mismo.

Para contemplar en cada red propuesta sus ventajas e inconvenientes asociados a la geografía, sería necesario implementar un módulo geográfico que esté conectado al módulo de optimización del diseño de la red de cañerías. De esta forma, ambos módulos trabajarían en conjunto.

# CAPÍTULO 4

## DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE CAÑERÍAS

---

### *Contenido del Capítulo*

En este capítulo se presentan los primeros modelos matemáticos desarrollados en esta tesis para el diseño de redes de cañerías. Se demuestra que estos modelos funcionan bien con un tratamiento simplificado. A partir de los resultados preliminares surge la necesidad de implementar una metodología de optimización mediante un recurso heurístico que permita explorar y explotar adecuadamente el espacio de búsqueda.

Además, se estudiaron técnicas clásicas para la localización de nodos concentradores, se presentó un caso de estudio particular, la Cuenca Austral, y se lo analizó mediante un análisis FODA.



## **4.1 Introducción**

En Oteiza, *et al.* (2009) se comenzó a plantear el diseño del modelo correspondiente a la optimización de las líneas de transporte. También se definió un grafo representativo para una red de transporte. Se consideraron dos escenarios (estados) mediante una evaluación comparativa que consiste en la adaptación de una metodología basada en ponderaciones. Los resultados obtenidos no permiten una clara identificación del más conveniente. Este análisis preliminar demuestra la necesidad de elaborar un modelo realista y más preciso para la localización de la planta de procesamiento. De este modo, será posible discriminar entre los estados factibles. A continuación, se planteó un modelo simplificado de optimización multi-objetivo (Oteiza, *et al.* 2010) con el método de agregación, teniendo en cuenta costos fijos para poder discriminar entre los estados posibles. Se desarrolló un modelo conceptual simplificado para plantear el problema de redes de transporte de gasolina natural. En este modelo conceptual, el objetivo es minimizar el costo de transporte. Se planteó la función objetivo, teniendo en cuenta las distancias entre yacimientos y el costo de construcción. Para este modelo se utilizó el paquete GAMS (Brooke *et al.*, 2004). Como caso de estudio en este capítulo se tuvo en cuenta la Cuenca Austral.

## **4.2 Aplicación de Técnicas Clásicas**

Es importante señalar que la instalación de nodos concentradores en redes de transporte que conducen materia prima a plantas de procesamiento es fundamental para mejorar la flexibilidad de la planta. Por razones operativas, sirven para acumular reservas. Entonces, este almacenamiento extra puede garantizar la productividad. Por ejemplo, si un yacimiento detiene su producción por alguna razón, la operación de la planta no se verá afectada por ese evento. Por otra parte, los nodos concentradores son ventajosos para fines de seguridad, ya

que permiten trasladar la acumulación de productos hacia las zonas de menor riesgo, es decir, lejos de las plantas petroquímicas o zonas pobladas.

Se realizó una revisión bibliográfica sobre las técnicas clásicas de logística para la ubicación de nodos concentradores. En base a esta revisión, se estudiaron los siguientes métodos (Ares, 2003):

- ✓ Método gráfico de Weber
- ✓ Centro de gravedad
- ✓ Método exacto de la cuadrícula

El método gráfico de Weber ubica una instalación central minimizando las distancias euclídeas hacia cada uno de los yacimientos. El método del centro de gravedad, además incorpora información sobre el volumen de producción de cada uno de los yacimientos, provocando la atracción del nodo concentrador hacia el sector donde la producción es mayor. Sin embargo, dado que en la métrica euclídea las coordenadas  $X$  e  $Y$  no son independientes entre sí, se concluye que la solución ofrecida por el método de gravedad no es exacta y se recomienda mejorar esa solución iterando sucesivamente como lo indica el método exacto de la cuadrícula (Ares, 2003). Con estos métodos obtenemos una orientación sobre posibles ubicaciones del nodo concentrador. En la Figura 4.1 se muestra los resultados obtenidos por dos de los métodos.

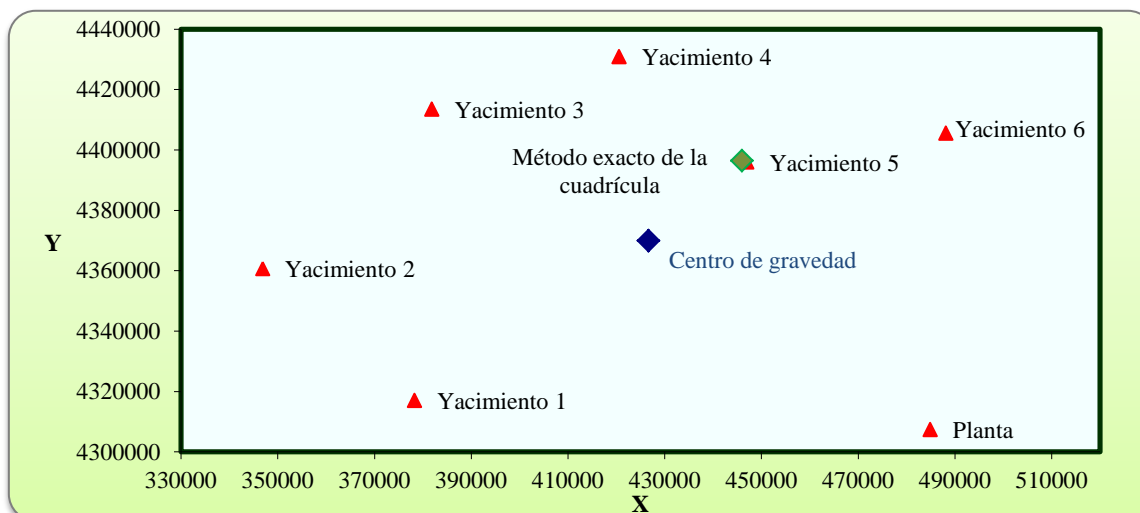


Figura 4.1: Resultados de los métodos centro de gravedad y exacto de la cuadrícula

En la Figura 4.1 se observan las alternativas encontradas por ambos métodos para la ubicación del nodo concentrador. Consideramos que es necesario incorporar más información relacionada a nuestro caso de estudio, tales como costo de instalación, datos geográficos, etc., que podrían modificar las ubicaciones ya encontradas obteniendo una ubicación más conveniente.

Luego en una segunda etapa se evalúan las diferentes alternativas aplicando otras técnicas (Pérez Gosende y Diéguez Matellán, 2010) conocidas como:

- ✓ Factores ponderados
- ✓ Método del transporte

Estas técnicas nos permiten evaluar las ubicaciones de los nodos concentradores obtenidas anteriormente.

El método de Factores ponderados tiene en cuenta factores, tales como distancias entre los yacimientos y el nodo concentrador, alturas absolutas, ríos, rutas y caminos que se encuentran entre el nodo concentrador y los yacimientos. Se establece una ponderación  $v_i$  [0-100] para cada factor y para cada alternativa de localización se asigna una puntuación en una escala de 0-10.

En la Tabla 4.1 se observa que la mejor alternativa para la ubicación del nodo concentrador, es la encontrada mediante el método del Centro de gravedad.

Factores	$v_i$	Centro de Gravedad	Método Exacto de la Cuadrícula	Planta
Distancias	40	8	7	4
Alturas Absolutas	30	8	7	4
Ríos	20	8	8	3
Rutas / Caminos	10	7	7	4
Total	100	790	720	380

**Tabla 4.1:** Factores ponderados

Luego se evaluaron las alternativas mediante el Método del transporte. Esta técnica tiene en cuenta el costo de instalación de la red de transporte en función de las distancias existentes entre los yacimientos, el nodo concentrador y la planta. El resultado de este método coincide con el obtenido por el método de Factores ponderados, proponiendo localizar el nodo concentrador como lo indica el método del Centro de gravedad.

A partir de las investigaciones realizadas surge la necesidad de estudiar en profundidad los factores que podrían llegar a influir en la elección de la ubicación del nodo concentrador, tales como ubicación geográfica, costo de instalación, etc. También es importante realizar un análisis de precisión para cuantificar los errores de entrada, de manera que los resultados obtenidos sean confiables. Este estudio es importante ya que la decisión es proyectada a futuro, lo cual implica que debería ser válida a largo plazo.

### 4.3 Análisis FODA

Se realizó un análisis FODA (Hill y Westbrook, 1997) para evaluar la propuesta de diseño de una red de cañerías para el transporte gasolina natural a través de la zona de la Cuenca Austral. El objetivo del análisis FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas), es identificar y analizar las fuerzas y debilidades de la propuesta, así como también las oportunidades y amenazas para tener una visión global de su factibilidad. Este



análisis nos permite visualizar las estrategias que se aplicarán cuando el proyecto esté en marcha.

Se evaluaron los cuatro factores y se utilizó la herramienta gratuita Inghenia SWOT (Inghenia, 2009) para realizar el análisis. En la Figura 4.2 se muestran los resultados del análisis.

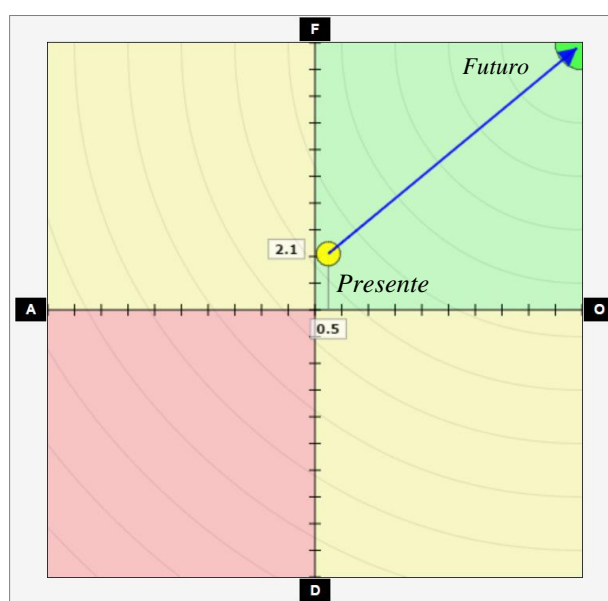


Figura 4.2: Gráfico obtenido el análisis FODA

El gráfico muestra el promedio de los factores para el eje vertical Debilidades (D)-Fortalezas (F) y el eje horizontal Amenazas (A)-Oportunidades (O). La flecha azul indica el vector estratégico hacia la situación óptima marcada con el círculo verde en el ángulo superior derecho del diagrama. El círculo amarillo muestra la situación actual del proyecto, está en una zona favorable ya que se encuentra en el cuadrante en el cual está la situación óptima, pero igual surge la necesidad de generar estrategias en el futuro para asegurar el éxito del proyecto.

En la Figura 4.3 se muestra el programa Inghenia SWOT donde se resume y clasifica un listado de consideraciones que se tuvieron en cuenta en este estudio.

Fortalezas		Peso	Debilidades		Peso
Redes de Transporte: Seguridad Operativa		8	Costos fijos		5
Cuenca Austral- Producción de GN		5	Declinación de los pozos		5
Obtención de productos de mayor valor		5	Costos operativos		2
Río Gallegos		4			
Disminuir la importación		4			
Nuevos Pozos		4			
Puerto Santa Cruz		3			
<b>Total</b>		<b>33</b>	<b>Total</b>		<b>12</b>
Oportunidades		Peso	Amenazas		Peso
Alta demanda de energía		4	Leyes que impidan la instalación de ductos		2
No existen líneas de transporte específicas para GN		2	Leyes que impidan la instalación de la planta		2
<b>Total</b>		<b>6</b>	<b>Total</b>		<b>4</b>

Figura 4.3: Resumen y clasificación de las consideraciones

Este análisis se emplea por lo general, en empresas en las cuales se quiere saber el estado en el mercado y la situación interna. Aquí se aplicó en un proyecto ingenieril. Por lo tanto, es una aplicación original que resulta útil para definir y analizar las estrategias que se deben generar cuando el proyecto está en marcha.

#### 4.4 Modelo de Transporte de la Gasolina Natural

##### 4.4.1 Modelo Matemático Mediante Grafos

En Oteiza, *et al.* (2009) se definieron varios casos (Estados) basados en aspectos relevantes, tales como la existencia de yacimientos activos, consideraciones geográficas y potenciales puntos de localización de la planta de proceso. Los grafos desarrollados están compuestos por nodos ( $S_i$ ) pertenecientes a los yacimientos y por aristas que serán las líneas de transporte hacia el nodo final ( $S_o$ ), en el cual se localizaría eventualmente la planta petroquímica. Estos grafos también contienen nodos concentradores ( $N_k$ ), que agrupan las líneas de transporte de los yacimientos cercanos para obtener solo una ruta y de esta manera reducir costos en los materiales de construcción de la misma.

La elección de los yacimientos se basó en la producción de gasolina natural del año 2007 (IPA, 2008), incluyendo sólo los de mayor importancia. La Tabla 4.2 muestra la producción de gas natural y gasolina natural correspondiente al año 2007.

Yacimientos [ $S_i$ ]	Gasolina natural [ $m^3$ ]	Gas natural [ $Mm^3$ ]
La Porfiada ( $S_1$ )	14383	479419
La Paz ( $S_2$ )	8313	277108
Campo Boleadora ( $S_3$ )	15413	513777
Campo Bremen ( $S_4$ )	237	7301
Estancia dos Lagunas ( $S_5$ )	7232	178469
Puesto Peter ( $S_6$ )	1798	59921
Barda las Vegas ( $S_7$ )	681	22705
Cerro Norte ( $S_8$ )	2818	136828
Océano ( $S_9$ )	7012	233748

**Tabla 4.2:** Producción de Gasolina Natural y Gas Natural en la Cuenca Austral

Luego, se seleccionaron dos posibles puntos geográficos, Puerto Santa Cruz y Río Gallegos para ubicar la planta ( $S_o$ ) de procesamiento de gasolina natural teniendo en cuenta fundamentalmente la necesidad de disponer de facilidades para el transporte marítimo, de energía y de agua. En la Figura 4.4 se muestra la localización de los yacimientos y la localización de las plantas. Las líneas rojas corresponden a las principales rutas y caminos mientras que las celestes indican los principales ríos de la zona. Además, para este análisis se utilizaron los datos de diferencia de altura que se obtuvieron en el Capítulo 3. En la Tabla 4.3 se presentan las distancias que se utilizaron para la evaluación de las redes.

Yacimientos [ $S_i$ ]	Distancia $S_i-S_o$ [Estado 1]	Distancia $S_i-S_o$ [Estado 2]
La Porfiada ( $S_1$ )	179	168
La Paz ( $S_2$ )	163	181
Campo Boleadora ( $S_3$ )	129	184
Campo Bremen ( $S_4$ )	103	150
Estancia dos Lagunas ( $S_5$ )	105	131
Puesto Peter ( $S_6$ )	131	197
Barda las Vegas ( $S_7$ )	87	197
Cerro Norte ( $S_8$ )	28	212
Océano ( $S_9$ )	37	205

**Tabla 4.3:** Distancias entre los yacimientos y las plantas [Km]

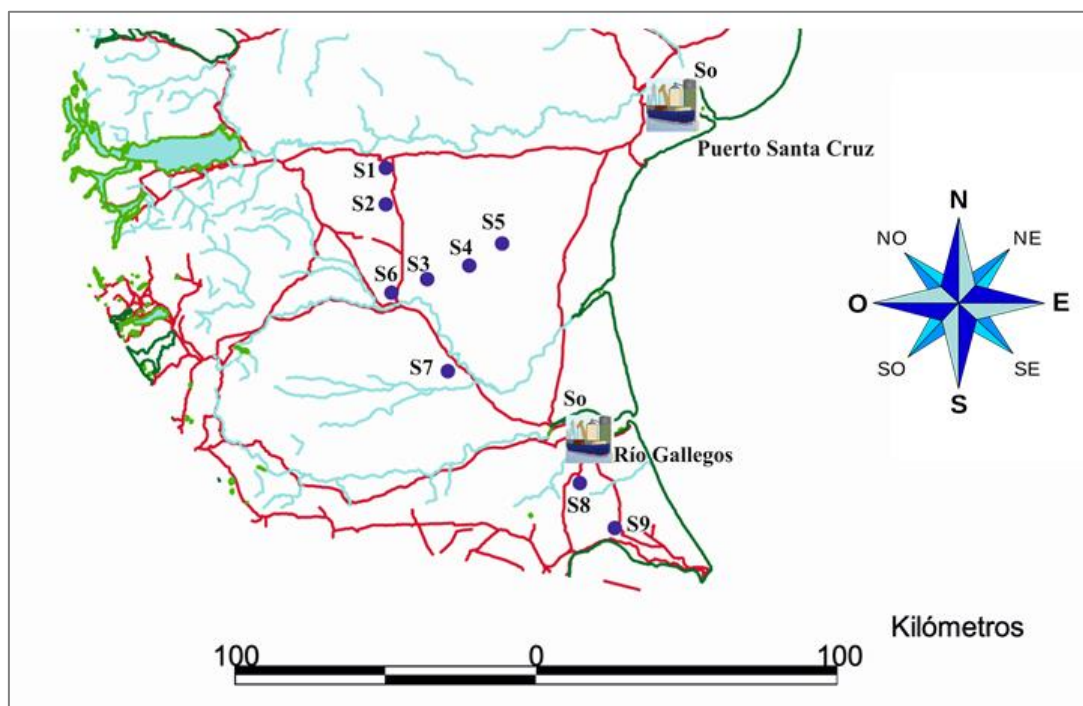


Figura 4.4: Ubicación de los nodos  $S_i$  y de los posibles nodos finales  $S_o$

#### 4.4.1.1 Metodología

Una vez ubicados los yacimientos y las posibles plantas de procesamiento se generaron los grafos correspondientes a tres posibles estados. En la Figura 4.5 corresponde al Estado 1 en el cual la planta ( $S_o$ ) se localizaría en Río Gallegos. Las Figuras 4.6 y 4.7 corresponden al Estado 2, en este caso la planta ( $S_o$ ) se situaría en Puerto Santa Cruz. El Estado 2 comprende dos sub-casos. En la Figura 4.6 se puede observar que el yacimiento  $S_8$  se conecta con el yacimiento  $S_7$ , mientras que en la Figura 4.7 el yacimiento  $S_8$  se conecta directamente al nodo concentrador ( $N_k$ ).

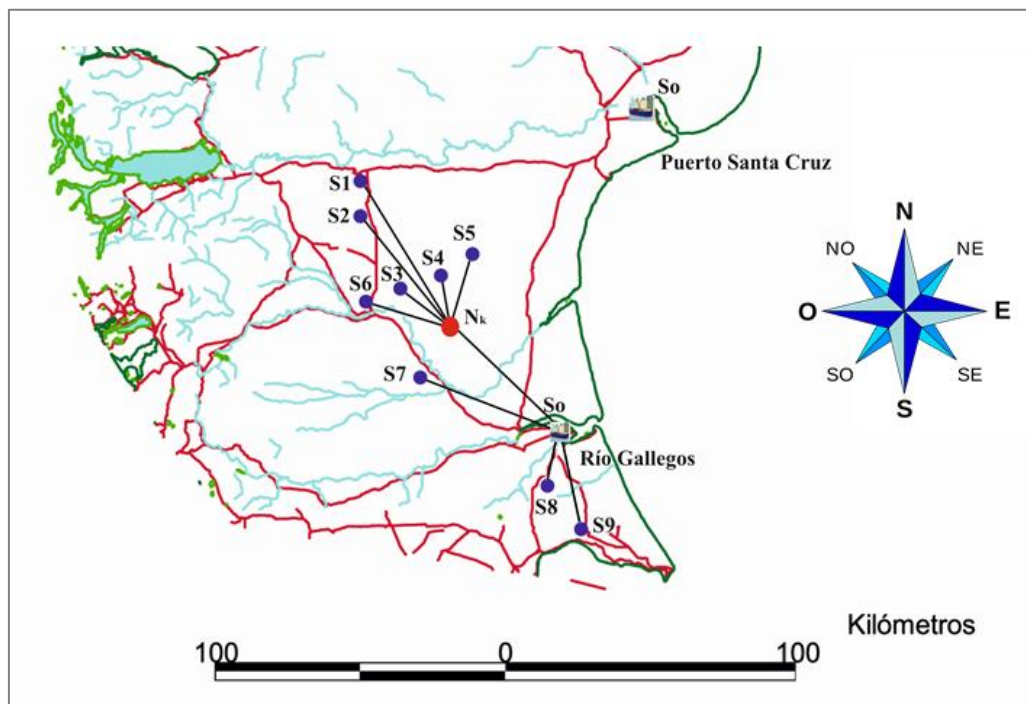


Figura 4.5: Grafo con  $S_o$  en Río Gallegos (Estado 1) y nodo concentrador  $N_k$

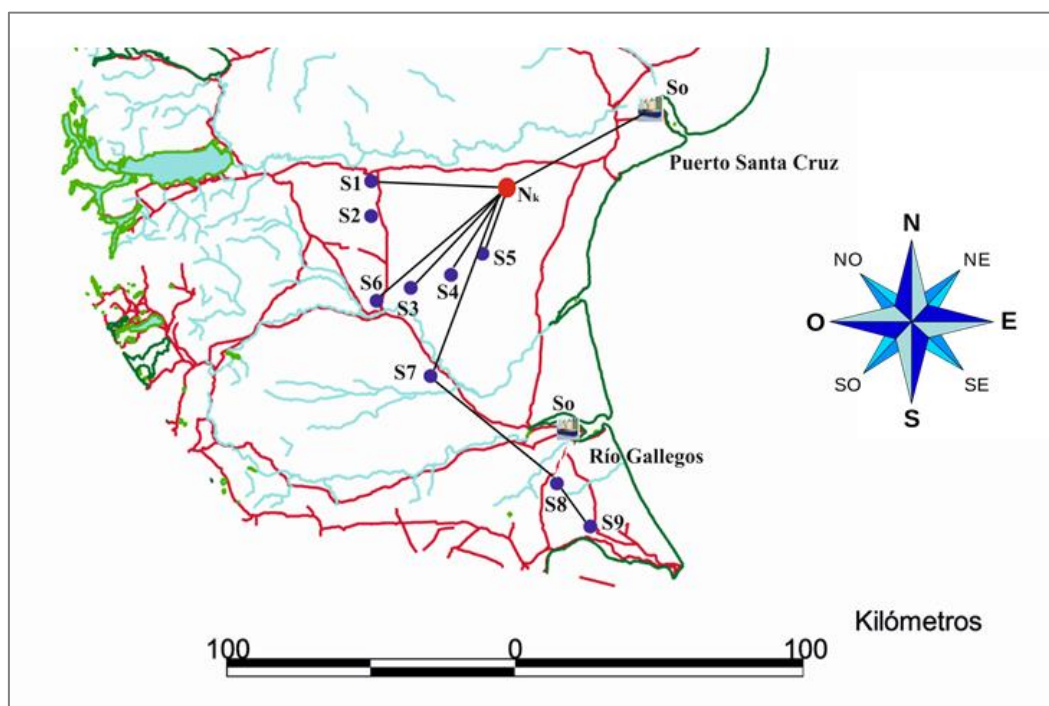
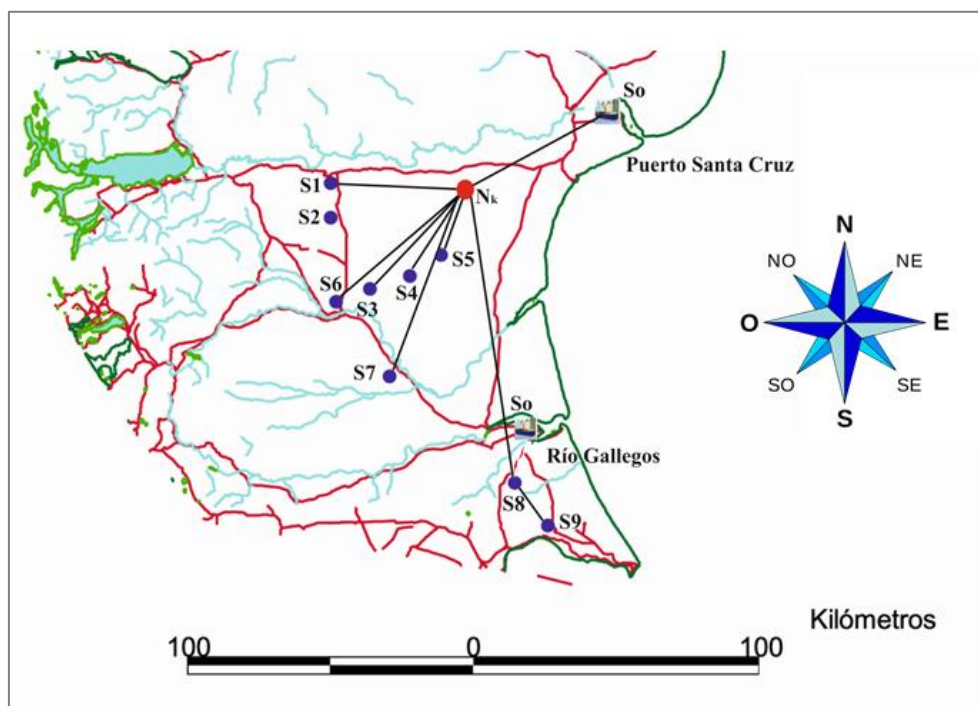


Figura 4.6: Grafo con  $S_o$  en Puerto Santa Cruz (Estado 2a) y nodo concentrador  $N_k$



**Figura 4.7:** Grafo con  $S_0$  en Puerto Santa Cruz (Estado 2b) y nodo concentrador  $N_k$

Luego, se evaluó para cada yacimiento su distancia a  $S_0$  y las alturas absolutas. En cada caso se le sumó a la distancia la diferencia de altura promedio para obtener una pendiente promedio. Se consideró que la mayor pendiente es la más desfavorable ya que esto está relacionado con la longitud del conducto y el costo de bombeo. Por último, se consideraron ríos, rutas y caminos importantes que se encuentran en el trayecto entre  $S_i$  y  $S_0$ .

En primera instancia, la evaluación comparativa se realizó mediante la adaptación de una metodología (Ore, 1990) basada en ponderaciones. En Oteiza, *et al.* (2009) se presenta una variante (Ec. 4.1) para la técnica de toma de decisiones más comúnmente usada en teoría de grafos. En forma independiente, se ponderó cada fila correspondiente a la situación  $i$ -ésima con el siguiente rango: se asignó valor  $p_{ij} = 1$  al nodo  $j$  más desfavorable y  $p_{ij} = 9$  al más favorable. Además, se asignó un factor de peso  $\omega_i$  a cada situación. Para el nodo  $j$ -ésimo se calculó la siguiente puntuación:

$$V_j = \sum_{i=1}^5 \omega_i p_{ij} \tag{Ec.4.1}$$

Finalmente, se sumaron los valores  $V_j$ , obteniéndose una puntuación final con la cual se valora cada estado.

#### 4.4.1.2 Resultados

En las siguientes tablas se muestran los resultados para cada estado:

Estado	E1: Río Gallegos									
Situación	$w_i$	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>	S <sub>7</sub>	S <sub>8</sub>	S <sub>9</sub>
Producción de Gasolina	1	8	7	9	1	6	3	2	4	5
Distancia Nodo -Planta	0.9	1	2	4	6	5	3	7	9	8
Alturas Absolutas	0.7	1	2	4	6	5	3	7	9	8
Ríos	0.5	4	4	4	4	4	4	4	9	9
Rutas / Caminos	0.3	6	6	6	6	6	6	9	8	8
$V_j$		13.4	14.0	19.2	14.4	17.8	11.6	17.9	25.3	24.7

Tabla 4.4: Valoración para el Estado 1

Estado	E2a: Puerto Santa Cruz									
Situación	$w_i$	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>	S <sub>7</sub>	S <sub>8</sub>	S <sub>9</sub>
Producción de Gasolina	1	8	7	9	1	6	3	2	4	5
Distancia Nodo -Planta	0.9	7	6	5	8	9	4	3	2	1
Alturas Absolutas	0.7	7	6	5	8	9	4	3	2	1
Ríos	0.5	9	9	9	9	9	9	6	4	4
Rutas / Caminos	0.3	7	7	7	7	7	7	5	2	2
$V_j$		25.8	23.2	23.6	20.4	27.0	16.0	11.3	9.8	9.2

Tabla 4.5: Valoración para el Estado 2a



Estado	E2b: Puerto Santa Cruz									
Situación	$w_i$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$	$S_7$	$S_8$	$S_9$
Producción de Gasolina	1	8	7	9	1	6	3	2	4	5
Distancia Nodo -Planta	0.9	7	6	5	8	9	4	3	2	1
Alturas Absolutas	0.7	7	6	5	8	9	4	3	2	1
Ríos	0.5	9	9	9	9	9	9	6	4	4
Rutas / Caminos	0.3	7	7	7	7	7	7	5	3	3
$V_j$		25.8	23.2	23.6	20.4	27.0	16.0	11.3	10.1	9.5

Tabla 4.6: Valoración para el Estado 2b

En la Tabla 4.4 la suma de los  $V_j$  proporciona una puntuación final igual a 158.3. En la Tabla 4.5 dicha suma provee una puntuación de 166.3. Finalmente, en la Tabla 4.6 la suma de los  $V_j$  arroja una puntuación de 166.9.

La suma de las puntuaciones finales para los nodos de cada estado ( $E1:158$ ,  $E2a:166.3$ ;  $E2b:166.9$ ) no permite una clara identificación del más conveniente. Este análisis preliminar demuestra la necesidad de elaborar un modelo realista que otorgue más precisión a las valoraciones. De este modo, se podrá discriminar entre los estados factibles.

#### 4.4.2 Modelo Matemático Conceptual

Para un análisis más profundo se desarrolló un modelo conceptual, con el fin de minimizar el costo de transporte y maximizar el caudal de gasolina natural. Por el método de agregación se consideraron los dos objetivos en dicha función. Este modelo busca la posición más favorable del nodo concentrador  $N_k$ . Como base para el planteo, se utilizó la teoría de modelos de transporte descripta en Anderson *et al.* (1999).

Luego, se formularon las restricciones que presenta el problema. Estas son, por ejemplo, el costo de bombeo de gasolina natural, el agotamiento de los pozos, la posibilidad de nuevas perforaciones, reservas ecológicas, clima de la zona, geografía, etc.

De esta manera se trasladó el objetivo y las restricciones del problema, del mundo real a un conjunto de relaciones matemáticas que se conoce como modelo matemático.



Por lo tanto, para poder efectuar el modelo computacional que corresponde a la optimización de estos caminos, es necesario realizar una valoración definiendo modelos más precisos que describan matemáticamente cada situación. Por otra parte, cabe destacar que los nodos concentradores  $N_k$  fueron elegidos a través de “la regla del pulgar” pero se debería plantear un sub-problema con el cual se pueda obtener la ubicación más precisa y adecuada del nodo concentrador para cada estado. La función objetivo obtenida en Oteiza, *et al.* (2010) busca un nodo concentrador en el cual se concentra toda la producción y luego transportarla hacia la planta de procesamiento. Finalmente, se desarrolló un modelo simplificado para plantear el problema de redes de transporte de gasolina natural.

Dada la realidad económica de Argentina resulta necesario plantear un problema de optimización donde se logre aislar el término económico de otras variables de interés. Ese término estaría vinculado con algún modelo económico diseñado en particular para la economía argentina. Por esta razón se decidió adoptar el método de agregación para plantear la función objetivo. Este enfoque es mucho más flexible que otros métodos que resuelven un modelado fijo. Finalmente, se obtuvo la siguiente función objetivo:

$$\min z = \left( \sum (P_i x_i) + P_o y \right) \quad (\text{Ec. 4.2})$$

Dónde:

$P_i$  = costo de transporte desde el yacimiento al nodo concentrador (US\$/ Km).

$P_o$  = costo de transporte desde el nodo concentrador a la planta (US\$/ Km).

$x_i$  = distancia entre el yacimiento  $i$ -ésimo y el nodo concentrador (Km).

$y$  = distancia entre el nodo concentrador y la planta (Km).

$z$  = costo total de transporte de gasolina natural (US\$/).

Las variables de la función objetivo son  $x_i$  e  $y$ , las cuales tomarán los valores óptimos que garanticen el menor costo total de transporte ( $z$ ).

Para poder comenzar a desarrollar el modelo se tomaron las siguientes consideraciones:

- $P_i$  y  $P_0$  se tomaron sólo en base al diámetro de los conductos, y se trabajó con valores teóricos (Parker, 2004). Se consideró un diámetro de 4" para los tramos entre los yacimientos y los nodos concentradores y de 10" entre los nodos y la planta. Los valores obtenidos para los caminos son:  $P_i = 186.451$  US\$/Km y  $P_0 = 310.752$  US\$/Km.
- En el modelo sólo se consideraron las distancias como variables.

#### 4.4.2.1 Restricciones del Modelo

Mediante el Teorema del Coseno y la ubicación de los ángulos de localización de los yacimientos se logró relacionar a las distancias  $x_i$  e  $y$ , quedando la siguiente expresión:

$$x_i = \sqrt{y^2 + d_i^2 - 2d_i y \cos \beta_i} \quad (\text{Ec. 4.3})$$

$$\pi_i + \beta_i = \delta \quad (\text{Ec. 4.4})$$

$$0^\circ \leq \delta \leq 180^\circ \quad (\text{Ec. 4.5})$$

Las expresiones Ec. 4.3, Ec. 4.4 y Ec.4.5 se obtuvieron a partir de las Figuras 4.8 y 4.9. En estas figuras se observan los triángulos que se forman entre el yacimiento ( $S_i$ ), la planta y el nodo concentrador. Se trabajó con una línea imaginaria que se ubicó geográficamente a  $50^\circ$  en el estado  $E1$  y  $135^\circ$  en el estado  $E2b$  de la línea formada entre los puntos cardinales Norte y Sur, de esta manera se obtiene el ángulo  $\delta$  que se forma entre la línea imaginaria y la distancia ( $y$ ) entre el nodo concentrador y la planta y es común para todos los casos. Tal como se ve en la Figura 4.9, también se obtiene al ángulo  $\beta_i$  formado por  $y$  y la distancia ( $d_i$ ) entre el yacimiento y la planta. Por último, se observa el ángulo  $\pi_i$  localizado entre  $d_i$  y la línea imaginaria.

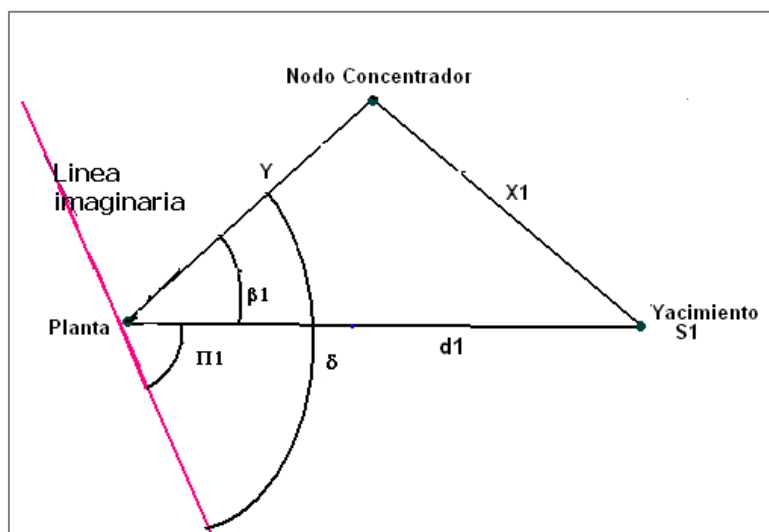


Figura 4.8: Ángulos de un yacimiento con respecto al nodo concentrador y la planta

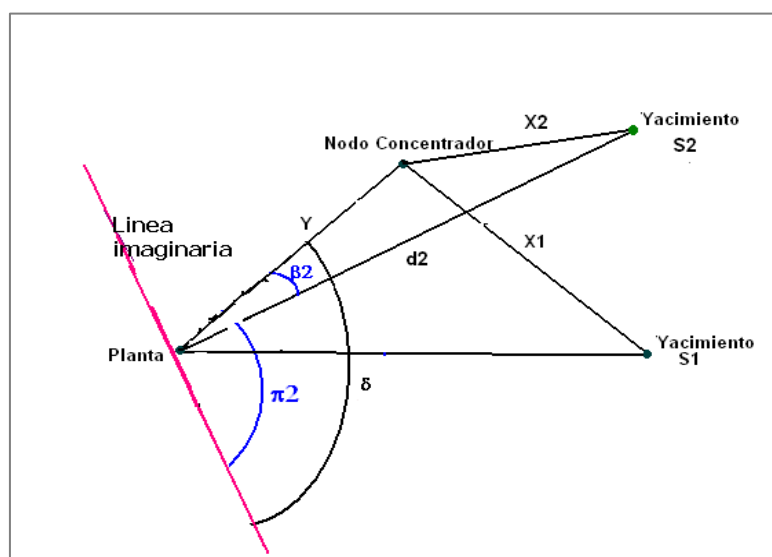


Figura 4.9: Ángulos para la multiplicidad de yacimientos

Luego, se utilizó el paquete GAMS (2004), ingresando este modelo con el objeto de evaluar los dos estados: *E1* (Río Gallegos) y *E2b* (Puerto Santa Cruz).

#### 4.4.2.2 Resultados

En la Tabla 4.7 se observan los valores obtenidos mediante la aplicación del modelo para optimizar las distancias ( $x_i$ ) al nodo concentrador, con lo cual se logra ubicar del modo más conveniente dicho nodo. Con un costo total de 119.732.879 US\$.

Yacimiento	Variable $x_i$	Km
S <sub>1</sub>	$x_1$	112.16
S <sub>2</sub>	$x_2$	89.53
S <sub>3</sub>	$x_3$	50.18
S <sub>4</sub>	$x_4$	53.84
S <sub>5</sub>	$x_5$	72.29
S <sub>6</sub>	$x_6$	48
S <sub>7</sub>	$x_7$	0

Tabla 4.7: Resultados de la variable  $x$  para el Estado E1

Además, se obtuvo el valor de la variable  $y$  ( $y = 87 \text{ Km}$ ). Luego, los datos arrojados por el modelo se volcaron en el siguiente mapa quedando definida la ubicación del nodo concentrador ( $N_k$ ) y las líneas de transporte para el Estado E1 (Figura 4.10).

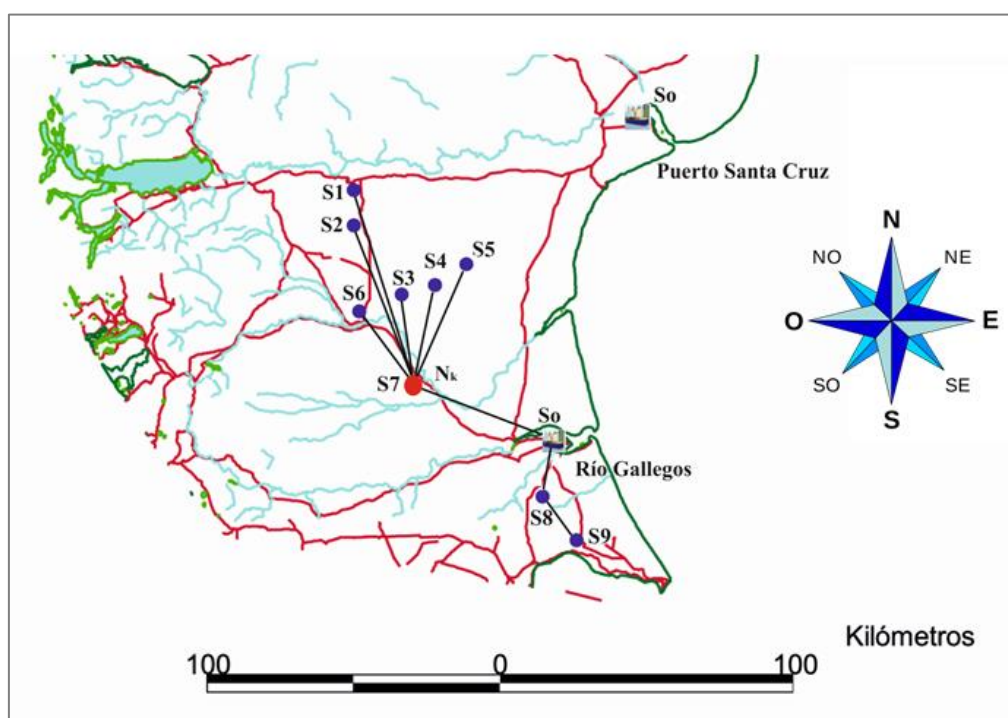


Figura 4.10: Ubicación del nodo Concentrador  $N_k$  en el Estado E1

Luego del mismo modo se trabajó en el segundo caso, E2b, y se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 4.8. También se obtuvo el resultado de  $y$  ( $y = 131 \text{ Km}$ ). Posteriormente, los datos arrojados por el modelo se volcaron en un mapa (Figura 8.11),

quedando definida la ubicación del nodo concentrador ( $N_k$ ) y las líneas de transporte para el estado  $E2b$ . Con un costo total de 149.193.430 US\$.

Yacimiento	Variable $x_i$	Km
S <sub>1</sub>	$x_1$	96.47
S <sub>2</sub>	$x_2$	83.76
S <sub>3</sub>	$x_3$	64.73
S <sub>4</sub>	$x_4$	25.37
S <sub>5</sub>	$x_5$	11.78
S <sub>6</sub>	$x_6$	78.04
S <sub>7</sub>	$x_7$	66

Tabla 4.8: Resultados de la variable  $x$  para el Estado  $E2b$

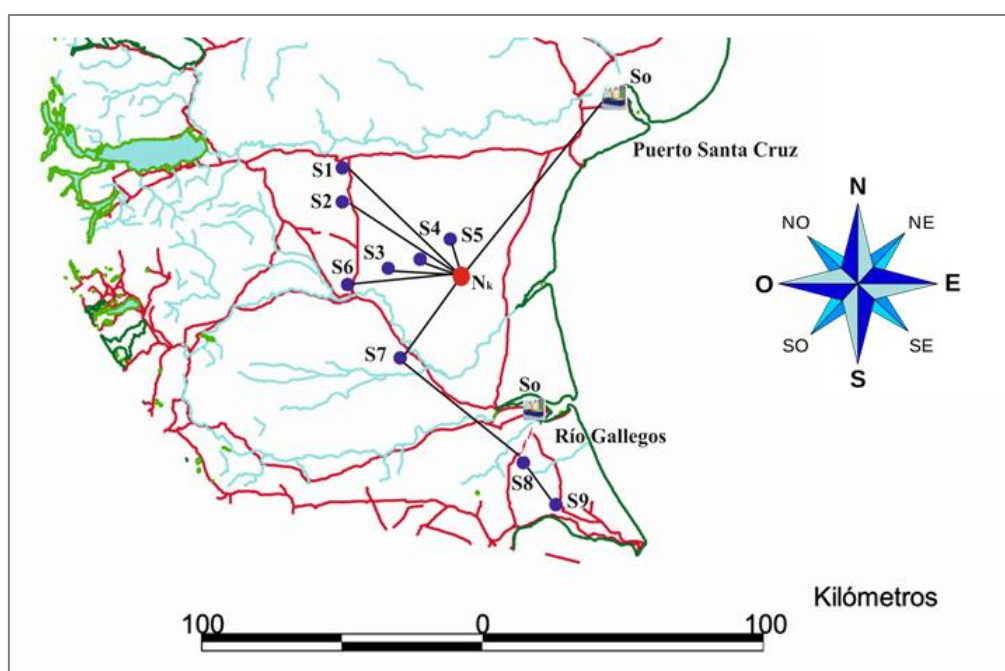


Figura 4.11: Ubicación del nodo Concentrador  $N_k$  en el Estado  $E2b$

### 4.5 Conclusiones

El costo total para la construcción de las líneas de transporte en el estado  $E2b$ , en el cual la planta se ubicaría eventualmente en Puerto Santa Cruz, es un 20% mayor al estado  $E1$ , en donde la planta se considera localizada en Río Gallegos. Entonces, se recomienda establecer la planta en Río Gallegos, ubicando el nodo concentrador como indica la Figura 4.10.

En el modelo presentado sólo se tomaron en cuenta los costos fijos. Por lo tanto, tenemos resultados preliminares que demuestran que el modelo funciona con este tratamiento simplificado. Este modelo podría perfeccionarse, incorporando más detalles. A través del método de agregación, se podrían tener en cuenta más términos en la función objetivo, que contemplen consideraciones geográficas, y otros que tengan en cuenta la economía de Argentina, costos operativos, declinación de los pozos y explotación de nuevos yacimientos. También se podrían incorporar las consideraciones geográficas mediante un diseño de las fórmulas de los precios  $P_i$ , dentro de las cuales se podrían utilizar el Sistema de Información Geográfica. De esta forma, podemos construir una función objetivo que represente nuestro problema y considere todas sus características.

En base a los resultados preliminares obtenidos en Oteiza, *et al.* (2010), se demuestra la necesidad de implementar una metodología de optimización mediante un recurso heurístico que permita explorar y explotar adecuadamente el espacio de búsqueda.

En el siguiente Capítulo 5 se trabajó en el perfeccionamiento del optimizador. Con este propósito, se implementaron técnicas metaheurísticas de optimización para resolver el problema de diseño óptimo de redes de cañerías.

# CAPÍTULO 5

## OPTIMIZACIÓN DE REDES DE CAÑERÍAS MEDIANTE SIMULATED ANNEALING

---

### *Contenido del Capítulo*

En este capítulo se presenta la implementación de un algoritmo metaheurístico denominado Simulated Annealing junto con GAMS. La estrategia consiste esencialmente en la hibridación de Simulated Annealing, en combinación con el paquete de GAMS (SAG). El objetivo de SAG es encontrar la mejor distribución de la red de cañerías y un subconjunto de localizaciones para instalar los nodos concentradores.





## 5.1 Introducción

Los problemas combinatorios son eficientemente resueltos mediante algoritmos exactos, pero a medida que el tamaño del problema aumenta, la complejidad aumenta exponencialmente. Las técnicas metaheurísticas surgen como un método de optimización alternativo para obtener soluciones de buena calidad en tiempos computacionales relativamente bajos. Los algoritmos metaheurísticos son procedimientos iterativos de búsqueda de propósito general que guían a heurísticas subordinadas por la combinación inteligente de varios conceptos para explorar y explotar inteligentemente el espacio de búsqueda.

El conocimiento del problema siempre es incluido en estos algoritmos de búsqueda. En particular, algunas heurísticas son basadas en trayectoria, tal como el Simulated Annealing (Kirkpatrick *et al.* 1983), que lleva a cabo un análisis local del espacio de búsqueda. Analizan la solución actual del espacio de búsqueda con el fin de decidir cómo continuar con la búsqueda. En otros trabajos, comienzan con una solución inicial y tratan de reemplazarla por otra solución de mejor calidad localizada en el vecindario. El algoritmo Simulated Annealing permite movimientos que empeoran la solución actual con el fin de escapar de óptimos locales.

En esta tesis hemos aprovechado de las cualidades inherentes del Simulated Annealing con el objetivo de resolver eficientemente un problema de optimización NP-duro (Kariv y Hakim, 1979) que consiste en encontrar la localización más conveniente de una red de cañerías para hidrocarburos líquidos en la provincia de Santa Cruz. El enfoque es de índole estratégico y se basa en la hibridación (Luna Valero, 2008) de la técnica metaheurística Simulated Annealing junto con el Sistema General de Modelado Algebraico (GAMS) (Brooke *et al.*, 2004).

## 5.2 *Formulación del Problema*

### 5.2.1 *Formulación del Prototipo*

En este apartado presentaremos la formulación de un prototipo que forma parte del desarrollo de un software de optimización para el diseño de cañerías para el transporte de hidrocarburos. La Figura 5.1 muestra el diagrama de flujo diseñado para el paquete a desarrollar. En esta sección solamente desarrollaremos el bloque principal “MAIN”, el cual contiene la definición (rosa) y evaluación mediante GAMS de la función objetivo. Este bloque llama al módulo optimizador (gris) desarrollado en Rodríguez *et al.* (2013). Además, en el desarrollo del software de optimización se deberá construir un módulo geográfico (lila) que contribuirá brindando a la función objetivo información sobre la calidad de un camino propuesto. Para tratar simultáneamente el problema de inversión óptima y el planeamiento operacional, se planifica además incorporar un módulo económico (azul) que simulará bajo incertidumbres los rasgos relacionados al gas natural de la economía Argentina. Finalmente, el bloque principal direccionará los resultados al bloque de reporte (verde) que deberá ser una interfaz amigable con el usuario. También se contempla en el diagrama que se debería construir un módulo (naranja) que pueda reflejar el efecto dinámico de las variaciones en la producción con el tiempo, por ejemplo, que contemple el agotamiento de los pozos, o el eventual aumento de la producción. En este problema se necesita un tratamiento dinámico, en el cual se tendrá en cuenta las variables dependientes del entorno.

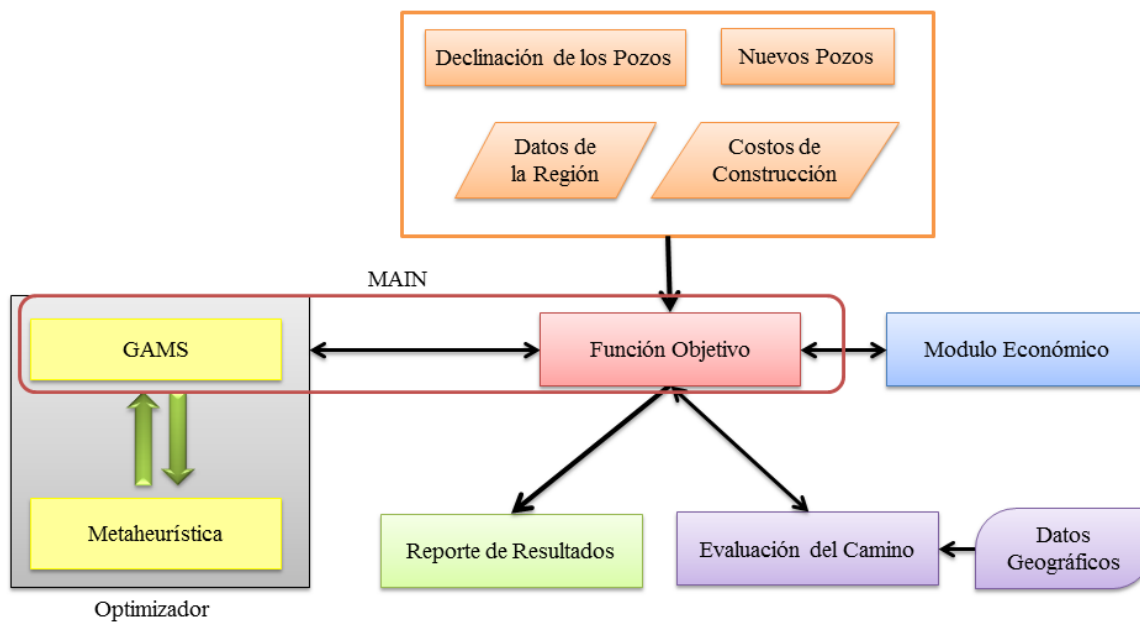


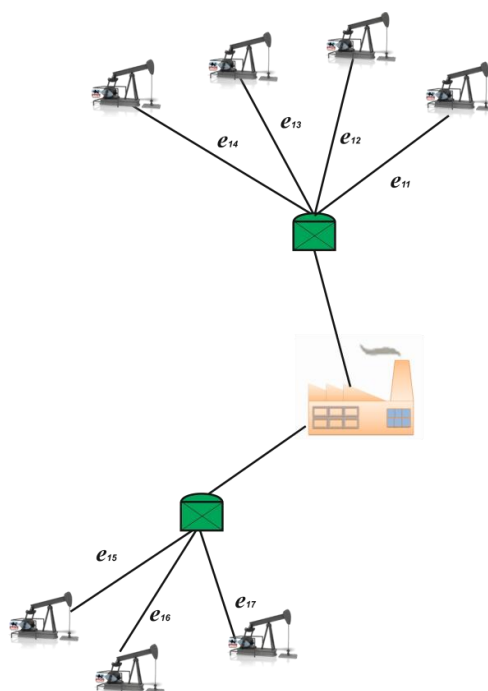
Figura 5.1: Diagrama de flujo del optimizador

## 5.2.2 El Bloque “MAIN”

### 5.2.2.1 Función Objetivo

La formulación de la función objetivo se basó en las siguientes suposiciones:

- Una representación gráfica, como la que se puede observar en la Figura 5.2, se emplea con el fin de determinar la distribución de la red de cañerías.



**Figura 5.2:** Representación gráfica de una infraestructura típica de yacimientos

- Se adoptó la siguiente notación para la representación de los caminos: las aristas  $e_{ij}$  van desde el nodo  $i$  al nodo  $j$ .
- Cualquier yacimiento puede actuar como un nodo concentrador.
- En cuanto a los nodos concentradores, el caudal de entrada es igual al caudal de salida. De esta forma, toda la producción de hidrocarburos es enviada, es decir, ya sea a otro nodo o una planta.
- Las plantas no contemplan el envío de la producción. Ellas solo reciben la producción de hidrocarburos, con el fin de ser procesado.
- Mediante la herramienta gvSIG<sup>®</sup> se obtuvo la matriz de distancias  $D$  en la cual se representa las distancias entre los yacimientos, nodos concentradores y las plantas de procesamiento (Tabla B.1).
- $C_{ij}$  es el costo de construcción de la cañería del camino  $e_{ij}$ . Estos costos se recopilan en una matriz de costos simétrica  $C$ , cuyos elementos son  $C_{ij}$  (Tabla B.2).
- Puede existir interconexión entre los nodos concentradores y entre los yacimientos.

- Cada nodo concentrador es una variable binaria denominada  $N_k$ . Donde  $N_k=1$  cuando se está contemplando el  $k$ -ésimo nodo y  $N_k=0$  cuando no es utilizado.
- El costo de instalación  $\beta$  del nodo concentrador fue calculado con el método clásico de variación del costo del equipo con su tamaño (Ulrich y Vasudevan 2004).
- Se asumió que todos los nodos concentradores estándar reciben el mismo volumen de hidrocarburos.
- Para el diseño de la red no se consideró la acumulación de hidrocarburos en el nodo concentrador. Sin embargo, la capacidad del tanque de almacenamiento fue considerada en  $\beta$ .
- $w_k$  es el peso asociado al  $k$ -ésimo nodo que es calculado en base a las diferencias de alturas  $H_k$  y la altura del el nodo concentrador más alto ( $H_{max}$ ) (Ec. 5.1). Las alturas  $H_k$  sobre el nivel de mar son obtenidas a través de gvSIG<sup>®</sup>.
- Para líquidos,  $w_k$  tiene en cuenta la dificultad de bombeo. Para gases  $w_k=1$ .

$$w_k: \frac{H_k}{H_{max}} \quad (\text{Ec. 5.1})$$

- El tamaño de la cañería fue considerado como un parámetro en la optimización del problema. Para la red de cañerías en estudio, el diámetro de la cañería fue calculado a partir de la velocidad del fluido y la producción de gasolina natural (Secretaría de Energía, 2012) mediante la siguiente expresión:

$$D: \sqrt{\frac{4Q}{\pi v}} \quad (\text{Ec. 5.2})$$

Dónde:

$Q$ : Caudal de gasolina natural [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$v$ : velocidad del fluido [ $\text{m/s}$ ]

- En Argentina, para las interconexiones entre nodos generalmente se instalan cañerías con un diámetro que varía en 4" y 8". El diámetro obtenido en base al caudal fue de 4" para las conexiones entre los yacimientos y nodos concentradores y de 8" entre los nodos concentradores y las plantas de procesamiento.

Las variables de decisión son los nodos concentradores  $N_k$  y la cantidad de hidrocarburos transportados desde  $i$  a  $j$  ( $X_{ij}$ ). Estas cantidades son variables continuas positivas que se encuentran entre un valor mínimo ( $X_{ijmin}$ ) y un máximo ( $X_{ijmax}$ ).

El modelo matemático tiene como objetivo minimizar el costo de transporte ( $Z$ ) desde los yacimientos a los centros de almacenamiento (Ec. 5.3). El parámetro  $m$  es la suma del número de yacimientos ( $f$ ), nodos concentradores ( $n$ ) y plantas ( $p$ ). El tamaño del problema depende del número de yacimientos, nodos concentradores y plantas de procesamientos.

$$\min Z = \sum_{i=1}^{f+n} \sum_{j=1}^m e_i^T C e_j X_{ij} + \beta \sum_{k=1}^n w_k N_k \quad i \neq j \quad (\text{Ec. 5.3})$$

Dónde:  $m = f + n + p$

### 5.2.2.2 Restricciones del Problema

El modelo matemático está sujeto a una serie de restricciones. La primera expresión (Ec. 5.4) asegura que el total de la producción transportada sea igual a la oferta ( $A_i$ ). La segunda expresión (Ec. 5.5) asegura que la cantidad transportada sea menor o igual a la demanda ( $B_j$ ). Finalmente la tercera expresión (Ec. 5.6) asegura que la variable de decisión ( $X_{ij}$ ) sea positiva.

$$\sum_{j=1}^m X_{ij} = A_i \quad 1 \leq i \leq f + n \quad (\text{Ec. 5.4})$$

$$\sum_{i=1}^{f+n} X_{ij} \leq B_j \quad f + n + 1 \leq j \leq m \quad (\text{Ec. 5.5})$$

$$X_{ij} \geq 0 \quad (\text{Ec. 5.6})$$

Este modelo puede ser aplicado a hidrocarburos líquidos o gaseosos y a distintas zonas. Estas características solo afectan los costos  $C_{ij}$ , los cuales fueron calculados independientemente del modelo. La instalación de los nodos concentradores y de la red de cañerías podría ser afectada indirectamente por otros factores que no se consideraron en este modelo matemático, tales como decisiones políticas, regulaciones ambientales, derechos de paso a través de la propiedad privada, etc.

### 5.2.3 *Desempeño del Prototipo*

Contemplamos un ejemplo teórico para evaluar el desempeño del prototipo. Este pequeño ejemplo involucra cinco yacimientos ( $S_i$ ), tres nodos concentradores ( $N_k$ ) y dos potenciales localizaciones de la planta de procesamiento ( $P_i$ ).

Se realizaron corridas para dos casos;

- ❖ Caso I: la planta de procesamiento se ubica en Río Gallegos (Figura 5.3a).
- ❖ Caso II: la planta de procesamiento se ubica en Puerto Santa Cruz (Figura 5.3b).

De ambos casos se seleccionaron las configuraciones en las cuales el costo de construcción de la red de cañerías es menor y se compararon entre ellas.

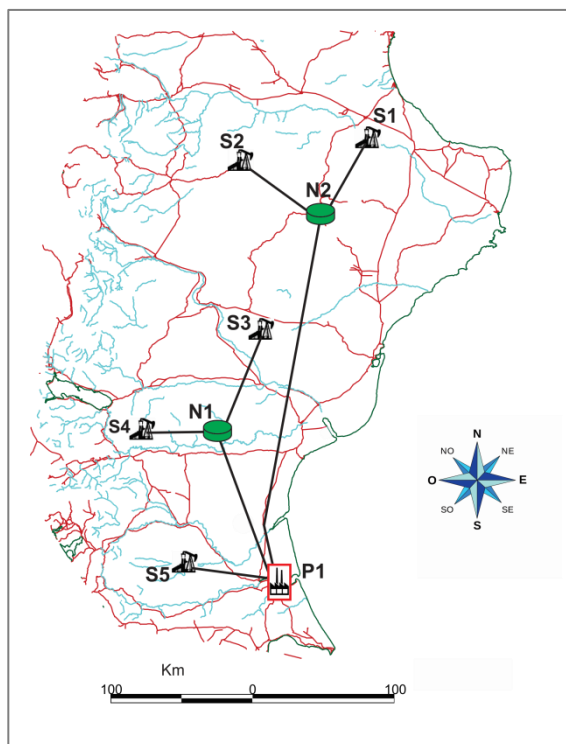


Figura 5.3a: Caso I: Planta ubicada en Río Gallegos

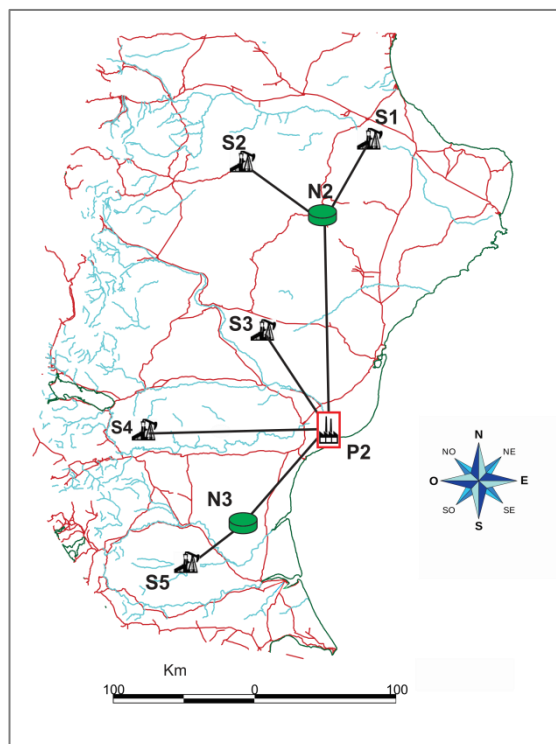


Figura 5.3b: Caso II: Planta ubicada en Pto. Santa Cruz

Figura 5.3: Red de cañerías óptima para cada caso de estudio

Los resultados obtenidos se resumen la Tabla 5.1, donde se muestra el costo de la instalación y la distancia total de la red de cañerías. El costo ( $Z$ ) tiene en cuenta el costo de construcción de la cañería y el costo de instalación de los nodos concentradores.

En la Tabla 5.1 se puede observar que el Caso II es más conveniente debido a que la combinación de nodos concentradores seleccionada tiene una distancia y un costo menor con respecto al Caso I. Por otra parte, hay que señalar que en esta región los resultados indican que es conveniente instalar dos nodos concentradores.



Casos	$N1$	$N2$	$N3$	Costo (Z) [ $10^6$ US\$]	Distancia [Km]
I	1	1	0	463	1176
II	0	1	1	375	1055

**Tabla 5.1:** Resultados obtenidos para cada configuración de nodos

A primera vista, para el Caso II la presencia de un nodo concentrador en el medio de la cañería que une  $S_5$  con  $P_2$  es curioso. Sin embargo, la construcción de una cañería que conecta  $S_5$  con  $P_2$  sin utilizar un nodo concentrador en el medio resultó ser más costoso debido a que los costos también se vieron afectados por los siguientes requisitos:

- Es conveniente favorecer la instalación de nodos concentradores, es una planificación estratégica para que la materia prima pueda ser almacenada allí.
- Cuando la planta está ubicada cerca de una zona poblada o puerto, es aconsejable no instalar demasiadas tuberías, con el fin de minimizar el impacto ambiental.

El prototipo presentado permite testear el bloque principal del paquete de software de optimización antes de su implementación final, así como también detectar errores y deficiencias. Esto constituye una etapa del desarrollo fundamental para el diseño de redes de cañerías que transporten hidrocarburos líquidos.

En este experimento, sólo tres nodos concentradores fueron fijados a priori. Para cada caso encontramos la mejor distribución de cañerías. En realidad, la manera más flexible de plantear este problema es considerar automáticamente una gran cantidad de nodos concentradores.

Los resultados son satisfactorios para los casos pequeños planteados. Sin embargo, cuando aumenta el número de nodos concentradores y de yacimientos, la localización de los nodos es más compleja y costosa, fundamentando así la necesidad de automatizar el análisis. Por lo tanto, en base al estudio descripto en esta sección, se implementó posteriormente una metodología metaheurística para problemas de localización eficiente de redes de cañerías.

### 5.3 Desarrollo del Optimizador

#### 5.3.1 Optimizador SAG

El modelo matemático presentado en la Sección 5.4.3 corresponde al diseño de una red de cañerías que fue resuelto mediante un software de optimización denominado SAG (Rodríguez *et al.*, 2013), que consta en hibridar el algoritmo Simulated Annealing junto con la herramienta GAMS. Este optimizador cuenta con dos etapas: en la primera etapa, el algoritmo Simulated Annealing selecciona un subconjunto de nodos concentradores, los cuales, en una segunda etapa, serán considerados como centros de almacenamiento para la resolución de un problema general de transporte mediante GAMS. El objetivo del optimizador es minimizar el costo total de la instalación de la red de cañerías, para ello se necesita localizar estratégicamente los nodos concentradores.

Mediante vectores binarios ( $v$ ) se representó el espacio de soluciones. Los elementos del vector  $v$  se corresponden con cada uno de los  $n$  nodos concentradores posibles, asignándoles el valor 1 cuando se decide instalar el nodo concentrador y 0 en caso contrario. Cuando el  $k$ -ésimo nodo concentrador ( $N_k = 0$ ) no es seleccionado, todas las entradas de la matriz de costos  $C_{ij}$  para  $i=1, \dots, m$  y  $j=f+k$  son penalizadas con un valor extremadamente alto, de modo que  $N_k$  no se tenga en cuenta durante la ejecución del Simulated Annealing. Al inicio del procedimiento se ingresa una matriz de costos completa, se establecen los parámetros de la metaheurística y se genera una solución inicial aleatoria. Luego, para cada una de las iteraciones predeterminadas se mantiene la temperatura según la longitud de la cadena de Markov escogida y se genera una nueva solución, obteniendo una matriz de costos  $C$  modificada, que será utilizada por GAMS para determinar el valor de aptitud ( $Z$ ) del vector propuesto por Simulated Annealing.

Para la generación de una solución vecina, es decir, encontrar un vector solución ( $v$ ) similar al actual, se propuso la siguiente estrategia:

Se selecciona un nodo concentrador (elemento del vector) al azar:

1. Si está activo se desactiva
2. Si está inactivo:
  - I En un 80 % de las veces se activa.
  - II En un 20% se selecciona otro nodo al azar, para luego intercambiar sus valores

La solución vecina es aceptada cuando es mejor que la solución actual. Sin embargo, cuando esto no ocurre, se evalúa la nueva solución en base a la diferencia entre las dos soluciones, a la función probabilística basada en esta diferencia y a la temperatura actual. Mediante estos aspectos se decide cuál de las dos soluciones se mantendrá. De esta manera, es posible aceptar soluciones peores a la mejor encontrada y así lograr escapar de óptimos locales.

Los valores de los parámetros que afectan al rendimiento del algoritmo fueron elegidos luego de una etapa preliminar de prueba, en la cual, se evaluó la calidad de las soluciones obtenidas y el tiempo de cálculo que se requiere para obtenerlas. Por lo tanto, los mejores valores adoptados fueron los siguientes:

- ❖ Descenso de temperatura = 0,99
- ❖ Longitud de la cadena de Markov = 3
- ❖ Número de iteraciones = 100

### ***5.3.2 Desempeño del Optimizador***

Para evaluar el desarrollo de desempeño del optimizador se trabajó en dos casos de estudio. En el Ejemplo 1 se contemplaron 21 yacimientos existentes en la provincia de Santa Cruz, 28 nodos concentradores dispuestos en una grilla generada con el programa gvSIG® y dos plantas de procesamiento. En la Tabla 5.2 se muestran las mejores alternativas para el Ejemplo 1.

Alternativas	Nodos Concentradores	Costo (Z) [ $10^6$ US\$]	Distancia [Km]
A	$N_6 - N_{24}$	623	1796
B	$N_6 - N_{26}$	630	1645
C	$N_5 - N_{24}$	644	1680
D	$N_5 - N_{26}$	651	1529

**Tabla 5.2:** Costos y distancias para cada alternativa planteada para el ejemplo 1

Las opciones A y C se favorecen por un bajo costo de instalación del nodo  $N_{24}$  con respecto al nodo  $N_{26}$ . Mientras que B y D obtiene el camino más corto necesario para montar la red de cañerías. Siendo la alternativa A la configuración más conveniente debido a su bajo costo. En contraste con el costo total de la red, la construcción del nodo es relativamente cara. Sin embargo, hay dos zonas notables en la cual, se concentran todos los pozos debido a la distribución de los yacimientos existentes. Entonces, el algoritmo distingue lógicamente la instalación de un nodo de concentración en cada una de esas zonas como la mejor alternativa económica (Figura 5.4). En base a este estudio los nodos concentradores  $N_6$  y  $N_{24}$  fueron adoptados. Desde un punto de vista económico, es conveniente enviar toda la producción a una sola planta de procesamiento. Por lo tanto, el siguiente paso es determinar la ruta más adecuada.

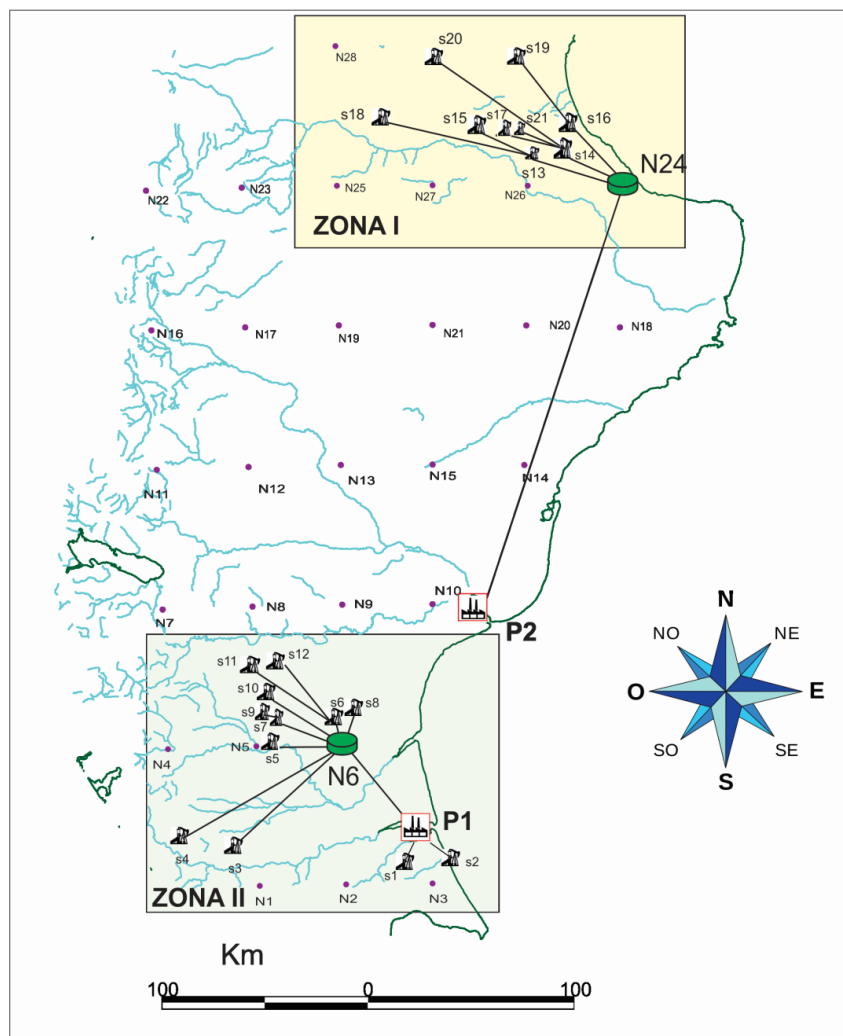


Figura 5.4: Distribución de la red de la Alternativa A

A continuación, se seleccionaron dos casos con diferentes destinos para la localización de la planta de procesamiento. En la Tabla 5.3 se pueden observar los costos y distancias obtenidas para cada caso. Ambos hacen uso del mismo par de nodos concentradores ( $N_6$ - $N_{24}$ ), pero el costo total es menor en el Caso I. Además, la distancia de la red total es menor que en el Caso II. En base a los resultados, el Caso I es preferible. En la Figura 5.5 se muestra la distribución de la red de cañerías para cada caso.

Caso	Destino	Costo (Z) [ $10^6$ US\$]	Distancia [Km]
I	Río Gallegos ( $P_1$ )	639	1981
II	Puerto Santa Cruz ( $P_2$ )	674	2030

Tabla 5.3: Costos y distancia cubierta por las redes óptimas para el Ejemplo 1 con nodos en  $N_6$  y  $N_{24}$

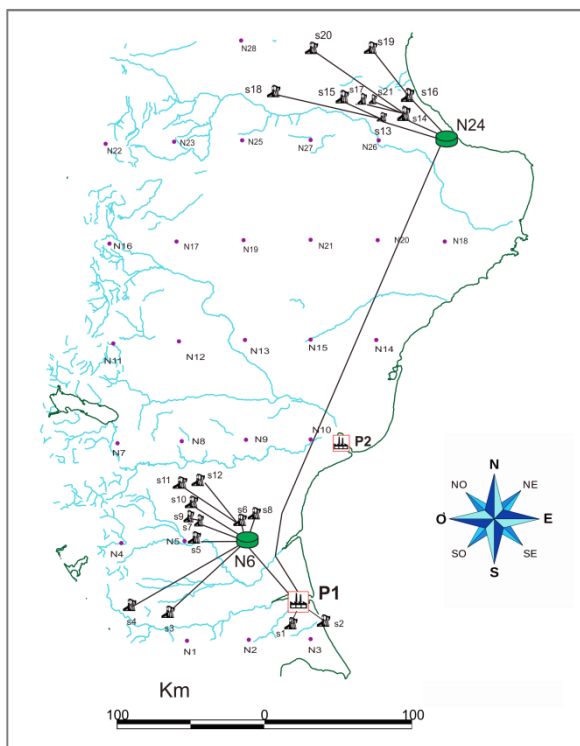


Figura 5.5a: Caso I: Planta ubicada en Río Gallegos

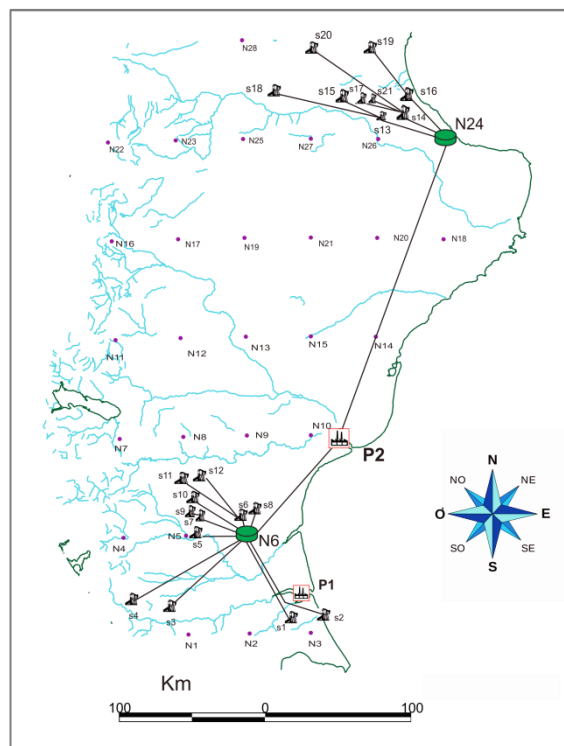


Figura 5.5b: Caso II: Planta ubicada en Pto. Santa Cruz

Figura 5.5: Red de cañerías óptima para el Ejemplo 1

En el Ejemplo 2, se ha incorporado un pozo de potencial explotación ( $S_{22}$ ) con el fin de tener en cuenta futuras perforaciones (Figura 5.6) que serán necesarias cuando la producción inicial en los yacimientos existentes comience a escasear y no pueda satisfacer la demanda de hidrocarburos. La zona seleccionada para la ubicación del eventual yacimiento se determinó a partir de estudiar las áreas de exploración que se encuentran en la provincia de Santa Cruz (Secretaría de Energía, 2012). Para este ejemplo se consideró solamente la planta  $P_1$ , ya que los resultados del Ejemplo 1 demuestran que es la mejor alternativa.

La Tabla 5.4 muestra los resultados para la planta de procesamiento  $P_1$ . Como era de esperar, el costo de la instalación total para esta red es mayor, pero esta vez la mejor opción es hacer uso del nodo concentrador  $N_5$ . En la Figura 5.6 se puede observar la distribución óptima de la red de cañerías obtenida.

Nodos Concentradores	Costo (Z) [10 <sup>6</sup> US\$]	Distancia [Km]
N <sub>5</sub> - N <sub>24</sub>	673	1953
N <sub>6</sub> - N <sub>24</sub>	677	2065

Tabla 5.4: Costos distancia cubierta por las redes óptimas para el Ejemplo 2

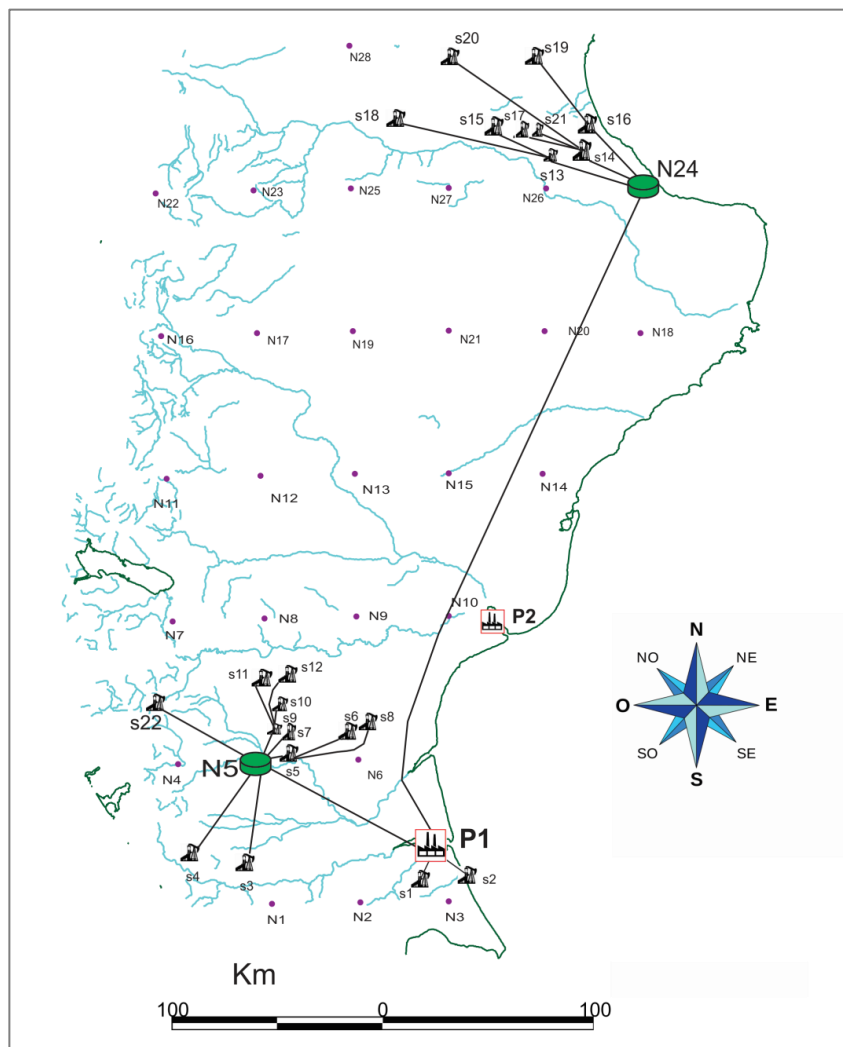


Figura 5.6: Red de cañerías óptima para el Ejemplo 2

En la Figura 5.7 se puede observar el comportamiento de SAG para una ejecución. El valor de aptitud disminuye durante la primera la mitad de las iteraciones. Los picos que se registran en la figura surgen al aceptar una solución peor generando una nueva dirección en la búsqueda. Además, la explotación en las áreas más prometedoras se realiza en la segunda mitad de las iteraciones. Por lo tanto, la probabilidad de aceptar una solución de peor calidad

en ese momento es menor. De esta manera, se consigue robustez en el algoritmo y se logra escapar de óptimos locales, logrando que su rendimiento mejore considerablemente.

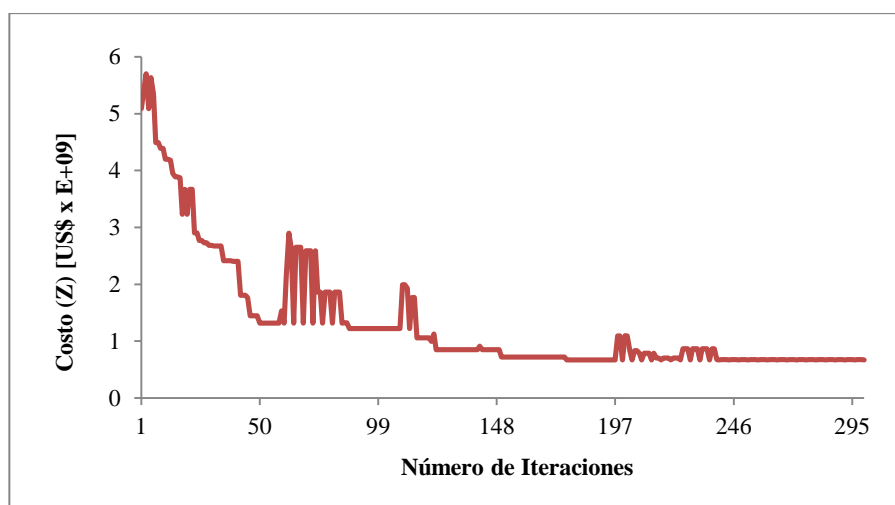


Figura 5. 7: Convergencia de SAG

## 5.4 Conclusiones

En este capítulo se logró un modelo matemático de programación lineal en estado estacionario para el diseño óptimo de redes de cañerías aplicable a una importante región productora de crudo y gas de la Argentina. Para resolver este modelo se desarrolló un optimizador denominado SAG basado en un algoritmo metaheurístico denominado Simulated Annealling.

En el modelo matemático desarrollado se contemplaron dos variables de decisión importantes: cantidad de gasolina transportada ( $X_{ij}$ ) y nodos concentradores ( $N_k$ ). En comparación con el modelo presentado en el Capítulo 4 en el cual sólo consideramos como variable las distancias entre los yacimientos y nodos, nuestro nuevo modelo es más realista y considera también la localización de los nodos concentradores.

En base a los resultados obtenidos, la mejor alternativa para yacimientos existentes es el Caso I del Ejemplo 1. En este problema se obtiene el menor costo de instalación y una menor distancia total de cañerías. En el Ejemplo 2 pudimos encontrar la mejor distribución de la red con otro nodo concentrador ( $N_5$ ). Se puede observar que el diseño de la red depende de los



futuros desarrollos de la industria petrolera. Por lo tanto, las decisiones deben tomarse de acuerdo a la planificación estratégica.

A partir de los resultados obtenidos, pudimos comprobar la efectividad del optimizador desde dos puntos de vistas:

- ❖ Ingenieril: Los resultados se evaluaron ingenierilmente para demostrar que el optimizador puede ser aplicado a nuestro caso de estudio.
- ❖ Computacional: la metaheurística es eficiente ya que requiere tiempos de cómputos relativamente cortos. Además, es robusta porque obtiene soluciones de buena calidad, logrando escapar de óptimos locales.

Los resultados obtenidos en este capítulo dieron origen a un trabajo publicado en la revista *Industrial & Engineering Chemistry Research* (Rodríguez *et al.*, 2013).



# CAPÍTULO 6

## TÉCNICAS METAHEURÍSTICAS APLICADAS AL DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE CAÑERÍAS

---

### *Contenido del Capítulo*

En este capítulo se analiza y compara el desempeño de dos metaheurísticas: Simulated Annealing y Algoritmos Genéticos, en el diseño óptimo de una red de cañerías. Además, se presenta un modelo económico de optimización detallado, en el cual, el VPN se toma como función objetivo para evaluar las soluciones de los algoritmos y se desarrolla una estrategia computacional para la localización de los nodos concentradores.



## 6.1 Introducción

Las características distintivas que se consideraron en la formulación del problema son la incorporación del tiempo de vida útil del proyecto y la distribución geográfica de la producción con el fin de lograr optimizaciones confiables. También, se focalizó especialmente en metaheurísticas de búsqueda como estrategias generales para el diseño de procedimientos heurísticos con alto rendimiento para la solución de problemas de optimización relacionados con redes de cañerías.

El caso de estudio consta de 21 yacimientos existentes en la provincia de Santa Cruz y 28 nodos concentradores. En base a los resultados del Capítulo 5 la planta de procesamiento será localizada en Río Gallegos ya que SAG demostró que las mejores soluciones se encuentran con esta ubicación.

## 6.2 Formulación Matemática

La formulación de la función objetivo debe ser planteada de forma que los resultados de optimización sean realistas. En esta perspectiva, el Valor Presente Neto (*VPN*) de un proyecto se obtiene a partir de los ingresos y de los costos de construcción y operativos (Ec. 5.1). Mediante la comparación de diseños alternativos de redes de cañerías, se selecciona el más conveniente con el fin de maximizar los beneficios generales del proyecto.

$$\begin{aligned}
 VPN = & \sum_{t=1}^o \frac{P_t \times Q_t}{(1+r)^{t+m+n}} - \sum_{t=1}^n \sum_{i=1}^{f+q} \sum_{j=1}^{q+p} \frac{CC_{ijt}}{(1+r)^{t-1}} FP_{IJ} - \sum_{t'=1}^{\frac{m+o}{l}} \sum_{i=1}^{f+q} \sum_{j=1}^{q+p} \frac{PC_{t'} \times NP_{ij}}{(1+r')^{t'-1} (1+r)^n} FP_{IJ} \\
 & - \sum_{t=1}^m \sum_{k=1}^q \frac{\beta_{kt}}{(1+r)^{t+n-1}} CN_k - \sum_{t=1}^o \sum_{i=1}^{f+q} \sum_{j=1}^{q+p} \frac{PW_{ijt}}{(1+r)^{t+m+n-1}} FP_{IJ} \\
 & - \sum_{t=1}^o \sum_{i=1}^{f+q} \sum_{j=1}^{q+p} \frac{MC_{ijt}}{(1+r)^{t+m+n-1}} FP_{IJ} - \sum_{t=1}^o \frac{LC_t}{(1+r)^{t+m+n}}
 \end{aligned} \tag{Ec. 5.1}$$

Dónde:

$l$ : tiempo de vida útil de un bomba

$m$ : número total de períodos de tiempo relacionados con la construcción de bombas y nodos de concentración

$n$ : número total de períodos de tiempo de construcción de tuberías

$p$ : número de plantas

$o$ : vida útil del proyecto

$q$ : número de nodos concentradores

$r$ : tasa de descuento

$r'$ : tasa de descuento para la vida útil de la bomba

$f$ : número de yacimientos

La formulación de la función objetivo se basó en las siguientes suposiciones:

- La representación de los caminos está dada por aristas que van desde el nodo  $i$  al nodo  $j$  en un periodo de tiempo  $t$ .
- Los costos de construcción  $CC_{ijt}$  se basan en el diámetro de la cañería y la distancia recorrida. Además, los permisos de pasos, materiales y mano de obra de la construcción fueron incluidos.  $CC_{ijt}$  es el costo de construcción desde el nodo  $i$ -ésimo al nodo  $j$ -ésimo, en el período  $t$ -ésimo.
- El costo de instalación  $\beta_{kt}$  del  $k$ -ésimo nodo concentrador en el periodo de tiempo  $t$ -ésimo se obtuvo mediante la evaluación de los costos de los equipos correspondientes relacionados con sus dimensiones (Ulrich y Vasudevan 2004).
- Cada nodo concentrador es una variable binaria denominada  $CN_k$ . Dónde  $CN_k=1$  si está activo, de lo contrario  $CN_k=0$ .

- Se asumió una variable binaria  $FP_{ij}$  para decidir el camino factible desde el nodo  $i$ -ésimo al nodo  $j$ -ésimo. Siendo  $FP_{ij}=1$  si el camino se considera y  $FP_{ij}=0$  en caso contrario.
- El número de bombas ( $NP_{ij}$ ) y la energía requerida ( $PW_{ij}$ ) dependen de la velocidad de flujo, el diámetro de la cañería y la distancia recorrida (Echarte, 2010). A partir del caudal se calcula el diámetro de la cañería, luego se obtiene la altura de la bomba con la cual, mediante curvas características (Catálogo Grundfos, 2014) seleccionamos el tipo de bomba adecuada. Además, se contempló el costo de instalación de una bomba en el periodo de tiempo  $t$  ( $PC_t$ ).
- El costo de mantenimiento ( $MC_{ijt}$ ) desde el  $i$ -ésimo nodo al  $j$ -ésimo nodo en un periodo  $t$ -ésimo varía considerando el valor de la estructural total.
- Se consideró una determina cantidad de gasolina transportada  $Q_t$  en el periodo  $t$ -ésimo.
- La tarifa de transporte  $P_t$  en un periodo de tiempo  $t$ , se puede tomar del mercado con el fin de determinar si el proyecto es económicamente viable. Otro enfoque consiste en fijar el precio a cero con el fin de conocer el límite de rentabilidad más baja.
- Se contempló la mano de obra en la etapa operativa de la red en un periodo de tiempo  $t$  ( $LC_t$ ).
- Se ha implementado un sistema de control con el fin de garantizar el suministro continuo de gasolina natural (Oteiza *et al*, 2014). Los tanques de almacenamiento, que se encuentran en los nodos concentradores, sirven para equilibrar el caudal, actuando como reservorios de contingencia. Al impedir variaciones inesperadas en el tiempo, la cantidad de gasolina natural transportada a través de las cañerías se considera como constante.

La red de cañerías tiene diversos gastos a lo largo de su vida útil. Por lo tanto, se consideró una tasa de descuento ( $r$ ) la cual, ha demostrado ser esencial para poder organizar adecuadamente los desarrollos alternativos. Por otra parte, una tasa de descuento que contempla riesgos de incertidumbre es adecuada para estimar los flujos de efectivo a largo plazo que requieren este tipo de inversión en las economías volátiles. En este sentido, una serie de tasas de descuento que refleja un nivel similar de riesgo para proyectos comparables fue modelado por medio de un análisis de regresión denominado ARIMA (de sus siglas en inglés: Auto-Regressive Integrated Moving Average). ARIMA (Ec. 6.2) es un modelo estadístico que utiliza variaciones y regresiones de datos estadísticos con el fin de encontrar patrones para una predicción hacia el futuro. Como existe una variedad de eventos desconocidos que tarde o temprano surgen, incluso con mayor frecuencia en mercados en desarrollo, el término de error que figura en la ecuación para una tasa de interés por lo general presenta una varianza no constante. Los cambios bruscos en la economía afectan a la estimación de los parámetros del modelo y su eficiencia. Por lo tanto, estas variaciones repentinas pueden tenerse en cuenta con GARCH (de sus siglas en inglés: Generalized Autoregressive Conditional Heteroskedasticity). Mediante la aplicación de este método econométrico (Ec. 6.3), los intervalos de confianza pueden ser definidos de forma tal que el administrador de decisiones pueda ajustar la tasa de descuento de acuerdo a diferentes perfiles de riesgo (Enders, 2009).

$$r_t = \alpha_0 + \omega\sigma_{t-1} + \sum_{g=1}^k \alpha_g r_{t-g} + \sum_{i=1}^q \gamma_i u_{t-i} + u_t, \quad u_t \sim N(0, \sigma_t^2) \quad \text{Ec. 6.2}$$

$$\sigma_t^2 = \beta_0 + \sum_{j=1}^p \beta_j u_{t-j}^2 + \sum_{l=1}^z \mu_l \sigma_{t-l}^2 + v_t, \quad v_t \sim N(0, \sigma^2) \quad \text{Ec. 6.3}$$



Dónde:

$r_i$ : Tasa de descuento

$v_t, u_t$ : Términos de error

$t$ : Periodo de tiempo

$\sigma_t^2$ : Varianza

$\sigma^2$ : Varianza constante

$\alpha_0, \alpha_g, \omega, \gamma_i, \beta_0, \beta_j, \mu_t$ : Parámetros desconocidos

### **6.3 Técnicas Metaheurísticas para el Diseño de Redes de Cañerías**

La formulación descrita en la sección anterior constituye un problema de optimización combinatorio NP-completo (Cook, 1971). La dificultad para encontrar una solución óptima en estos problemas aumenta exponencialmente con el tamaño del problema. Por lo tanto, las técnicas metaheurísticas se vuelven más atractivas, ya que son capaces de encontrar soluciones satisfactorias en tiempos razonables.

En el marco de este capítulo fue concebido como un Sistema de Soporte a la Decisión o DSS (por sus siglas en inglés) para dar lugar a criterios de diseño más específicos. Con la intervención de la toma de decisiones y su aceptación de la red propuesta, nuestro optimizador estocástico guía a una heurística subordinada mediante la combinación inteligente de diversos conceptos con el fin de explorar y explotar adecuadamente el espacio de búsqueda.

Para el desarrollo de nuestro optimizador fueron consideradas dos técnicas metaheurísticas; Simulated Annealing (Kirkpatrick *et al.*, 1983) y Algoritmos Genéticos (Whitley, 1994). Estas dos técnicas metaheurísticas difieren fundamentalmente en el número de soluciones que procesan al mismo tiempo y en la cantidad de memoria que utilizan. Por un lado, los Algoritmos Genético son métodos basados en poblaciones mostrando la evolución

del algoritmo en distintos puntos del espacio de búsqueda, utilizando información histórica de búsquedas anteriores. En cambio, Simulated Annealing es un método basado en trayectorias y utiliza solamente una solución a la vez marcando una trayectoria en el espacio de búsqueda; su acción se determina exclusivamente por el estado de la información actual. Los principales beneficios de estos algoritmos son: la aptitud para escapar de óptimos locales, la capacidad de adaptación a los cambios y la independencia al problema.

Con el objetivo de realizar un análisis de comparación de estos algoritmos, se utilizó la misma representación para codificar todas las soluciones posibles y también la misma función de aptitud para evaluar la calidad de las soluciones.

#### **6.4 Estrategia Computacional**

La solución fue representada mediante una matriz dispersa (sparse) binaria, cuyas filas son los yacimientos ( $S_i$ ) y sus columnas representan a los nodos concentradores ( $N_i$ ) y a la planta de procesamiento ( $P_1$ ). Un elemento de la matriz igual a 1 denota una conexión entre un yacimiento y un nodo concentrador o con la planta. En la Figura 6.1 se puede observar un ejemplo de la estrategia computacional para la representación de la solución. La solución inicial surge de una matriz al azar, en esta matriz el yacimiento  $S_1$  se conecta al nodo  $N_1$  y esta distribución tiene un valor asociado de  $VPN$ , luego en la siguiente iteración la matriz es modificada y el yacimiento  $S_1$  ahora se conecta con el nodo  $N_2$  y obtiene un nuevo valor de  $VPN$  que es mejor al anterior. El algoritmo va modificando la matriz binaria hasta encontrar la mejor solución que permite obtener una distribución adecuada de la red de cañerías. El optimizador determina el conjunto de nodos concentradores a utilizar y luego evalúa el camino desde estos hacia la planta.

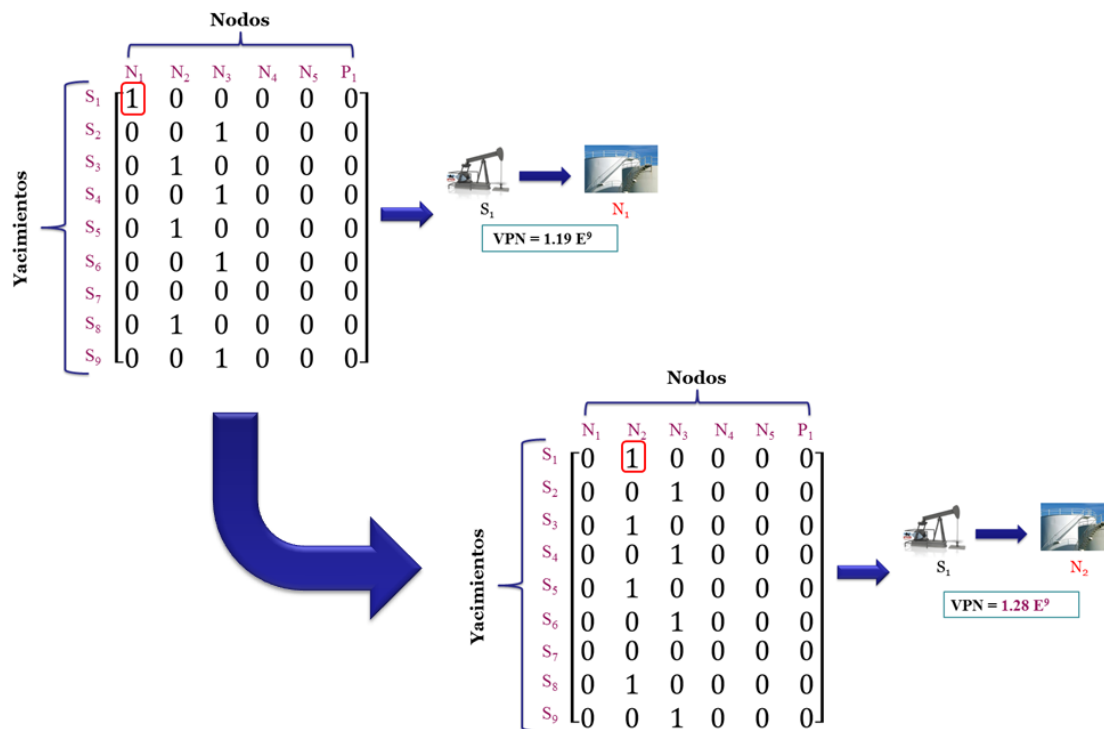


Figura 6.1: Representación de la solución

Para la generación de una solución vecina, se adoptó una metodología adecuada para cada algoritmo en base al problema de redes planteado en este capítulo.

Simulated Annealing:

La nueva solución vecina se genera mediante la siguiente estrategia:

1. En un 50 % se elige un yacimiento al azar y se altera su destino:
  - I En un 30% de las veces se lo envía al nodo activo más cercano.
  - II En un 70% se lo envía al nodo más cercano de todos.
2. En el otro 50% de los casos, se elige uno de los nodos activos y se lo desactiva.
 

Mientras que a los yacimientos que se encontraban conectados a ese nodo se les busca un nuevo destino de la siguiente manera:

  - I En un 30% de las veces van al nodo activo más cercano.
  - II En un 70 % de las veces va a un nodo elegido al azar.

La evaluación de la nueva solución se realiza en base a la diferencia entre las dos soluciones, a la función probabilística basada en esta diferencia y a la temperatura actual. Mediante estos aspectos se decide cuál de las dos soluciones se mantendrá. Asimismo, es posible aceptar soluciones peores a la mejor encontrada y así lograr escapar de óptimos locales.

#### Algoritmo Genético:

Se desarrollaron los siguientes métodos de cruzamiento y mutación para la generación de nuevas soluciones.

##### 1. Cruzamiento:

- I Se seleccionan dos padres al azar (dos matrices que son potenciales soluciones)
- II Se eligen dos números al azar entre 1 y la cantidad de yacimientos.
- III Luego se selecciona el conjunto de filas de la matriz comprendido entre los dos números elegidos anteriormente.
- IV Se intercambian este conjunto de filas de las dos matrices, obteniendo dos soluciones nuevas a la que consideramos hijos.
- V Finalmente, se comparan los padres con los hijos, manteniendo los mejores y descartando los restantes.

##### 2. Mutación:

En este caso se utilizó el mismo procedimiento que se empleó para encontrar una solución vecina mediante Simulated Annealing.

### **6.5 Discusión de Resultados**

Luego de un análisis de ambos algoritmos se realizaron una serie de pruebas experimentales con el fin de ajustar los parámetros de cada algoritmo. En las Tablas 6.1 y 6.2 se muestran los parámetros con los cuales se realizaron las ejecuciones de los algoritmos.

Generaciones	Individuos	Cruzamiento	Mutación
250	50	0.7	0.1

Tabla 6.1: Configuración de parámetros para el Algoritmo Genético

Evaluaciones	Longitud Cadena de Markov	Temperatura Inicial
500	3	0.99

Tabla 6.2: Configuración de parámetros para Simulated Annealing

Los algoritmos fueron implementados en el lenguaje JAVA y los experimentos computacionales fueron realizados en una computadora con un procesador Intel Core i5-3330 con 8 GB de memoria RAM. La Figura 6.2 muestra la evolución de la función de aptitud (VPN) obtenida de 30 ejecuciones independientes, cuyos resultados son representados por varias curvas. El progreso de los algoritmos puede ser medido con diferentes indicadores de búsqueda, el eje X para Simulated Annealing pertenece al número de iteraciones mientras que para el Algoritmo Genético corresponde a las generaciones. En ambos casos, el valor de la función de aptitud disminuye considerablemente durante la primera mitad de la evolución. Por lo tanto, este comportamiento representativo exhibe una robustez satisfactoria para los dos algoritmos cuando resuelven este problema.

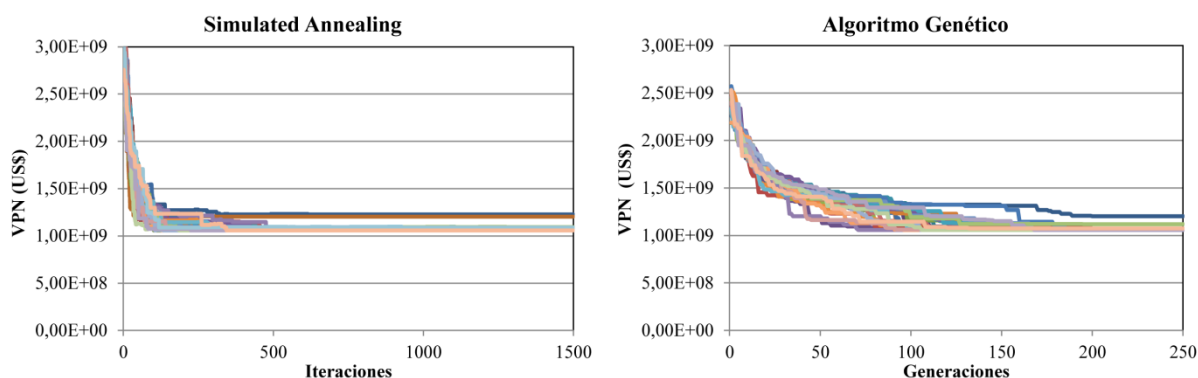


Figura 6.2: Comparación del desempeño de los algoritmos

Los resultados mostrados en la Tabla 6.3 revelan que después de 30 ejecuciones independientes, ambos algoritmos tienen un desempeño satisfactorio y siempre obtuvieron la mejor solución. Se compararon los tiempos de ejecución promedio de ambos algoritmos. Para el Algoritmo Genético el tiempo total de cómputo requerido fue de 383 ms. En cambio, para Simulated Annealing el tiempo total computacional demandado fue de sólo 138 ms, lo que representa un 36% del tiempo de cómputo del Algoritmo Genético. Además se observa en la tercera columna la eficacia la cual, informa el número de veces que se alcanza el óptimo.

Algoritmos	VPN (US\$)	Eficacia [%]	Tiempo [ms]	Evaluaciones
Algoritmo Genético	1.057E <sup>+09</sup>	80	383	24038
Simulated Annealing	1.057E <sup>+09</sup>	70	138	1500

**Tabla 6.3:** Resultados computacionales para cada algoritmo

El Algoritmo Genético demostró ser más eficaz a expensas de tiempo de cómputo. Esto se debe a que son necesarias una gran cantidad de evaluaciones en las técnicas basadas en la población. Generar una nueva población implica realizar múltiples cruzamientos y mutaciones y por lo tanto, toma más tiempo que en una iteración del Simulated Annealing encontrar una solución vecina. Por esta razón, a diferencia de Simulated Annealing, el tiempo del Algoritmo Genético no crece proporcionalmente con el número de evaluaciones.

Ambos algoritmos encuentran la misma solución óptima (VPN) con el mismo par de nodos concentradores ( $N_6$  y  $N_{26}$ ). En la Figura 6.3 se muestra la distribución obtenida de la red de cañerías para los yacimientos seleccionados en la provincia de Santa Cruz. Los algoritmos distinguen lógicamente la instalación de un nodo concentrador en cada una de las zonas donde se agrupan los yacimientos como la mejor alternativa económica.). Sin embargo es importante destacar que la ubicación de los nodos concentradores y el trazado de las cañerías es diferente a la obtenida en el Capítulo 5 (ver Figura 5.5a). Esta nueva configuración de la red es distinta debido a que la función objetivo es más detallada. Además, de contemplar los

costos de construcción, se tuvieron en cuenta los costos operativos, los ingresos y parámetros económicos que considera los gastos a lo largo de la vida útil del proyecto.

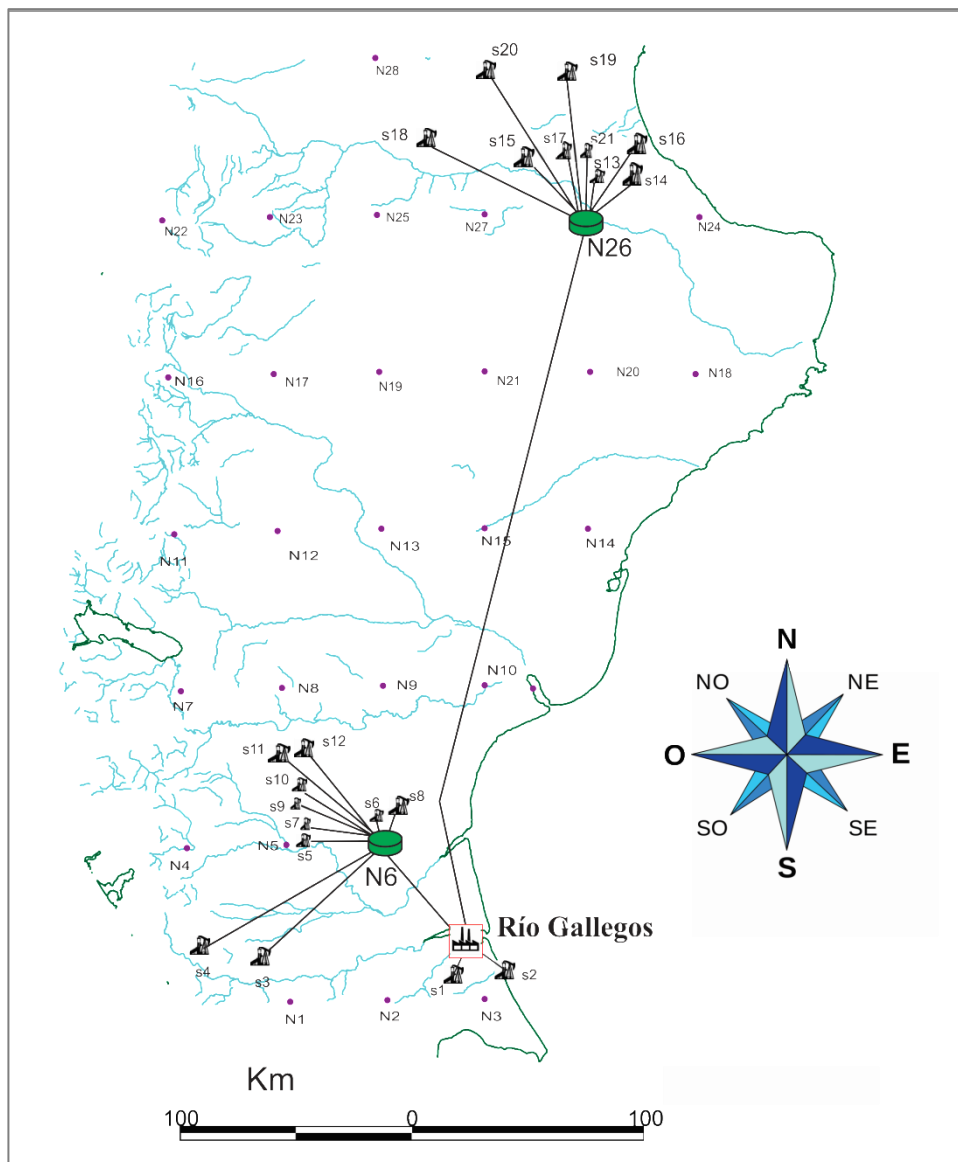


Figura 6.3: Distribución de la red de cañerías óptima

### 6.6 Conclusiones

En este capítulo se presentó un modelo económico de optimización detallado de la red de cañerías para el transporte de gasolina natural con una función objetivo que tiene en cuenta la inestabilidad económica del país.

La estrategia computacional consistió en utilizar algoritmos metaheurísticos a fin de encontrar el diseño óptimo de la red. Las estrategias de solución del Algoritmo Genético y del Simulated Annealing se trabajaron en la práctica. El Algoritmo Genético y Simulated Annealing lograron encontrar la solución con excelentes tiempos de cómputo. Al comparar los resultados obtenidos por ambos algoritmos, Simulated Annealing supera al Algoritmo Genético con mejores valores y exigiendo menos tiempo de cómputo (36%).

La distribución de la red en este capítulo utiliza el par de nodos  $N_6-N_{26}$  a diferencia de la solución encontrada en el Capítulo 5 en el cual, el par de nodos es  $N_6-N_{24}$ . Esta diferencia surge debido a que en la función objetivo se consideró una mayor cantidad de términos en los cuales se contemplan ingresos, costos fijos y operativos. Además, se involucraron parámetros económicos con respecto a la vida útil del proyecto.

Por otra parte, en la estrategia computacional, se consideró que los yacimientos solamente van hacia los nodos concentradores o a la planta. En cambio en el Capítulo 5 existe la posibilidad de la interconexión entre los yacimientos.

Los resultados obtenidos en este capítulo dieron origen a un trabajo publicado en: 12<sup>th</sup> International Symposium on Process Systems Engineering and 25<sup>th</sup> European Symposium on Computer Aided Process Engineering (subseries: Computer Aided Process Engineering) (Oteiza *et al.*, 2015a).



# CAPÍTULO 7

## DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL SISO MEDIANTE ALGORITMOS GENÉTICOS

---

### *Contenido del Capítulo*

En este capítulo se presenta el diseño óptimo de un sistema de control realimentado para el control del volumen de gasolina natural en el nodo concentrador en un sistema SISO (de sus siglas en inglés: Simple-Input-Simple-Output). De esta forma, podemos garantizar el suministro constante de materia prima a la planta de procesamiento ante eventuales disminuciones o aumentos de la producción en los yacimientos.

Se analizó la respuesta dinámica del sistema y se optimizaron mediante Algoritmos Genéticos los parámetros de un controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) y otro Proporcional-Integral (PI).



## 7.1 Introducción

La producción de gasolina natural proveniente de yacimientos gasíferos suele declinar, por ejemplo por el agotamiento de los pozos, o aumentar por diversas causas, tales como la eventual explotación de nuevos pozos. Por lo tanto, es necesario tener en cuenta esta dinámica para poder garantizar el suministro a la planta de procesamiento y de esta forma, el modelo de transporte será más realista. Esto puede realizarse mediante la implementación de controladores realimentados-anticipativos (Luyben y Luyben, 1997) conforme a los datos disponibles para el control óptimo.

Muchos controladores industriales tienen sólo acción Proporcional e Integral (PI). Se puede demostrar que un control PI es adecuado para todos los procesos donde la dinámica es esencialmente de primer orden. Por otra parte, los controladores PID (Proporcional-Integral-Derivativo) son ampliamente utilizados debido a que tienen estructura simple, buena estabilidad y alta confiabilidad. Un controlador PID es un controlador proporcional con acción derivativa e integral simultáneamente superpuestas. Además, tiene la capacidad de eliminar errores en estado estacionario mediante la acción integral y puede anticipar el futuro con la acción derivativa (Aström y Hägglund, 1995).

Las formas clásicas de diseñar controladores pueden complementarse por optimización mediante Algoritmos Evolutivos. Si se consideran muchos puntos en el espacio de búsqueda, los Algoritmos Evolutivos reducen la chance de converger hacia óptimos locales, pero es más probable su convergencia a un óptimo global. En la literatura se ha abordado la optimización de los parámetros para controladores PI y PID mediante Algoritmos Evolutivos. Willjuice Iruthayarajan y Baskar (2009) evaluaron la performance de varios Algoritmos Evolutivos basados en el diseño de controladores PID multivariables. En cambio, otros trabajos se enfocan en el uso específico de una sola clase de Algoritmos Evolutivos: Algoritmos

Genéticos. Por ejemplo, Zhang *et al.* (2010) optimizaron los parámetros de un controlador PID mediante la implementación de un Algoritmo Genético y compararon su desempeño con métodos clásicos. Por otra parte, Kwok y Sheng (1994) describieron el uso de Algoritmos Genéticos y Simulated Annealing para la optimización de los parámetros de los controladores PID aplicados en el control de un brazo de robot. En cuanto a los controladores PI, Dimeo y Lee (1995) emplearon Algoritmos Genéticos para optimizar parámetros de controladores PI para sistemas MIMO (de sus siglas en Inglés: Multi-Input Multi-Output) y Hsieh *et al.*, (2012) optimizaron los parámetros de un controlador PI mediante un Algoritmo Genético y un análisis de sensibilidad. Otro enfoque (Soltoggio, 2005) se basa en mejorar los Algoritmos Genéticos para el diseño de controladores de plantas de primero y segundo orden con actuadores no lineales.

En este capítulo proponemos optimizar mediante Algoritmos Genéticos los parámetros de controladores PI y PID adecuados para controlar el volumen de gasolina natural en el nodo concentrador.

## **7.2 Caso de Estudio**

En la Figura 7.1 se observa el sector Norte (Zona I) de la red óptima de cañerías elegida para vincular los yacimientos con el nodo concentrador y a este con la eventual planta de procesamiento en Puerto Santa Cruz ( $P_I$ ). Esta zona corresponde a la distribución de la red obtenida en el Capítulo 5 la cual, se puede observar en la Figura 5.4 (Alternativa A).

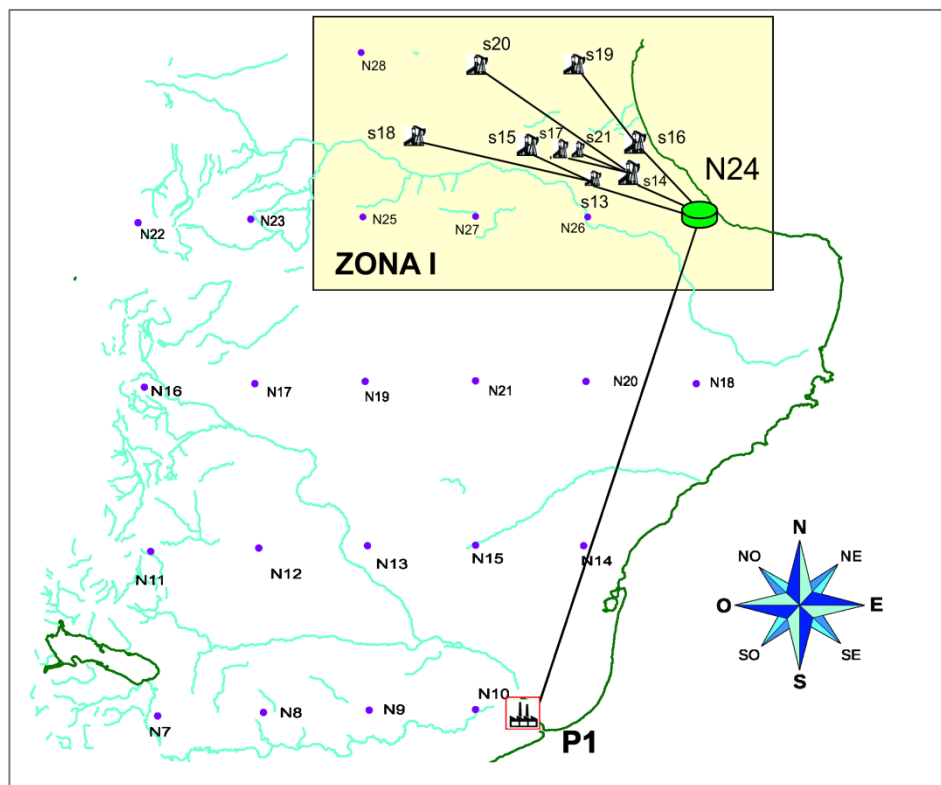


Figura 7.1: Distribución de la red de cañerías extraída de la Figura 5.4

Para mayor claridad y poder lograr un buen sistema de control, se analizará un ejemplo pequeño que contiene un nodo concentrador, tres yacimientos y una planta de procesamiento ( $P_1$ ). En la Figura 7.2 se muestra un esquema simplificado del caso de estudio.

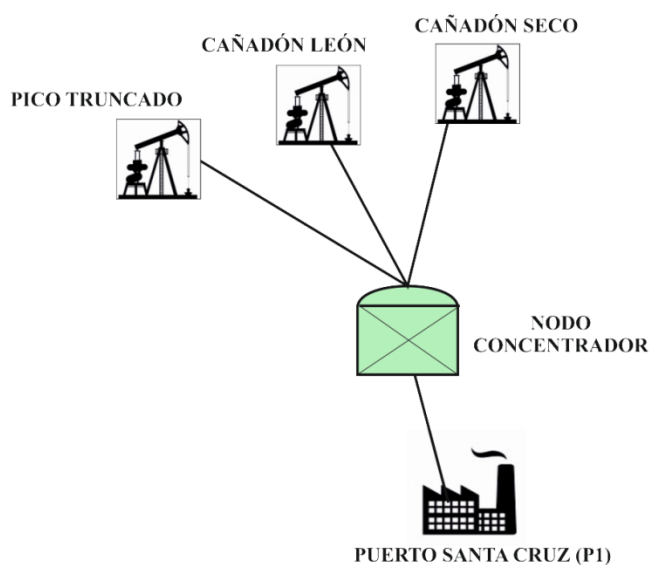


Figura 7.2: Esquema simplificado de la red de transporte

### 7.3 Modelo Matemático del Sistema a Controlar

En la Figura 7.3 se observa la estructura simplificada del sistema del tanque de almacenamiento. Las variables a controlar serán el caudal de salida ( $F_3$ ) y el nivel ( $h$ ) de gasolina natural dentro del tanque de almacenamiento. Se desea controlar  $F_3$  para asegurar el suministro de gasolina natural a la planta de procesamiento y  $h$  para mantener constante el nivel del tanque, es decir para no sobrepasar su capacidad. El modelo matemático se consideró para un sistema SISO. En la Tabla 7.1 se muestran las dimensiones del tanque seleccionadas en base a la producción de los yacimientos (Secretaría de Energía, 2012). A partir de estos se asume que el tanque tiene un volumen que permite acumular una producción conjunta de 30 días. En este modelo se asumió que los yacimientos y la planta de destino poseen sus propios tanques de almacenamiento, todos ellos bien controlados.

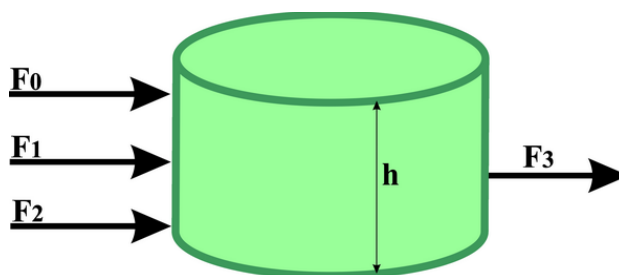


Figura 7.3: Sistema a controlar

Dimensiones del tanque	
Altura ( $h$ )	12 m
Volumen total ( $V$ )	1487 m <sup>3</sup>
Diámetro ( $d$ )	12.6 m
Sección del tanque ( $A = \pi r^2$ )	124 m <sup>2</sup>

Tabla 7.1: Dimensiones del tanque

El balance de masa correspondiente al sistema a controlar es el siguiente:

$$\text{Entrada} - \text{Salida} = \text{Acumulación}$$

$$F_0 + F_1 + F_2 - F_3 = \frac{dV}{dt} = A \frac{dh}{dt} \quad \text{Ec. 7.1}$$

Se asume una relación lineal entre  $h$  y  $F_3$  (Ec. 7.2):

$$F_3 = \frac{h}{R} \quad \text{Ec. 7.2}$$

Aplicamos la transformada de Laplace a las Ec. 7.1 y 7.2 y obtenemos las siguientes expresiones:

$$F_0(s) + F_1(s) + F_2(s) - F_3(s) = As h(s) \quad \text{Ec. 7.3}$$

$$F_3(s) = \frac{h(s)}{R} \quad \text{Ec. 7.4}$$

El sistema a controlar tiene dos variables de control  $F_3$  y  $h$ . Por lo tanto, se obtienen dos funciones de transferencias correspondientes a cada variable:

a) Variable de control  $F_3$ :

Despejamos de la Ec. 7.4  $h(s)$  y remplazamos en la Ec. 7.3:

$$F_0(s) + F_1(s) + F_2(s) - F_3(s) = AsRF_3(s) \quad \text{Ec. 7.5}$$

Reordenando obtenemos las funciones de transferencia que relacionan cada caudal de entrada con el caudal de salida  $F_3$  (Ec. 7.6, 7.7 y 7.8).

$$G_1(s) = \frac{F_3(s)}{F_0(s)} = \frac{1}{\tau s + 1} \quad \text{Ec. 7.6}$$

$$G_2(s) = \frac{F_3(s)}{F_1(s)} = \frac{1}{\tau s + 1} \quad \text{Ec. 7.7}$$

$$G_3(s) = \frac{F_3(s)}{F_2(s)} = \frac{1}{\tau s + 1} \quad \text{Ec. 7.8}$$

Dónde:

$$\tau = AR$$

$R$ : Resistencia al flujo turbulento:  $R = 0.023 \text{ m}^{-2} \text{ min}$

**b) Variable de control  $h$ :**

Despejamos  $F_3(s)$  de la Ec. 7.4 y remplazamos en la Ec. 7.3:

$$F_0(s) + F_1(s) + F_2(s) - \frac{h(s)}{R} = Ash(s) \quad \text{Ec. 7.9}$$

Reordenando obtenemos las funciones de transferencia que relacionan cada caudal de entrada con el nivel de gasolina natural  $h(s)$  (Ec. 7.10, 7.11 y 7.12).

$$G_1(s) = \frac{h(s)}{F_0(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad \text{Ec. 7.10}$$

$$G_2(s) = \frac{h(s)}{F_1(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad \text{Ec. 7.11}$$

$$G_3(s) = \frac{h(s)}{F_2(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad \text{Ec. 7.12}$$

Dónde:

$$\tau = AR$$

$$K = R$$



### 7.4 Sistema a Lazo Abierto

En primer lugar se simuló y evaluó el comportamiento del sistema a lazo abierto. En la Figura 7.4 se observa el diagrama del sistema sin control cuando se considera que la variable de control será el caudal de salida  $F_3$ .

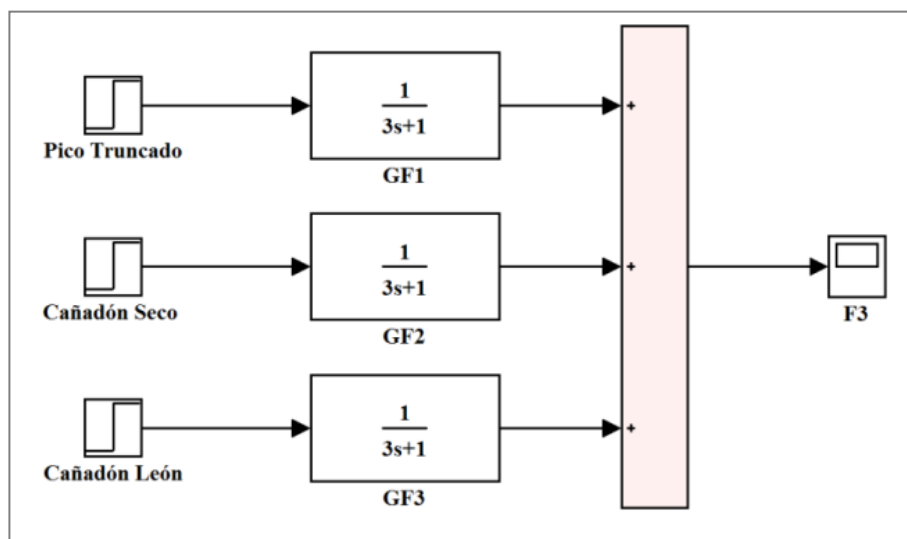


Figura 7.4: Diagrama del sistema sin control

Con los datos del sistema y la función de transferencia correspondiente a cada variable de entrada, se realizaron simulaciones a lazo abierto para evaluar el comportamiento del sistema. Se evaluó la estabilidad del sistema simulando el efecto de una perturbación escalón. Se define como estable a todo aquel sistema que tiene la capacidad de alcanzar un nuevo estado estacionario, cuando es movido de su estado estacionario inicial con una perturbación estable (ej. escalón, pulso, impulso, sinusoidal). En la Figura 7.5 se puede observar como el sistema alcanza el estado estacionario frente a una perturbación escalón.

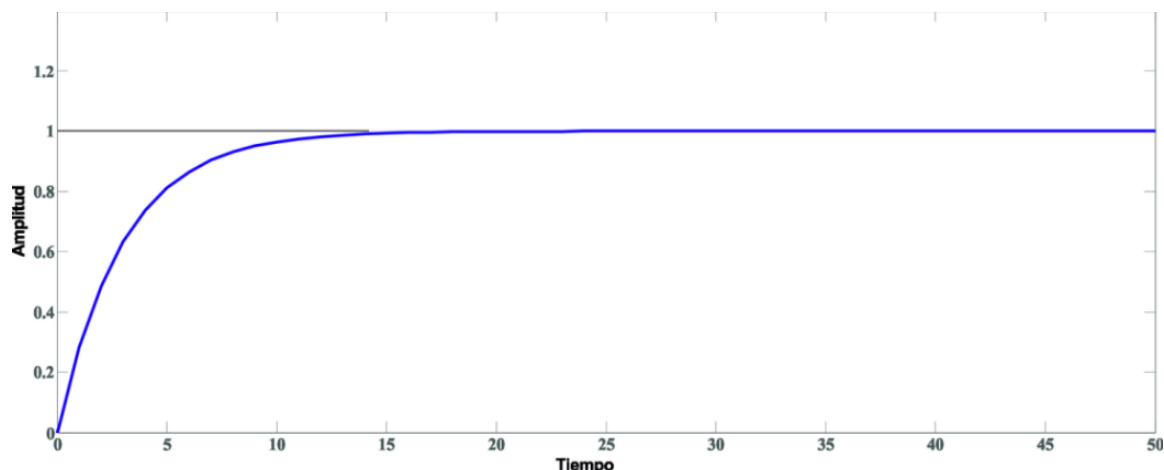


Figura 7.5: Respuesta del sistema a lazo abierto considerando como variable de salida  $F_3$

En la Figura 7.6 se puede observar el diagrama del sistema a lazo abierto. En este caso se considera que la variable de control será el nivel ( $h$ ) de gasolina natural dentro del tanque de almacenamiento.

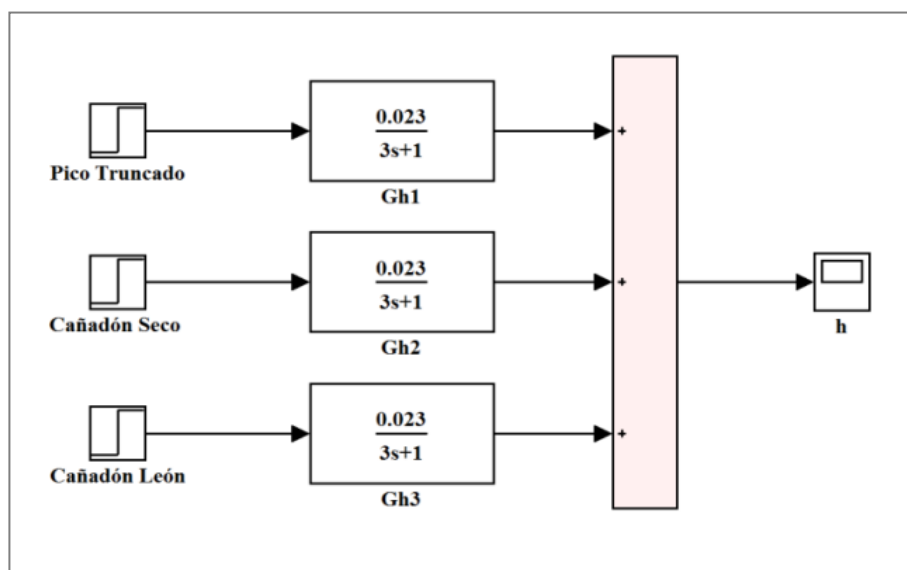


Figura 7.6: Diagrama del sistema sin control

Para este caso también se realizaron las simulaciones a lazo abierto para observar su comportamiento frente a perturbaciones. En la Figura 7.7 se muestra como el sistema alcanza el estado estacionario frente a una perturbación escalón.

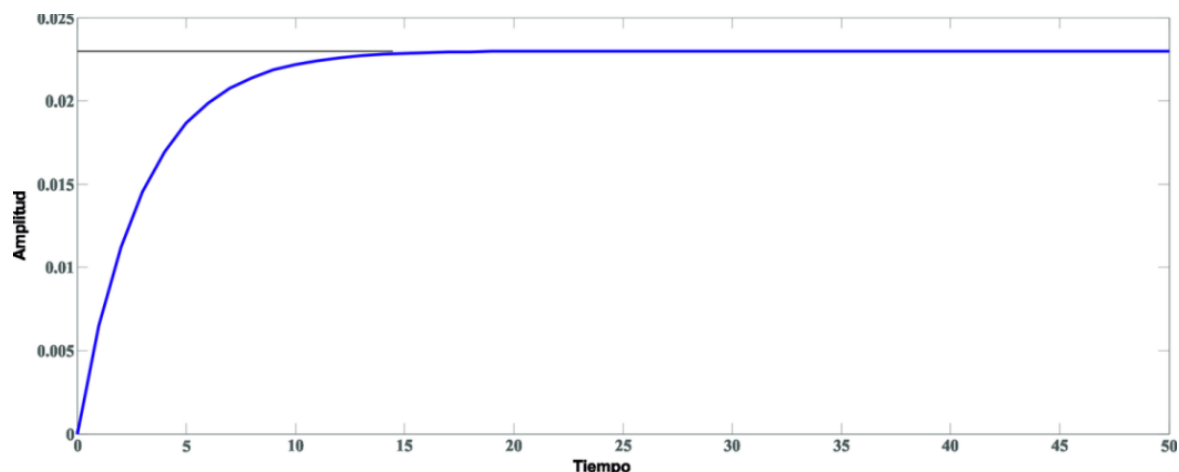


Figura 7.7: Respuesta del sistema a lazo abierto considerando como variable de salida  $h$

### 7.5 Sistema a Lazo Cerrado

Cuando la variable de control es  $F_3$ , el caudal que manipularemos es el proveniente del yacimiento Cañadón León ya que este yacimiento tiene la mayor reserva de gasolina natural. Esto nos asegurará satisfacer la demanda, cuando en los otros yacimientos ocurra una declinación de la producción. Para la variable de control  $h$ , se manipulará el caudal proveniente del yacimiento Cañadón Seco ya que es el segundo yacimiento con mayor producción luego de Cañadón León.

Se han optimizado los parámetros de dos controladores: PI y PID. Se adoptó un controlador PI para controlar la variable de salida  $F_3$  y un controlador PID para controlar la variable de salida  $h$ . En las Figuras 7.8 y 7.9 se pueden observar los diagramas para cada sistema con control.

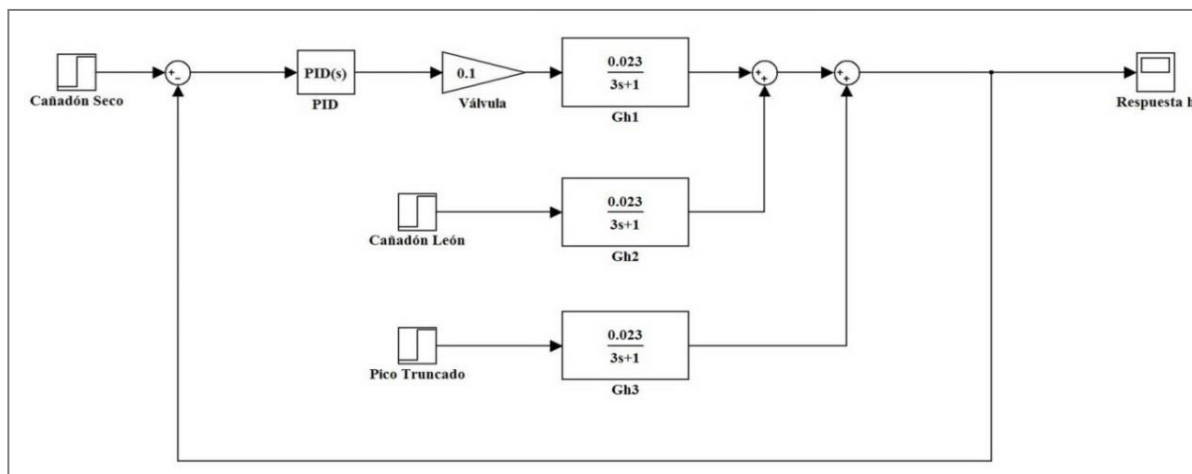


Figura 7.8: Diagrama del sistema SISO con control PID

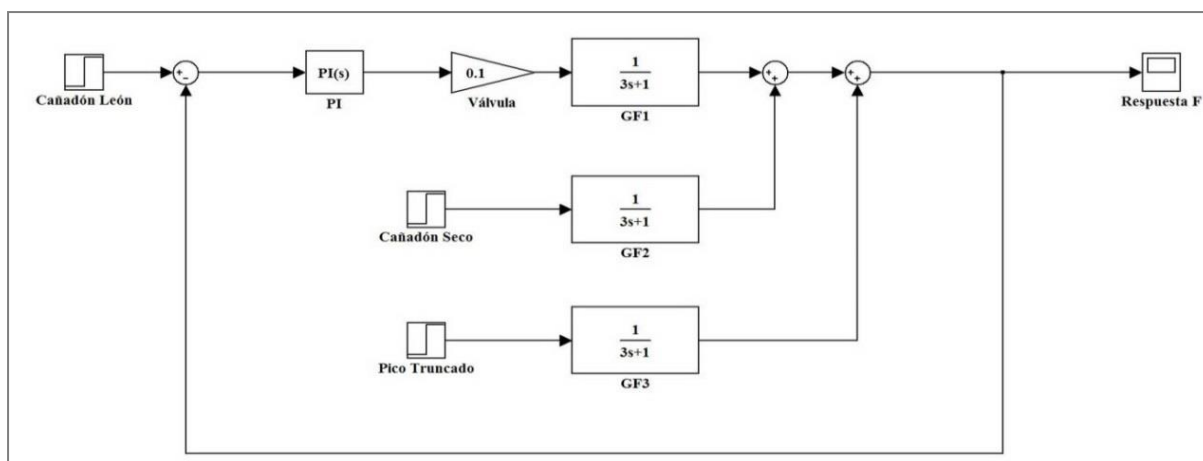


Figura 7.9: Diagrama del sistema SISO con control PI

### 7.5.1 Controladores PI y PID

Un PI es un controlador retroalimentado con acción proporcional-integral (Luyben y Luyben, 1997). Con un control proporcional, normalmente existiría un error en estado estacionario. La función principal de la acción integral es asegurar que la salida del proceso concuerde con la referencia en estado estacionario.

La salida de este controlador está dada por:

$$u(t) = K_c \varepsilon(t) + \frac{K_c}{\tau_I} \int \varepsilon(t) dt \quad \text{Ec. 7.13}$$

De la Ec. 7.13 se obtiene fácilmente a la función de transferencia de un controlador PI:

$$G(s) = K_c \left( 1 + \frac{1}{\tau_I s} \right) = K_P + \frac{K_I}{s} \quad \text{Ec. 7.14}$$

Un PID (Aström y Hägglund, 1995) es un controlador retroalimentado que calcula el error entre un valor medido y el valor que se quiere obtener (Set-Point), para aplicar una acción correctora que ajuste el proceso. En términos industriales se lo conoce como controlador proporcional-integral-derivativo. La salida de este controlador está dada por:

$$u(t) = K_c \varepsilon(t) + \frac{K_c}{\tau_I} \int \varepsilon(t) dt + K_c \tau_D \frac{d\varepsilon}{dt} \quad \text{Ec. 7.15}$$

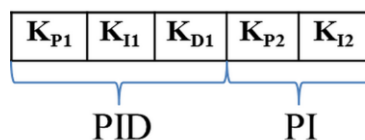
Con la presencia del término derivativo ( $d\varepsilon/dt$ ), el controlador PID anticipa cuál será el error en el futuro inmediato. Además, aplica una acción de control que es proporcional a la velocidad de cambio en el error. Debido a esta propiedad a la acción de control derivativa se la refiere en algunos casos como control anticipativo. De la Ec. 7.15 se obtiene fácilmente la función de transferencia de un controlador PID:

$$G(s) = K_c \left( 1 + \frac{1}{\tau_I s} + \tau_D s \right) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad \text{Ec. 7.16}$$

El término proporcional ( $K_P$ ) provee una acción de control proporcional, en general, a la señal de error a través del factor de ganancia. El término integral ( $K_I/s$ ) reduce los errores de régimen permanente a través de la compensación de baja frecuencia por un integrador. Finalmente, el término derivado ( $K_D s$ ) mejora la respuesta transitoria a través de la compensación de alta frecuencia por un factor diferenciador.

### 7.5.2 Ajuste de Parámetros Mediante Algoritmos Genéticos

Para el ajuste de los parámetros de los controladores PI y PID de un sistema SISO se utilizaron las herramientas de Algoritmos Genéticos de MATLAB<sup>®</sup> (Chipperfield *et al.*, 1994) junto con Simulink. En esta primera fase, utilizamos los valores de población, cruzamiento y mutación que ofrecen las herramientas de Algoritmos Genéticos. En la Figura 7.10 se observa el vector que representa a un individuo, los primeros tres parámetros pertenecen al controlador PID y los dos últimos al controlador PI.



**Figura 7.10:** Representación del individuo

La función de aptitud para este problema fue formulada a partir de minimizar el error del sistema (Ec. 7.17). La función de aptitud contempla el error de cada controlador. Por lo tanto, se desarrolló dicha función con un enfoque agregativo. Este tratamiento es un caso particular de la técnica no-Pareto ya que los errores tienen distintos órdenes de magnitud pues provienen de diversos tipos de controladores. Se utilizó este enfoque ya que este tipo de funciones agregativas son superiores a la jerarquización de Pareto en problemas combinatorios (Coello Coello *et al.*, 2007; Cecchini, 2010).

$$f = \sum |\varepsilon_i(t)| \quad \text{Ec. 7.17}$$

El error  $\varepsilon_i$  es la diferencia entre el valor medido y el valor que se desea obtener. Para el controlador PID, el error corresponde a la diferencia entre el nivel del tanque requerido y el nivel medido ( $h_{sp} - h_m$ ). El error correspondiente al controlador PI es la diferencia entre el caudal  $F_3$  que se desea enviar a la planta de procesamiento y el valor del caudal medido a la salida del tanque ( $F_{3sp} - F_{3m}$ ). Los errores provienen de distinto tipo de controladores; por lo

tanto, para que todos los términos de la función de aptitud resulten significativos es necesario normalizar cada término. Esto da lugar a la Ec. 7.18:

$$f = \frac{|\varepsilon_{PID}(t)|}{h_{sp}} + \frac{|\varepsilon_{PI}(t)|}{F_{3sp}} \quad \text{Ec. 7.18}$$

Se desea que la función de aptitud tienda a cero. Entonces, para determinar si el algoritmo ha llegado a una solución aceptable se consideró como criterio de parada un número máximo de generaciones igual a 100.

En la Figura 7.11 se observa el procedimiento de cada iteración. El Algoritmo Genético genera un conjunto de soluciones (población) donde cada vector (individuo) contempla los parámetros de los controladores. Con estos parámetros se realizan simulaciones mediante Simulink para obtener los valores de las variables controladas del sistema y poder evaluar la función de aptitud. Las corridas finalizan cuando se encuentra el mejor valor de aptitud.

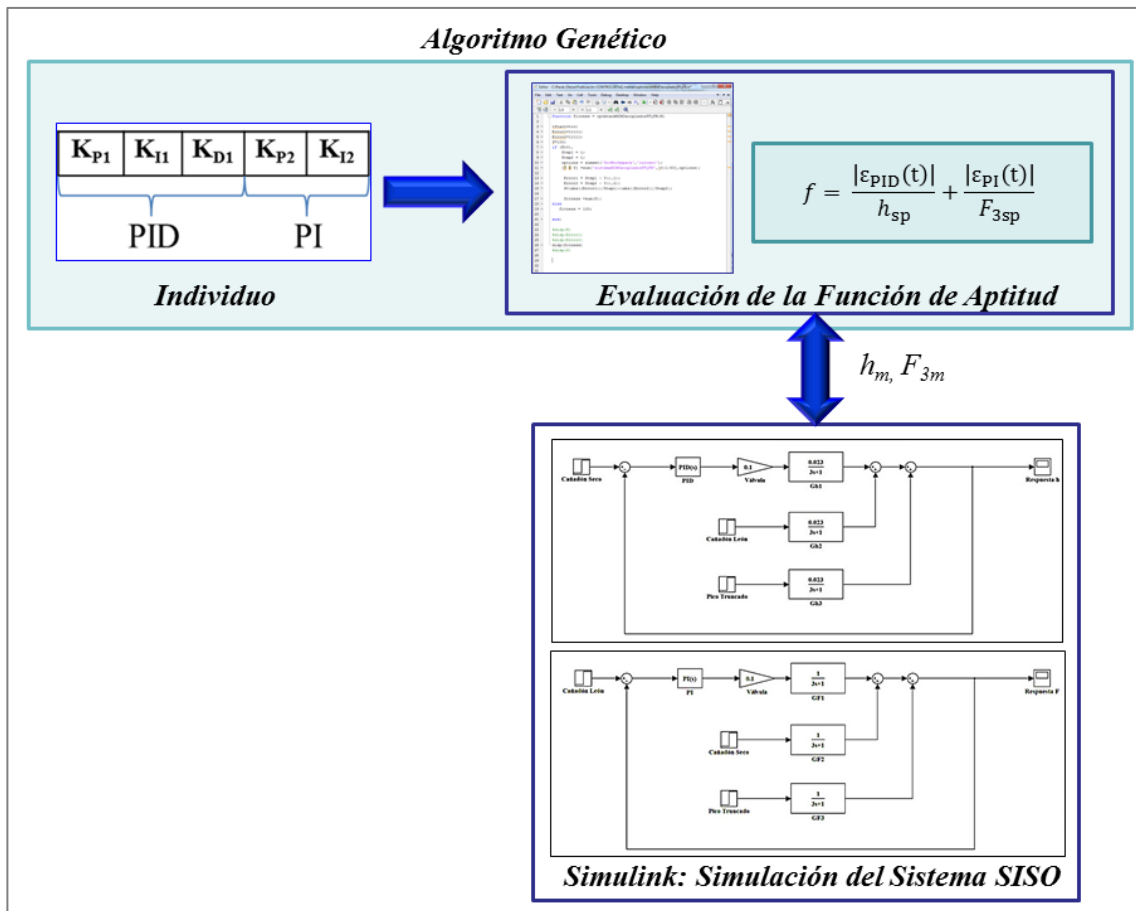


Figura 7.11: Diagrama de bloques de cada iteración del Algoritmo Genético con Simulink

### 7.6 Evaluación de Desempeño y Resultados

En primer lugar se realizó un ajuste de los controladores mediante el método clásico de Ziegler-Nichols (Z-N) (Aström y Hägglund, 2004; Hägglund y Aström, 2002). En las Figura 7.12 y 7.13 se presentan las respuestas del sistema a una perturbación escalón a lazo cerrado.



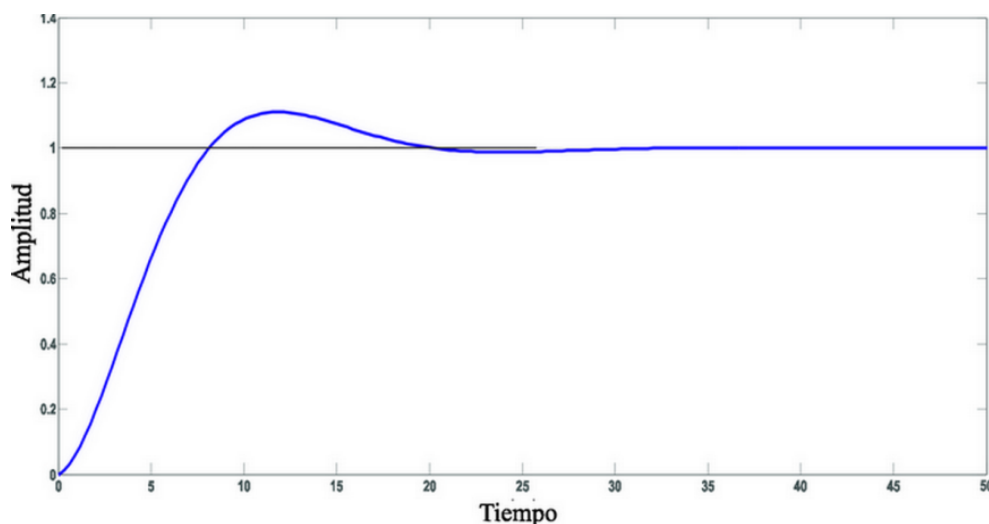


Figura 7.12: Respuesta a un escalón del controlador PI diseñado por Z-N

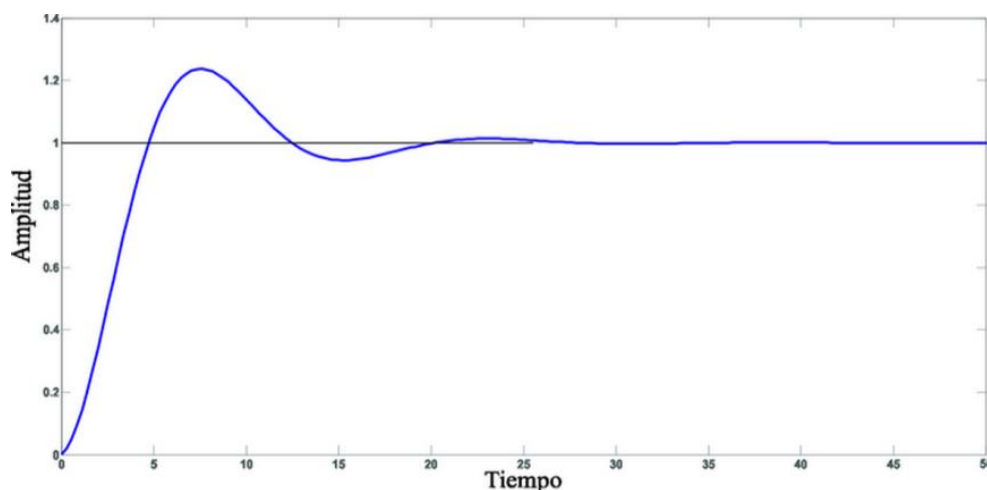


Figura 7.13: Respuesta a un escalón del controlador PID diseñado por Z-N

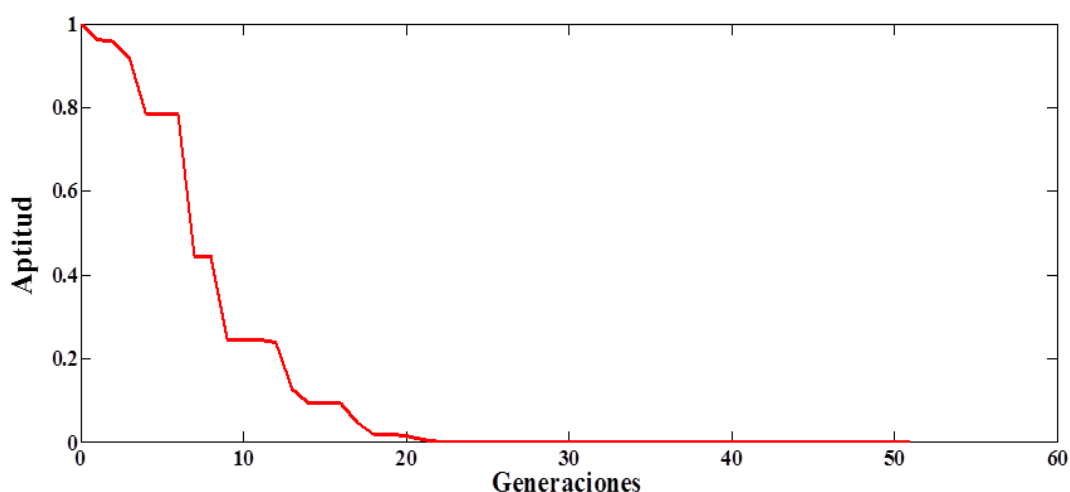
Luego, se obtuvieron los parámetros de los controladores mediante el Algoritmo Genético (AG). En la Tabla 7.2 se muestran los parámetros calculados con el método clásico mediante Z-N y AG.

Método	PID			PI		Aptitud
	$K_p$	$K_i$	$K_d$	$K_p$	$K_i$	
Z-N	5.217	26.087	0.261	4.731	5.350	$2.69 \times 10^{-04}$
AG	9.314	8.569	1.328	8.585	3.717	$3.34 \times 10^{-06}$

Tabla 7.2: Parámetros de los controladores

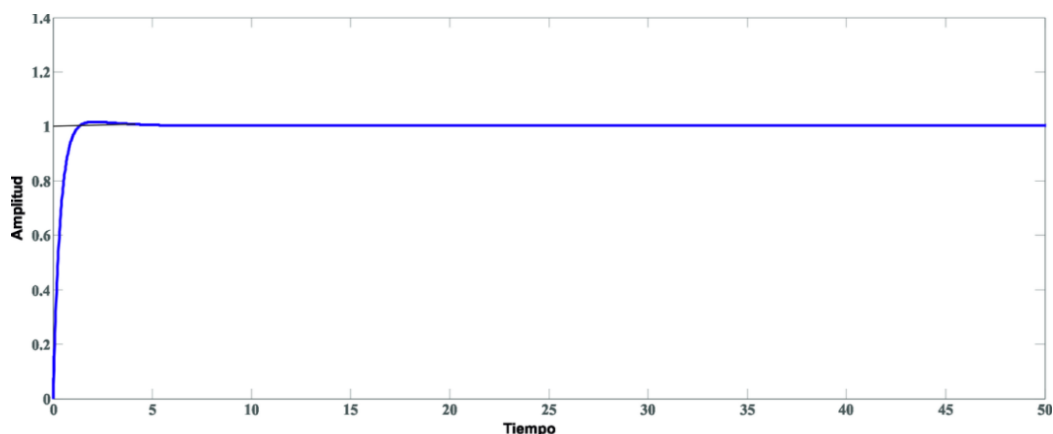
En la Tabla 7.2 se observa que mediante el Algoritmo Genético se logra disminuir en dos órdenes de magnitud la suma de los errores para estos parámetros. Se realizaron 30 corridas con el Algoritmo Genético y se obtuvo un valor de aptitud promedio de  $1.84 \times 10^{-05}$ , el cual es mejor que el obtenido mediante Z-N. En la Tabla C.1 se puede observar los parámetros obtenidos para el resto de las corridas del Algoritmo Genético.

El Algoritmo Genético encuentra la mejor solución alrededor de la iteración número 50. En la Figura 7.14 se observa que a partir de la iteración 30 la función de aptitud comienza a tener valores muy cercanos y por lo tanto, termina la corrida. Además, obtiene soluciones rápidamente, demorando en cada corrida aproximadamente 75 segundos.



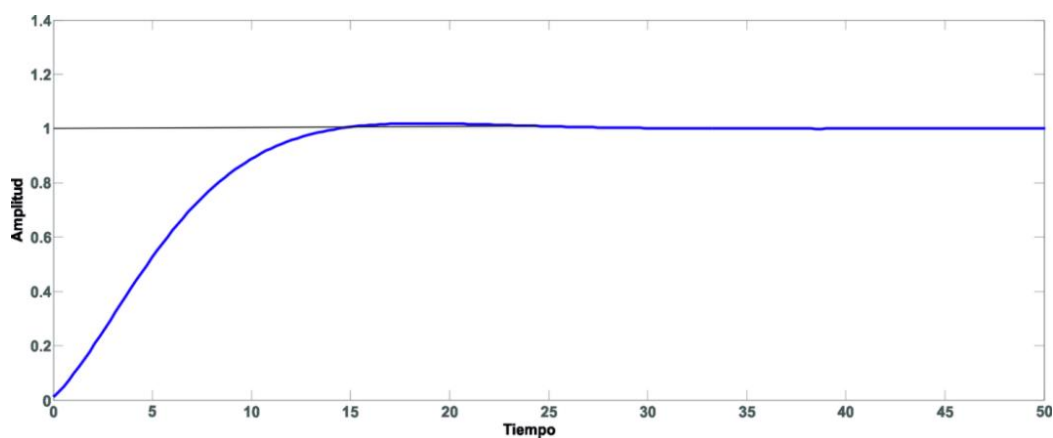
**Figura 7.14:** Comportamiento de la función de aptitud

Con los parámetros obtenidos con el Algoritmo Genético para los controladores PI y PID se realizaron las simulaciones a lazo cerrado para evaluar las respuestas del sistema. La Figura 7.15 muestra la respuesta del sistema con control PI frente a una perturbación escalón. Se puede observar que el sistema entra en estado estacionario rápidamente y se elimina el sobrepico que se observa en la Figura 7.12.



**Figura 7.15:** Respuesta bajo control PI diseñado con el Algoritmo Genético

En la Figura 7.16 se muestra la respuesta del sistema con control PID que se obtuvo frente a una perturbación escalón. Se puede observar que el sistema entra en estado estacionario al mismo tiempo que con los parámetros obtenidos con Z-N, pero se eliminan los sobrepicos que se observan en la Figura 7.13.



**Figura 7.16:** Respuesta bajo control PID diseñado con el AG

Las simulaciones realizadas para analizar el comportamiento del sistema demuestran que los resultados obtenidos son satisfactorios ya que las respuestas frente a perturbaciones mejoran con respecto a las obtenidas con Z-N.

## 7.7 Conclusiones

Se realizó el ajuste de los parámetros de los controladores PI y PID mediante el empleo de un Algoritmo Genético y se compararon los resultados con los de la técnica clásica Z-N. Las simulaciones que sirven para analizar el comportamiento del sistema demuestran que los resultados obtenidos son satisfactorios ya que las respuestas frente a las perturbaciones efectuadas en los caudales de entrada mejoran con respecto a las obtenidas con Z-N. Se puede observar que los sistemas alcanzan el estado estacionario rápidamente y se eliminan los sobrepicos (Figuras 7.15 y 7.16). Este resultado demuestra que la propuesta es capaz de mejorar significativamente la capacidad de funcionamiento de las redes de cañerías y logra garantizar el suministro constante a la planta de procesamiento.

El empleo de un método numérico estocástico, como Algoritmos Genéticos, para lograr el ajuste simultáneo de los controladores de un sistema tiene las siguientes ventajas:

- ✓ La búsqueda de soluciones óptimas se realiza en forma paralela hacia varias direcciones.
- ✓ No se necesita información del problema; sólo la función objetivo y los niveles de aptitud influyen en las direcciones de búsqueda.
- ✓ La solución óptima se encuentra en tiempos de cómputos bajos.

Este trabajo forma parte de la primera etapa en el diseño de los controladores PI y PID, en la cual no se consideró las interacciones entre los sistemas. En base a los resultados obtenidos y al análisis del caso de estudio se proyecta continuar con la segunda fase del diseño de controladores, donde se considerarán las interacciones que se producen entre los sistemas modelando un sistema MIMO.

Los resultados obtenidos en este capítulo dieron origen a un trabajo publicado en la revista *Mecánica Computacional* (Oteiza *et al.* 2013).

# CAPÍTULO 8

## DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL MIMO MEDIANTE ALGORITMOS GENÉTICOS

---

### *Contenido del Capítulo*

En este capítulo se presenta el diseño óptimo de un sistema de control Realimentado-Anticipativo integrado para el control de volumen de gasolina natural en un sistema MIMO (de sus siglas en inglés: Multi-Input Multi-Output).

Se realizó un estudio de las interacciones que ocurren en el sistema a controlar. Luego, mediante Algoritmos Genéticos se optimizaron los parámetros del sistema de control. Además, se introdujeron mejoras a través de la paralelización, la técnica adoptada consiste en el uso de múltiples procesadores para evaluar varios individuos al mismo tiempo con el objetivo de acelerar los cálculos.



## 8.1 Introducción

Antes de los años 1940, la mayoría de los procesos industriales fueron controlados de forma manual o con controladores muy primitivos. Al mismo tiempo, el amplio fenómeno de la industrialización requirió mayores volúmenes de producción. En consecuencia, la cantidad de variables a controlar en una planta se incrementó significativamente. El control automático se convirtió en una solución atractiva de los problemas de operabilidad en las plantas. Por lo tanto, creció considerablemente desde 1950.

La mayoría de los sistemas son multivariable y exhiben interacción entre sus variables. El diseño de un sistema de control debe tener en cuenta estos fenómenos para garantizar una regulación fiable. Inspirado en el campo del análisis numérico Jyh-Cheng Jeng (2012) presentó un nuevo método de identificación a lazo cerrado para un sistema multivariable interactivo, donde utilizó una expansión de series B-spline y una técnica lineal de mínimos cuadrados.

A fines del siglo XX, los Algoritmos Evolutivos crecieron con gran velocidad. Sus aplicaciones prácticas se extendieron ampliamente a muchas áreas de conocimiento, donde los diversos problemas tenían una característica en común: eran difícil o imposible de resolver con métodos tradicionales. En el campo de control y de optimización multiobjetivo, los Algoritmos Evolutivos fueron útiles para encontrar relativamente buenas soluciones. En particular, en el comienzo del siglo XXI, Viswanathan *et al.* (2001) abordaron exitosamente la identificación del problema a lazo cerrado de un sistema TITO (de sus siglas en Inglés: two-input two-output) y emplearon Algoritmos Genéticos para localizar con fiabilidad el mínimo global del problema de mínimos cuadrados. Más tarde, Wei-Der Chang (2007) propuso una modificación del cruzamiento en Algoritmos Genéticos, y utilizó ese método para determinar las ganancias de un controlador PID en un proceso multivariable. Además,

Meng y Song (2007) presentaron un Algoritmo Genético rápido, exhibiendo mejoras en la población, selección, cruzamiento y mutación en comparación al Algoritmo Genético simple. Sucesivamente, en cuanto a los sistemas autoajustables, Oh *et al.* (2011) propusieron un controlador de velocidad de ajuste automático de base genética para unidades de alto rendimiento de los motores de inducción. En contraste, Liu y Hsu (2010) diseñaron un controlador PI automático mediante un algoritmo metaheurístico denominado optimización por enjambre de partículas (PSO: por sus siglas en inglés) (Kennedy, 2010).

A pesar de los avances ya realizados en el diseño de controladores multivariables, hay más variantes procedentes de la ciencia computacional que todavía pueden aportar mejoras sustanciales en los controladores modernos. Vale la pena explorar el potencial de las técnicas metaheurísticas (Alba, 2005) para el diseño de controladores.

En particular, los Algoritmos Genéticos son métodos numéricos estocásticos robustos de exploración y explotación para la solución de problemas que no son asequibles por métodos tradicionales (Meng y Song, 2007). Su potencial es enorme ya que los Algoritmos Genéticos tienen un alto paralelismo implícito por lo cual, son numéricamente muy eficiente. El control en línea provee escenarios que requieren mucho tiempo de cómputo en problemas industriales. Además, los algoritmos paralelos generalmente ejecutan un modelo de búsqueda diferente con respecto a los secuenciales (Alba, 2005). Por lo tanto, además de disminuir tiempos computacionales, la calidad de la solución tiende a ser mejor.

El diseño del sistema de control consta de dos etapas. En la primera etapa presentada en el Capítulo 7 (Oteiza *et al.*, 2013) consideramos dos sistema SISO, sin considerar las interacciones entre los dos sistemas. Las simulaciones realizadas para analizar el comportamiento del sistema demuestran que los resultados obtenidos con Algoritmos Genéticos son satisfactorios ya que las respuestas del sistema mejoran con respecto a las obtenidas con la técnica clásica de Ziegler-Nichols.



En base a los resultados obtenidos y al análisis del caso de estudio, en este capítulo completamos la segunda fase del diseño de controladores de un sistema MIMO, donde se consideraron las interacciones que se producen entre los sistemas. Además, se diseñó un lazo anticipativo para controlar los caudales de entrada al sistema de almacenamiento con el fin de evitar la falta de suministro al mismo.

Por lo tanto, se diseñó y optimizó mediante Algoritmos Genéticos un sistema de control Realimentado-Anticipativo integrado para controlar el volumen de gasolina natural en el nodo concentrador.

## 8.2 Sistema MIMO

El sistema bajo control es un tanque de almacenamiento, donde los hidrocarburos líquidos se recogen por medio de cañerías procedentes de diversas fuentes, con sus propias dinámicas inherentes que se contemplan en el diseño.

El tanque de almacenamiento es un sistema MIMO ya que consta de tres variables de entrada: caudales individuales provenientes de los yacimientos Cañadón Seco ( $F_0$ ), Cañadón León ( $F_1$ ) y Pico Truncado ( $F_2$ ) y dos variables de control: nivel del líquido en el tanque ( $h$ ) y caudal de salida ( $F_3$ ). Para este caso, se emplearon las mismas suposiciones, dimensiones del tanque y producciones que las utilizadas en el Capítulo 7.

A diferencia de la mayoría de los diseños típicos de control multivariable, la característica distintiva de este sistema MIMO no convencional es que tiene tres entradas, en lugar de sólo dos. Para la obtención de las funciones de transferencia del sistema se siguieron los mismos pasos que en la sección 7.3 del Capítulo 7.

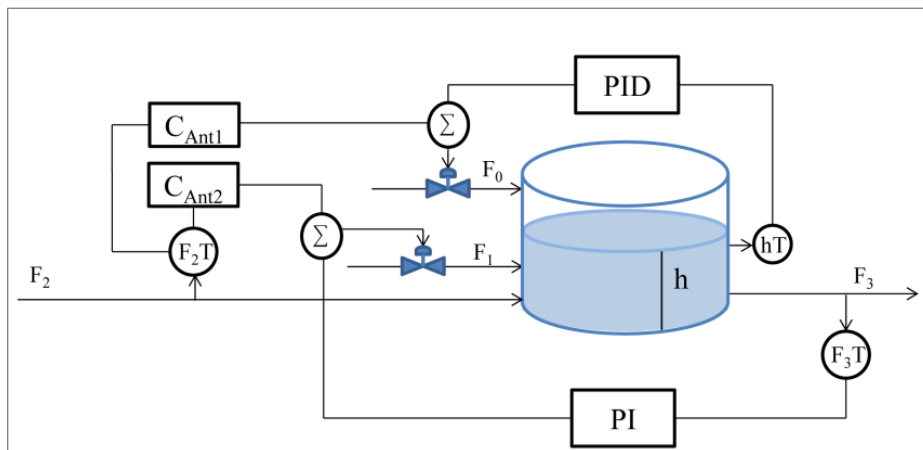


Figura 8.1: Sistema de control Realimentado-Anticipativo integrado

En la Figura 8.1 se muestra el sistema de control Realimentado-Anticipativo integrado. Para la inicialización del diseño de este control integrado consideramos el control Realimentado adoptado en Oteiza *et al.* (2013). Además, consideramos dos controladores anticipativos ( $C_{Ant1}$ ,  $C_{Ant2}$ ) que se diseñaron a partir del método de Foxboro para evitar la falta de suministro al tanque de almacenamiento. Este método se basa en asumir la siguiente función de transferencia (Ec. 8.1) para cada controlador:

$$G_{Ant}(S) = -k_{ant} \frac{\tau_1 s + 1}{\tau_2 s + 1} \quad \text{Ec. 8.1}$$

### 8.3 Matriz de Ganancias Relativas (RGA)

Al considerar un número de variables de entrada y salida en los sistemas MIMO, puede ocurrir que una variable manipulada pueda afectar a más de una variable. Este problema se conoce como interacción y hace más difícil el control de los lazos. Esto se produce cuando se modifica el valor de una variable manipulada con el fin de regular el comportamiento de una variable controlada. Esta manipulación afectará a otras variables de salida distintas a la que se pretendía modificar. Para resolver este problema se podría emplear la matriz de Ganancias Relativa (RGA, por sus siglas en inglés).

RGA (Shinskey, 1979), ha sido ampliamente utilizada como una medida de las interacciones entre distintas variables del proceso y como una herramienta de selección de la mejor estructura en sistemas de control. Para un sistema 2x2 (dos entradas-dos salidas) la matriz de ganancias está dada por  $\lim_{s \rightarrow 0} G(s) = K$  y los términos de la matriz de ganancias relativas pueden ser expresados como ((Luyben y Luyben, 1997):

$$\lambda_{ij} = ([K^{-1}]^T)_{ij} \cdot [K]_{ij} \quad \text{Ec. 8.2}$$

Mediante los valores de  $\lambda_{ij}$  podemos analizar el efecto de cierto apareamiento sobre la interacción y el desempeño del lazo cerrado. Si el valor de  $\lambda_{ij} < 1$ , esto indica que cuando el resto de las variables están siendo controladas, aumenta la ganancia del lazo en estudio. Esto puede desestabilizar el lazo y requiere un reajuste de sus parámetros. Si  $\lambda_{ij} > 1$ , va a disminuir la ganancia del lazo cuando el sistema esté en automático. En este caso se trabaja del lado seguro de la operación pero la dinámica del lazo puede hacerse muy lenta. Finalmente, si  $\lambda_{ij} = 0$ , es un indicativo de un inadecuado apareamiento entre las variables.

En el caso de estudio elegido, el sistema es de 2x3 (tres entradas-dos salidas) (Ec. 8.3), esto implica que sólo dos de las variables de entrada de tres se utilizan para el control. Mientras que la tercera variable de entrada tendrá que ser ajustado a un valor fijo y por lo tanto será redundante.

$$\begin{bmatrix} h \\ F_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{0.023}{3S+1} & \frac{0.974}{3S+1} & \frac{0.005}{3S+1} \\ \frac{0.012}{3S+1} & \frac{0.98}{3S+1} & \frac{0.006}{3S+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_0 \\ F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 8.3}$$

Para determinar el apareamiento de las variables de entrada con las de salida, primero hay que obtener los posibles subsistemas de 2x2. Mediante la siguiente expresión (Ec. 8.4):

$$\text{Número de subsistemas} = \frac{u!}{n!(u-n)!} \quad \text{Ec. 8.4}$$

Donde  $u$  es el número de variables de entrada y  $n$  el número de variables de salida. De acuerdo al sistema propuesto,  $u=3$  y  $n=2$  por lo tanto:

$$\text{Número de subsistemas} = \frac{3!}{2!(3-2)!} = 3 \quad \text{Ec.8.5}$$

Finalmente se obtuvieron los siguientes subsistemas:

$$\text{Subsistema 1: } \begin{bmatrix} h \\ F_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{0.023}{3S+1} & \frac{0.974}{3S+1} \\ \frac{0.012}{3S+1} & \frac{0.98}{3S+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_0 \\ F_1 \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 8.6}$$

$$\text{Subsistema 2: } \begin{bmatrix} h \\ F_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{0.974}{3S+1} & \frac{0.005}{3S+1} \\ \frac{0.98}{3S+1} & \frac{0.006}{3S+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 8.7}$$

$$\text{Subsistema 3: } \begin{bmatrix} h \\ F_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{0.023}{3S+1} & \frac{0.005}{3S+1} \\ \frac{0.012}{3S+1} & \frac{0.006}{3S+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_0 \\ F_2 \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 8.8}$$

Para cada subsistema en estado estacionario ( $s=0$ ) se calculó mediante la Ec. 8.2 las siguientes matrices de ganancias relativas:

$$\Lambda_1 = \begin{bmatrix} 2.077 & -1.077 \\ -1.077 & 2.077 \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 8.9}$$

$$\Lambda_2 = \begin{bmatrix} 6.1907 & -5.1907 \\ -5.1907 & 6.1907 \end{bmatrix} \quad \text{Ec.8.10}$$

$$\Lambda_3 = \begin{bmatrix} -0.2987 & 1.2987 \\ 1.2987 & -0.2987 \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 8.11}$$

Del análisis de las matrices Ec. 8.9, 8.10 y 8.11, se obtuvieron los siguientes acoplamientos:

$$F_0 \rightarrow h \quad F_1 \rightarrow F_3$$

A partir de este análisis, el caudal  $F_2$  lo contemplamos como un caudal complementario ante la eventual declinación de los otros yacimientos.

## 8.4 Sistema de Control Realimentado-Anticipativo de un Sistema MIMO

### 8.4.1 Ajuste de Controladores Mediante Algoritmos Genéticos

En la Figura 8.2 se muestra la estrategia de control propuesta. Mediante Algoritmos Genéticos optimizamos los parámetros de los controladores. El algoritmo evalúa los parámetros de los controladores realimentados y anticipativos mediante la función de aptitud (Ec. 8.12) planteada en el Capítulo 7 (Oteiza *et al.*, 2013) a partir de minimizar el error del sistema:

$$f = \frac{|\varepsilon_{\text{PID}}(t)|}{h_{\text{sp}}} + \frac{|\varepsilon_{\text{PI}}(t)|}{F_{3\text{sp}}} \quad \text{Ec. 8.12}$$

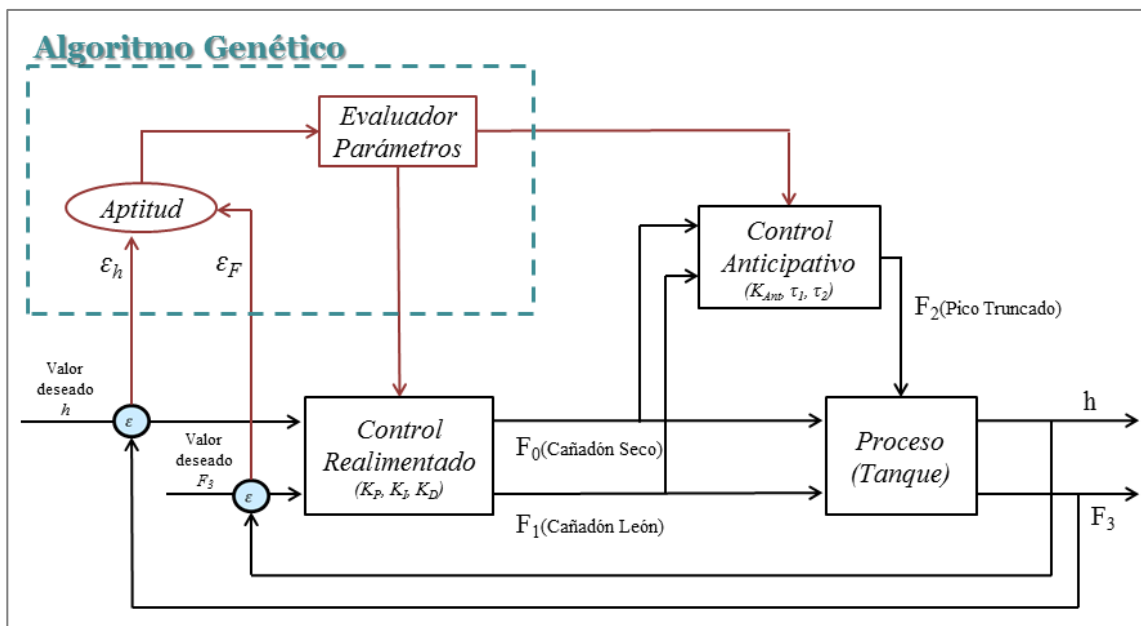


Figura 8.2: Diagrama de bloques de la propuesta

En la Figura 8.3 se muestra el vector que representa al individuo, los primeros cinco parámetros pertenecen a los controladores PID y PI y los últimos seis pertenecen a los dos controladores anticipativos empleados.

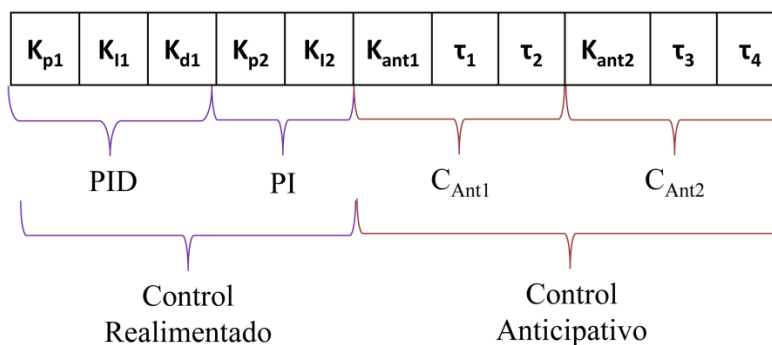


Figura 8.3: Representación del individuo

Se emplearon las herramientas de Algoritmos Genéticos de MATLAB<sup>®</sup> (Chipperfield *et al.*, 1994) junto con Simulink para ajustar los parámetros de sistema de control Realimentado-Anticipado integrado.

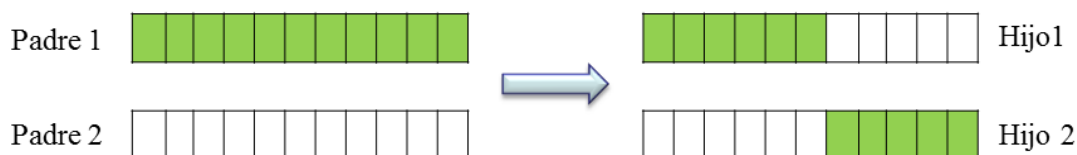
En cuanto a los parámetros del Algoritmo Genético, se realizaron una serie de pruebas experimentales con el fin de ajustar los parámetros del algoritmo. En la Tabla 8.1 se muestran los parámetros con los cuales se realizaron las ejecuciones de los algoritmos.

Generaciones	Individuos	Cruzamiento
150	100	0.8

**Tabla 8.1:** Configuración de parámetros para el Algoritmo Genético

Los experimentos se realizaron para los distintos tipos de cruzamiento que contiene la herramienta de Algoritmos Genéticos de MATLAB<sup>®</sup> que se presentan a continuación:

✓ Punto Simple: una vez seleccionados dos individuos se cortan sus cromosomas por un punto seleccionado aleatoriamente para generar dos segmentos diferenciados en cada uno de ellos. Se intercambian estos fragmentos para generar los nuevos descendientes. De esta forma los hijos heredan información genética de sus padres, tal como puede observarse en Figura 8.4.



**Figura 8.4:** Cruzamiento Punto Simple

✓ Dos Puntos: se realizan dos cortes aleatorios de los cromosomas de los padres. Debe tenerse en cuenta que ninguno de estos puntos de corte coincida con el extremo de los cromosomas para garantizar que se originen tres segmentos. Para generar la descendencia se escoge el segmento central de uno de los padres y los segmentos laterales del otro padre (ver Figura 8.5).

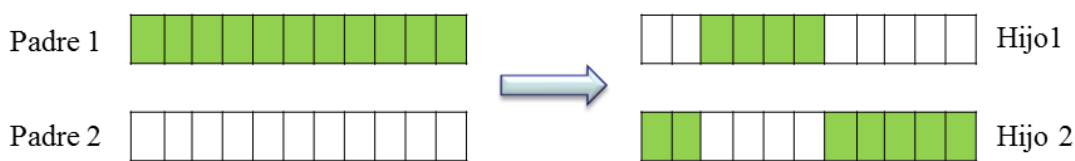


Figura 8.5: Cruzamiento Dos Puntos

✓ Disperso: (denominado en inglés, Scattered) crea un vector binario aleatorio de ceros y uno, el que determina qué gen de cada individuo se tomará de un padre o del otro (Figura 8.6).

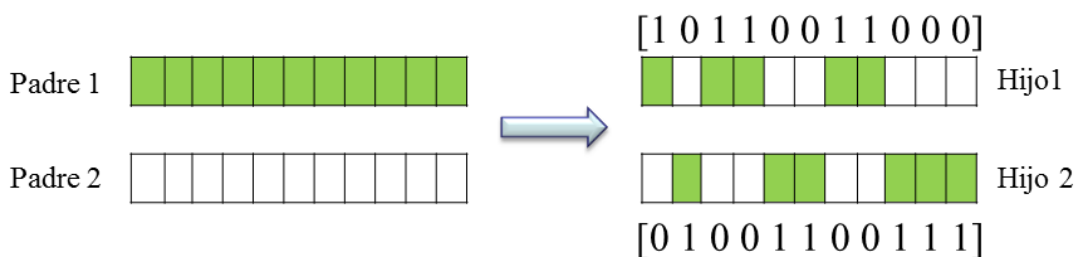


Figura 8.6: Cruzamiento Scattered

✓ Intermedio: crea los hijos haciendo un promedio ponderado de los padres. Se puede especificar los pesos por un solo parámetro,  $R$ , que puede ser un escalar o un vector fila con el número de individuos. La función crea el Hijo1 del PADRE1 y del PADRE2 usando la siguiente expresión (Ec.8.13):

$$HIJO1 = PADRE1 + rnd * R * (PADRE2 - PADRE1) \tag{Ec. 8.13}$$

✓ Heurístico: crea los nuevos individuos que se encuentran al azar en la línea que contiene los dos padres, una pequeña distancia de la matriz con el mejor valor de aptitud, en la dirección opuesta a la de los padres con el valor de peor aptitud.

✓ Aritmético: crea los hijos que son una media aritmética aleatoria de dos padres. Los hijos son siempre factibles con respecto a restricciones lineales y límites.



### 8.4.2 Evaluación de Desempeño y Resultados

Se ajustaron los parámetros del sistema de control multivariable mediante Algoritmos Genéticos. Además, se evaluó el desempeño del Algoritmo Genético con los diferentes cruzamientos mencionados en la sección anterior. Las ejecuciones se realizaron en una computadora con un procesador AMD 8120 8-Core con 3.10 GHz y 8 GB de memoria RAM. En cada iteración el Algoritmo Genético genera una población de soluciones y para cada individuo evalúa la función de aptitud. Para esto es necesario llamar al simulador Simulink para obtener los valores medidos de las variables controladas del sistema y así poder evaluar la función de aptitud. Como se puede observar en la Figura 8.7 el ciclo termina cuando se obtiene el mejor valor de aptitud.

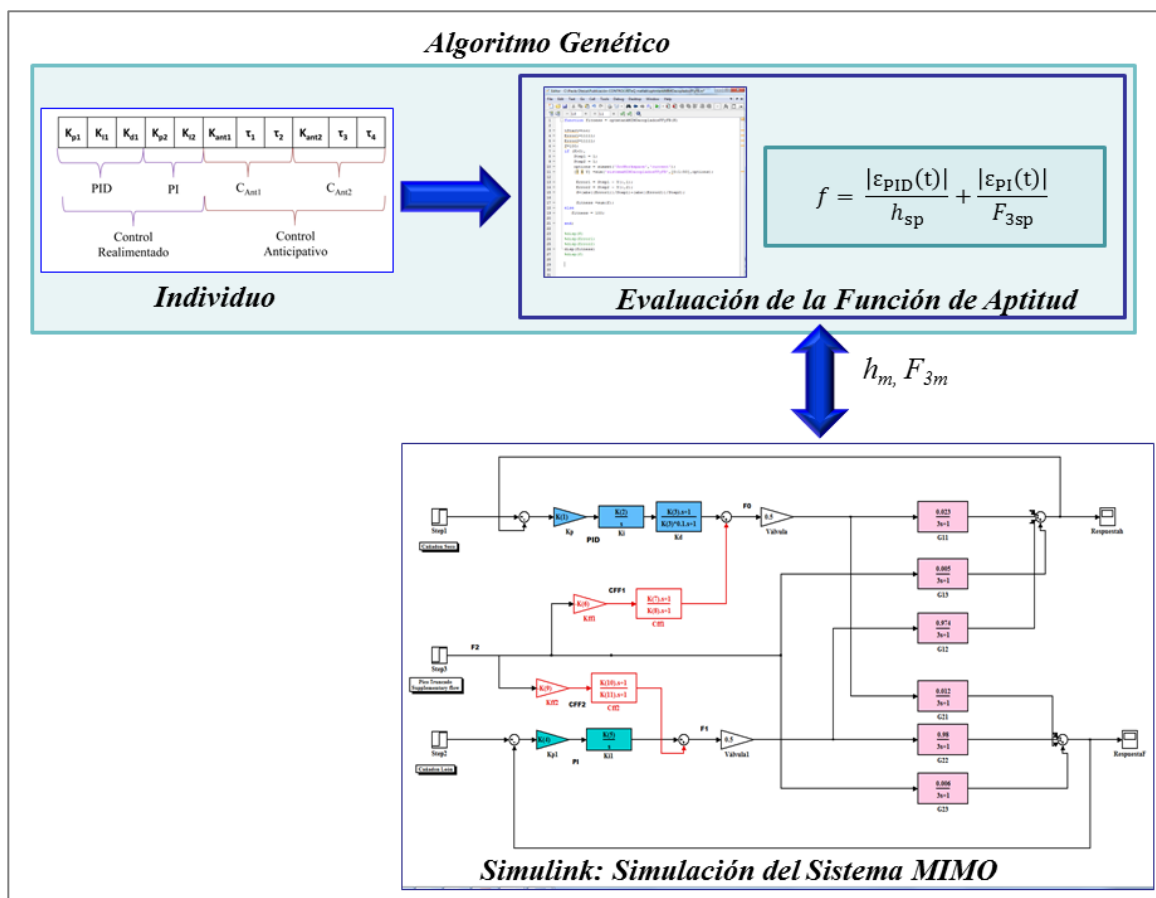


Figura 8.7. Diagrama de bloques de cada iteración del Algoritmo Genético con Simulink

Los resultados experimentales se muestran en las Tablas 8.2 y 8.3. Los resultados obtenidos son satisfactorios para el problema bajo estudio. En la Tabla 8.2 se observa que el valor promedio de aptitud es muy cercano al valor de aptitud de la mejor corrida para cada tipo de cruzamiento. En particular, el cruzamiento Heurístico alcanza el menor valor de aptitud, mientras que el cruzamiento Scattered exhibe el mejor valor de aptitud promedio. En la Tabla 8.3 se muestran los parámetros de los controladores obtenidos para cada tipo de cruzamiento. En el Anexo D (Tablas D.1 a D.6) se pueden observar los parámetros obtenidos con cada cruzamiento para 30 corridas.

Cruzamiento	Tabla	Aptitud	Tiempo (s)	Iteraciones	Aptitud Promedio	Tiempo Promedio (s)	Mediana
<i>Scattered</i>	D.1	2.059	238	81	2.252	196	2.187
<i>Dos Puntos</i>	D.2	2.029	239	78	2.373	180	2.234
<i>Simple Punto</i>	D.3	2.027	234	77	2.435	172	2.232
<i>Intermedio</i>	D.4	2.160	267	79	2.431	294	2.520
<i>Heurístico</i>	D.5	2.008	357	91	2.396	204	2.354
<i>Aritmético</i>	D.6	2.154	316	88	2.512	273	2.532

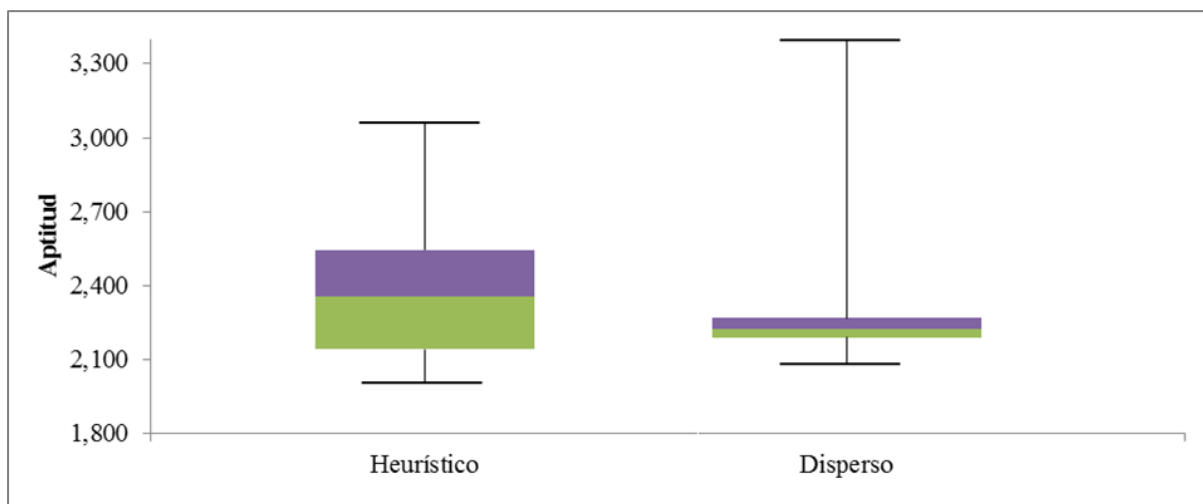
Tabla 8.2: Resultados obtenidos para cada cruzamiento

Cruzamiento	PID			PI		C <sub>Ant1</sub>			C <sub>Ant2</sub>		
	$k_p$	$k_i$	$k_d$	$k_p$	$k_i$	$k_{Ant}$	$\tau_1$	$\tau_2$	$k_{Ant}$	$\tau_1$	$\tau_2$
<i>Scattered</i>	27.75	30.99	1.55	3.61	22.62	5.25	10.37	11.63	16.01	0.02	0.79
<i>Dos Puntos</i>	41.53	52.70	0.97	22.32	13.21	16.96	7.17	6.86	5.04	15.79	17.64
<i>Simple Punto</i>	45.96	55.28	1.21	49.89	8.58	12.53	12.33	12.29	0.54	3.84	5.03
<i>Intermedio</i>	30.81	28.03	1.38	7.97	12.16	6.87	2.26	5.46	5.37	8.09	7.92
<i>Heurístico</i>	56.25	51.31	0.78	12.14	26.82	21.60	10.23	25.44	0.12	32.28	10.89
<i>Aritmético</i>	29.33	29.44	1.41	13.50	7.74	11.37	6.41	9.00	8.75	8.84	8.55

Tabla 8.3: Parámetros de los controladores obtenidos para cada cruzamiento

El rendimiento puede ser evaluado por medio de la Figura 8.8, que muestra los diagramas de caja asociados con los siguientes métodos de cruzamiento: H = heurístico; D = Scattered. En comparación con todos los métodos probados de cruzamiento, sus rangos intercuartil ( $IQRH = 0,404$ ;  $IQRD = 0.073$ ) revelan la variabilidad aceptable en ejecuciones. En el Anexo D se muestran los diagramas de caja del resto de los cruzamientos (Figuras D.1,

D.2, D.3 y D.4). Por otra parte, el cruzamiento Scattered exhibe una dispersión de datos inferior alrededor de la mediana, que se presenta en la Tabla 8.2.



**Figura 8.8:** Diagrama de caja vertical para los cruzamientos Heurístico y Scattered

Una vez identificados los cruzamientos más convenientes, se trabajó en mejorar los tiempos de cómputo. Optimizar estos tiempos es importante para este diseño ya que la velocidad de cálculo es un factor clave. Por lo tanto, se introdujeron mejoras a través de la paralelización. La técnica adoptada consiste en el uso de múltiples procesadores para evaluar varios individuos al mismo tiempo con el objetivo de acelerar los cálculos. En la Figura 8.9 se observa cómo la herramienta de Algoritmos Genéticos de MATLAB® puede distribuir automáticamente la evaluación de la función de aptitud asociada a una población en varios procesadores.

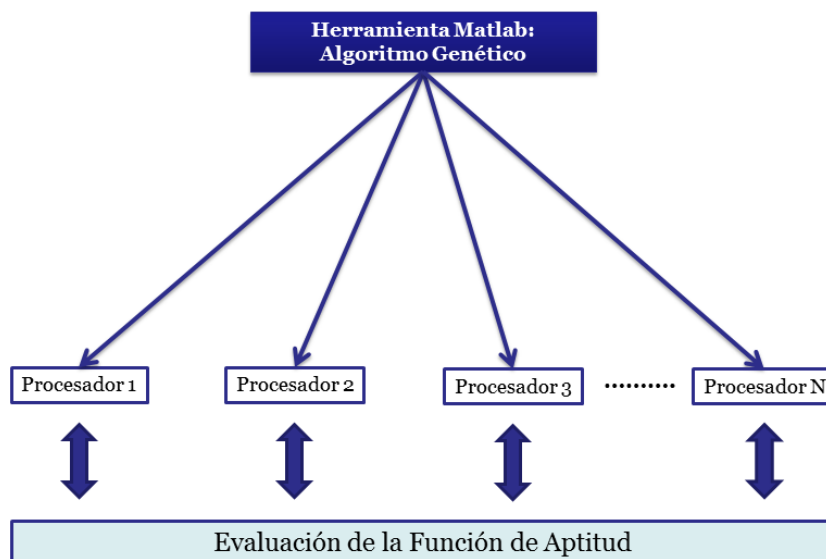


Figura 8.9: Diagrama de Algoritmo Genético Paralelo

El desempeño de las técnicas paralelas suele evaluarse con métricas especiales como el Speed-up y la Eficiencia. El Speed-up es la razón entre el tiempo promedio de ejecución de la versión secuencial y paralela del mismo algoritmo. La eficiencia computacional es el cociente entre el Speed-up y la cantidad de procesadores utilizados. Un valor de eficiencia cercano a uno significa que todos los procesadores están siendo completamente utilizados durante todo el periodo de ejecución y logran mejores resultados que funcionando por separado (Alba, 2005).

Se realizaron experimentos para analizar la eficiencia y el Speed-up. El objetivo de estas pruebas es evaluar el desempeño del Algoritmo Genético paralelo para este tipo de problemas. Este estudio nos permite comparar los resultados con los obtenidos con programación secuencial, con el fin de emplear este algoritmo para control on-line, lo cual requiere agilidad de cálculo.

En la Tabla 8.4 se observa que el Algoritmo Genético paralelo obtuvo una buena eficiencia en sus corridas con 8 procesadores en ambos cruzamientos. Si se analiza la comparación entre los tiempos de cómputo indicados en la Tabla 8.2 con la los mostrados en

la Tabla 8.4, se puede observar que se logró una reducción del tiempo de 3,4 minutos a 30 segundos. El Algoritmo Genético paralelo demostró ser exitoso para el diseño del controlador propuesto, ya que permite una convergencia rápida al reducir iteraciones y tiempos de ejecución.

Cruzamiento	Aptitud	Iteraciones	Aptitud Promedio	Tiempo Promedio Secuencial (s)	Tiempo Promedio Paralelo (s)	Speed-up	Eficiencia (%)
<i>Heurístico</i>	2.019	65	2.382	204	37	5.51	68.91
<i>Scattered</i>	2.023	74	2.231	196	34	5.76	72.05

**Tabla 8.4:** Resultados obtenidos del Algoritmo Genético paralelo

En la Tabla 8.5 se muestran los parámetros del control Realimentado-Anticipativo integrado obtenidos mediante el Algoritmo Genético paralelo para los cruzamientos Heurístico y Scattered. En las Tablas D.7 y D.8 se reportan las 30 corridas realizadas para ambos cruzamientos.

Sistema	Cruzamientos	PID			PI		C <sub>Ant1</sub>			C <sub>Ant2</sub>		
		$k_p$	$k_i$	$k_d$	$k_p$	$k_i$	$k_{Ant}$	$\tau_1$	$\tau_2$	$k_{Ant}$	$\tau_1$	$\tau_2$
A	<i>Heurístico</i>	43.98	78.48	0.65	15.38	23.38	4.00	16.35	4.34	13.51	14.17	34.57
B	<i>Scattered</i>	53.09	48.72	1.27	6.56	57.82	3.73	31.75	33.36	0.65	0.47	3.33

**Tabla 8.5:** Parámetros de los controladores obtenidos para cada cruzamiento

Las Figuras 8.10 y 8.11 muestran las respuestas de cada variable controlada del sistema MIMO que se obtuvo frente a una perturbación escalón. Las respuestas para cada cruzamiento son muy similares. Por lo tanto, el ajuste de los parámetros del sistema de control Realimentado-Anticipativo integrado mediante el Algoritmo Genético paralelo para cada cruzamiento es satisfactorio.

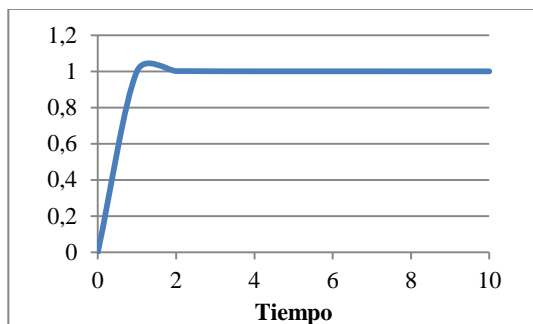


Figura 8.10a: Respuesta del sistema bajo PID y  $C_{Ant1}$

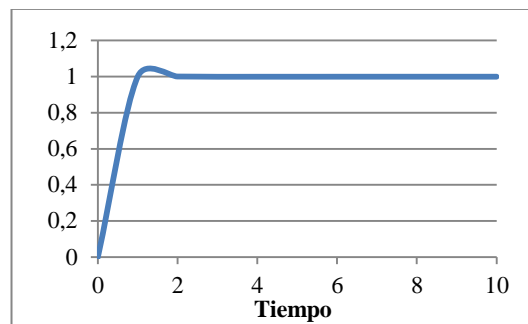


Figura 8.10b: Respuesta del sistema bajo PI y  $C_{Ant2}$

Figura 8.10: Respuestas a una perturbación escalón para cruzamiento Heurístico

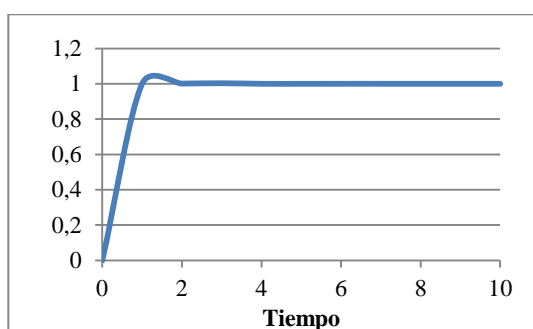


Figura 8.11a: Respuesta del sistema bajo PID y  $C_{Ant1}$

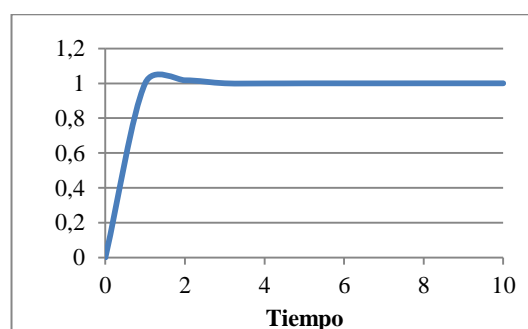


Figura 8.11b: Respuesta del sistema bajo PI y  $C_{Ant2}$

Figura 8.11: Respuestas a una perturbación escalón para cruzamiento Scattered

### 8.5 Conclusiones

Se optimizaron los parámetros de un control Realimentado-Anticipativo integrado de un sistema MIMO correspondiente a un tanque de almacenamiento donde se almacena temporalmente la producción de gasolina natural proveniente de yacimientos gasíferos. El análisis se centra en las técnicas de Algoritmos Genéticos con una variedad de alternativas de cruzamiento. El mejor rendimiento se evidenció por el cruzamiento Heurístico, mientras que el Scattered también refleja un comportamiento de buena calidad. Mediante el uso de procesamiento paralelo, se observa una significativa aceleración en los tiempos de cómputo. Los resultados también mostraron la eficacia del enfoque propuesto como un procedimiento de autoajuste que podría ser empleado para control en línea o adaptivo.

En base al análisis de los resultados (Figuras 8.10 y 8.11) se observa que los sistemas

responden satisfactoriamente frente a una perturbación escalón en los caudales de entrada. Por lo tanto, el sistema de control Realimentado-Anticipativo integrado propuesto garantiza el suministro de gasolina natural al tanque de almacenamiento y a la planta de procesamiento. En el Capítulo 7 no se había modelado la interacción y solamente se tuvo en cuenta garantizar el suministro a la planta.

Los resultados reportados en este capítulo dieron origen a dos trabajos publicados en los siguientes congresos: 1. First Pan American Congress on Computational Mechanics. (Oteiza *et al.*, 2015b); 2. Congreso Nacional RITeQ 2014 (Oteiza *et al.*, 2014).





# CAPÍTULO 9

## CONCLUSIONES

---

### *Contenido del Capítulo*

En este capítulo se establecen las conclusiones derivadas del trabajo realizado y un resumen de las publicaciones generadas a partir de las investigaciones realizadas. Además, se presenta un listado de actividades que podrían ser realizadas en una etapa posterior a la presentación de la tesis.



## 9.1 Conclusiones

En esta tesis se propuso como objetivo global generar conocimiento sobre técnicas de trazado óptimo de redes de cañerías. El desarrollo de este conocimiento se llevó a cabo con un enfoque orientado al área de Computación Científica. Esto implica el tratamiento riguroso desde dos puntos de vista: ingenieril y computacional. En este contexto, se analizó la logística y el diseño óptimo de líneas de transporte.

Con respecto al desarrollo de software, se implementaron técnicas metaheurísticas. Este es un enfoque moderno en la línea de optimización, novedoso para nuestra aplicación, el cual permite un tratamiento relativamente simple del problema. A partir de los resultados obtenidos en esta tesis, podemos afirmar que estas técnicas metaheurísticas son exitosas pues brindan resultados realistas y muy cercanos al óptimo. Aplicando criterios computacionales, pudimos observar que los algoritmos llegan a buenos resultados con tiempos de cómputo relativamente cortos.

Por otra parte, desde el punto de vista ingenieril, pudimos constatar que los algoritmos implementados con adaptación a los problemas del tipo tratado en esta tesis generan resultados satisfactorios. Demostraron ser robustos ya que escapan de los óptimos locales y encuentran buenas soluciones cercanas a la óptima. Además, es posible adaptarlos a problemas de mayor magnitud, ante la necesidad de emplearlos para el estudio de explotación y transporte de hidrocarburos provenientes de fuentes de energía latentes.

A continuación se enuncian las principales conclusiones que surgen del trabajo realizado en esta tesis:

✓ La gasolina natural se puede utilizar como materia prima para la obtención de etileno-propileno por craqueo térmico, a partir del cual, se obtienen polietileno y polipropileno. Mediante un análisis técnico-económico de pre-factibilidad, se corroboró que

---

la gasolina natural constituye un sustituto atractivo para la producción de etileno en Argentina, justificando así la evaluación detallada de tal proyecto.

✓ Se desarrolló un modelo general bien representativo del problema de logística de redes de transporte de yacimientos ubicados en la provincia de Santa Cruz (Argentina). Se adoptó un enfoque estratégico basado en la hibridación de un algoritmo metaheurístico llamado Simulated Annealing con el paquete de software GAMS; de esta forma se obtuvo el algoritmo híbrido denominado SAG.

✓ En base a los resultados obtenidos mediante SAG, la mejor alternativa para la red de cañerías para el transporte de gasolina natural proveniente de yacimientos existentes en la provincia es la obtenida en el Caso I del Ejemplo 1 (Capítulo 5). Cabe puntualizar que se consideraron 21 yacimientos distribuidos en las zonas norte y sur de la provincia de Santa Cruz separadas por una distancia de aproximadamente 650 kilómetros. La solución del problema permitió determinar el menor costo de instalación y la menor distancia total de cañerías considerando dos nodos concentradores:  $N_6$  y  $N_{24}$ . Por otra parte, cuando consideramos un yacimiento potencial ( $S_{22}$ ), pudimos encontrar la mejor distribución de la red con otro par de nodos concentradores:  $N_5$  y  $N_{24}$ . Considerando ambos ejemplos, se observa que el diseño de la red depende de los futuros desarrollos de la industria petrolera. Por ende, las decisiones deben tomarse de acuerdo a la planificación estratégica. En ambos casos, se concluye que la eventual planta de procesamiento debería instalarse en Río Gallegos.

✓ En cuanto al análisis del desempeño de SAG se pudo comprobar que el optimizador es eficiente ya que requiere tiempos de cálculo relativamente cortos.

✓ También se realizó el análisis y comparación del desempeño de los algoritmos Simulated Annealing y Algoritmos Genéticos, en el diseño óptimo de una red de cañerías. Se

---

planteó un modelo económico de optimización detallado de la red y se desarrolló una estrategia computacional para la localización de los nodos concentradores. Los algoritmos brindaron buenas soluciones con excelentes tiempos de cómputo. Estos resultados pueden adoptarse con confianza por ser más exhaustivo el modelo económico empleado. Por ende, se recomienda la red diseñada en el Capítulo 6.

✓ La distribución de la red obtenida (Capítulo 6) utiliza el par de nodos  $N_6-N_{26}$ , a diferencia de la solución encontrada por SAG (Capítulo 5) la cual elige el par de nodos  $N_6-N_{24}$ . Cabe destacar que esta diferencia surge debido a que en la función objetivo se consideró una mayor cantidad de términos para modelar ingresos, costos fijos y operativos. Además, la mejora también involucró la adopción de parámetros económicos con respecto a la vida útil del proyecto.

✓ Los algoritmos empleados en el Capítulo 6 se programaron de forma tal que la misma metaheurística localiza los nodos concentradores y evalúa la función objetivo a diferencia de SAG, en el cual se debe invocar a GAMS para evaluar la función objetivo.

✓ Los modelos matemáticos presentados en esta tesis fueron planteados por el método de agregación, para poder mejorar la función objetivo gradualmente y detectar así los cambios. No obstante, el modelo podría ser mejorado aún más teniendo en cuenta asimismo otras consideraciones tales como decisiones políticas, regulaciones ambientales, incertidumbres, derechos de paso a través de la propiedad privada, etc. Esto implica un modelamiento especial de la función objetivo, pues todos los eventos deben traducirse a costos.

✓ Por otra parte, se analizó la respuesta dinámica de la producción de los yacimientos. En base a este estudio, se realizó el diseño de un sistema de control óptimo del

---

volumen de gasolina natural en el nodo concentrador mediante algoritmos genéticos. Se compararon los resultados con técnicas clásicas tales como Ziegler-Nichols, demostrando un buen desempeño de los Algoritmos Genéticos en el diseño de sistemas de control SISO. Luego, se consideraron las interacciones entre los sistemas ya que el sistema a controlar es un sistema MIMO que cuenta con tres variables manipuladas y dos variables a controlar. Se optimizaron nuevamente los parámetros del sistema de control y se realizaron corridas con diferentes tipos de cruzamiento para evaluar el desempeño del algoritmo genético. Se seleccionaron dos tipos de cruzamientos: Heurístico y Scattered. Con ambos cruzamientos el algoritmo genético obtuvo los mejores valores de la función de aptitud para el diseño del sistema de control. Además, el sistema de control respondió favorablemente frente a perturbaciones escalón en los caudales de entrada.

✓ Con los resultados obtenidos mediante Algoritmos Genéticos, la incorporación de un sistema de control Realimentado-Anticipativo integrado garantiza el suministro al nodo concentrador y a la planta de procesamiento.

✓ Se introdujo una estrategia paralela preliminar para mejorar los tiempos de cómputo. Se obtuvieron reducciones considerables de los tiempos computacionales comparados con los tiempos obtenidos en forma secuencial.

✓ El Algoritmo Genético y su paralelización se efectuaron mediante MATLAB® El diseño del sistema de control MIMO, se realizó con un enfoque experimental para evaluar el desempeño de los algoritmos genéticos y su paralelización. Sobre esta base se proyecta realizar la programación de un algoritmo genético adecuado y aplicable a sistemas de control en línea o adaptivo.

## 9.2 Principales Contribuciones

Los resultados obtenidos en esta tesis dieron origen a las siguientes publicaciones:

### *Trabajo Publicado en Revista Internacional*

1. Rodríguez, D.A.; **Oteiza, P.P.**; Brignole, N.B. *Simulated-Annealing Optimization for Hydrocarbon Pipeline Networks*, **Industrial & Engineering Chemistry Research**, ISSN (printed): 0888-5885, ISSN (electronic): 1520-5045, 52 (25), 8579–8588, **2013**.

### *Trabajos Publicados como Capítulos de Libros*

2. **Oteiza P.P.**; De Meio M.C.; Rodríguez D.A.; Viego V.; Brignole N.B. *Metaheuristic Techniques for the Optimal Design of NGL Pipelining*. En: Krist V. Gernaey, Jakob K. Huusom & Rafiqul Gani editors. **Computer Aided Chemical Engineering: 12th International Symposium on Process Systems Engineering and 25th European Symposium on Computer Aided Process Engineering**. ISBN: 978-0-444-63429-0, 37, Elsevier, Amsterdam, 785-790, **2015**.
3. **Oteiza, P.P.**; Rodríguez, D.A.; Brignole, N.B. *Parallel Genetic Algorithms for the Design of MIMO Control Systems*. En: Idelsohn, S.R., Sonzogni, V., Coutinho, A., Cruchaga, M., Lew, A & M. Cerrolaza, M. editors. **First Pan American Congress on Computational Mechanics**, ISBN: 978-84-943928-2-5, Artes Gráficas Torres, Spain, 1380-1386, **2015**.

### *Trabajos Publicados en Revistas Nacionales*

4. Cañete, B.; **Oteiza, P.P.**; Gigola, C.E.; Brignole, N.B. *GASOLINA NATURAL: Un sustituto atractivo para la producción de etileno en Argentina*, **Revista Petroquímica, Petróleo, Gas & Química**. Resumen completo en la sección: Trabajo Científico Técnico, N° 283, 206-210, Noviembre **2012**. Artículo completo en versión electrónica extendida: (25 pp.). Disponible en <http://revistapetroquimica.com/gasolina-natural-un-sustituto-atractivo-para-la-produccion-de-etileno-en-argentina/> desde 4 de Febrero **2013**.

5. **Oteiza, P.P.**; Rodriguez, D.A.; Brignole, N.B. *Sistema de Control para el Almacenamiento Intermedio de Gasolina Natural. Mecánica Computacional* Vol. XXXII N° 30. Industrial Applications. ISSN 1666-6070, AMCA, 2503-2516, **2013**.

#### ***Trabajos Publicados en Congresos Nacionales ó Latinoamericanos***

6. **Oteiza, P.P.**; Rodriguez, D.A.; Gígola, C.E.; Brignole, N.B. *Diseño De Un Sistema De Control Multivariable Mediante Algoritmos Genéticos*, III Reunión Interdisciplinaria de Tecnología y Procesos Químicos **RITeQ 2014**, Los Cocos, Córdoba, Argentina, Abril **2014**.

7. **Oteiza P.P.**; Gigola C.E.; Brignole N.B. *Modelo De Transporte De Los Líquidos Del Gas Natural*, **Congreso de Producción del Bicentenario**. Organizado por el Instituto Argentino del Petróleo y del Gas (IAPG). Publicado en CD-ROM (12 pág.), Salta, Argentina, Mayo **2010**.

8. **Oteiza P.P.**; Gigola C.E.; Brignole N.B. “Modelo de Transporte de los Líquidos del GN Mediante Grafos”, Resumen aceptado en 9° Congreso Interamericano De Computación Aplicada A La Industria De Procesos **CAIP 2009**. Organizado por Centro de Información Tecnológica (CIT) de La Serena, Montevideo, Uruguay, 25-28/8/**2009**.

### ***9.3 Trabajos Futuros***

En base al trabajo efectuado y a las necesidades industriales, se vislumbran interesantes perspectivas para continuar las investigaciones realizadas en esta tesis. En líneas generales, para el campo de gas y petróleo se han identificado las siguientes oportunidades de investigación futura:

❖ A medida que los yacimientos petrolíferos envejecen y los precios del combustible varían, los modelos económicos y de transporte se tornan cada vez más importantes. Por ende, más detalles deben incorporarse para el análisis.



❖ Es conveniente explorar otros dominios de aplicación. Por ejemplo, podrían hacerse contribuciones sustanciales en el área de simulación y optimización rigurosa de yacimientos off-shore, enriqueciendo las funciones objetivo correspondientes.

❖ Con relación a los aspectos técnicos y económicos, es vital mejorar los resultados de optimización para poder acomodarse a los requerimientos industriales, especialmente para escenarios caracterizados por economías inestables. A menudo es necesario modelar esta realidad dados los casos donde se localizan yacimientos aún no explotados. En estos problemas se debe contemplar también las incertidumbres.

❖ Con respecto al diseño computacional, se podría incorporar paralelismo en la programación empleando metaheurísticas tal como Simulated Annealing con el objeto de generar algoritmos multi-hilo más rigurosos y eficientes.

❖ Con relación al manejo de la información geográfica, se proyecta desarrollar un módulo geográfico que esté vinculado al optimizador para contribuir con información sobre la calidad de cada camino propuesto. La incorporación de este módulo está prevista en el diagrama de flujo del optimizador (Figura 5.1).

En particular, en esta tesis se desarrolló un sistema de control mediante Algoritmos Genéticos. En base a los resultados obtenidos, es posible enunciar las siguientes propuestas para continuar con las investigaciones realizadas sobre el diseño de un sistema de control adecuado:

❖ En cuanto a la función de aptitud planteada para el diseño del sistema de control, hasta el momento solamente se contempló el error del sistema. Sería interesante incorporar otros términos que contemplen además, por ejemplo, la interacción del sistema ante cambios de sus parámetros que provoquen variaciones en las ganancias del sistema. Por ende, la acción de control debería cambiar ante esa circunstancia.

❖ El diseño del sistema de control se efectuó mediante las herramientas de Algoritmos Genéticos provistas por MATLAB<sup>®</sup>. Además, hemos realizado una evaluación del desempeño de los Algoritmos Genéticos en este problema de control. A partir de los buenos resultados obtenidos, se propone implementar un Algoritmo Genético especialmente dedicado en el cual se programe los parámetros del algoritmo (por ejemplo, cruzamiento y mutación) apropiados para el diseño de controladores. Es factible también utilizar los resultados satisfactorios obtenidos en esta tesis como una buena inicialización del algoritmo que refleje la realidad.

❖ Con respecto a algoritmos paralelos, se trabajó con MATLAB<sup>®</sup> con el objeto de llevar a cabo experimentos previos mediante un caso representativo. De este modo, fue posible realizar una valorización del paralelismo y evaluar su desempeño con respecto a tiempos de cómputo. Dada la eficiencia demostrada para esta aplicación, se recomienda desarrollar detalladamente este enfoque. Esto implica continuar en base al trabajo descrito en el ítem anterior. A partir de dicho diseño, se podría programar un Algoritmo Genético paralelo adecuado e implementarlo para resolver otros problemas que requieran agilidad de cálculo, tal como control en línea o adaptivo.

# ANEXO A

## DISTANCIAS ENTRE YACIMIENTOS Y PLANTAS

**Tabla A.1:** Distancias obtenida en gvSIG® [Km]

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19	S20	S21	P1	P2
S1	0,00	37,47	136,29	175,10	140,40	123,17	156,45	126,25	162,39	172,22	194,41	190,94	577,04	587,43	586,18	598,93	590,91	592,86	645,17	643,37	590,61	27,71	212,50
S2	37,47	0,00	173,55	212,26	169,00	141,70	182,89	142,33	189,27	196,92	218,16	212,95	570,93	580,16	582,89	591,36	586,27	594,65	640,58	642,67	585,42	37,20	204,72
S3	136,29	173,55	0,00	38,97	90,58	131,97	108,92	141,81	109,33	126,19	144,64	150,83	603,08	617,20	601,97	629,41	611,34	590,22	663,81	648,18	612,99	146,16	272,01
S4	175,10	212,26	38,97	0,00	105,16	154,98	119,36	164,95	117,52	133,59	147,64	156,49	612,19	627,21	608,23	639,52	618,81	591,35	670,35	650,93	620,99	183,89	295,58
S5	140,40	169,00	90,58	105,16	0,00	54,58	20,32	63,92	23,97	39,01	60,97	63,49	512,51	526,70	511,58	538,93	520,80	501,64	573,36	558,77	522,42	132,22	192,03
S6	123,17	141,70	131,97	154,98	54,58	0,00	54,51	9,98	61,13	61,13	79,25	72,12	479,23	492,08	482,38	504,12	489,78	480,28	543,31	534,35	490,63	105,26	140,79
S7	156,45	182,89	108,92	119,36	20,32	54,51	0,00	62,09	6,81	18,69	40,91	43,26	494,86	509,35	493,10	521,61	502,65	482,05	554,98	539,51	504,43	145,75	183,34
S8	126,25	142,33	141,81	164,95	63,92	9,98	62,09	0,00	68,50	66,50	82,78	74,40	470,85	483,52	474,55	495,53	481,69	473,59	535,33	527,17	482,44	106,61	130,82
S9	162,39	189,27	109,33	117,52	23,97	61,13	6,81	68,50	0,00	16,86	37,35	41,59	495,56	510,24	493,18	522,53	503,00	481,02	555,13	538,85	504,89	152,16	188,03
S10	172,22	196,92	126,19	133,59	39,01	61,13	18,69	66,50	16,86	0,00	22,70	24,83	479,02	493,80	476,40	506,10	486,30	464,19	538,38	521,99	488,24	159,73	177,43
S11	194,41	218,16	144,64	147,64	60,97	79,25	40,91	82,78	37,35	22,70	0,00	12,76	464,87	480,19	460,62	492,53	471,19	445,85	522,73	504,43	473,43	181,03	179,72
S12	190,94	212,95	150,83	156,49	63,49	72,12	43,26	74,40	41,59	24,83	12,76	0,00	455,71	470,76	452,37	483,08	462,55	439,44	514,41	497,39	464,62	176,02	166,98
S13	577,04	570,93	603,08	612,19	512,51	479,23	494,86	470,85	495,56	479,02	464,87	455,71	0,00	20,70	45,24	31,46	27,28	124,85	73,29	111,88	20,12	549,87	366,23
S14	587,43	580,16	617,20	627,21	526,70	492,08	509,35	483,52	510,24	493,80	480,19	470,76	20,70	0,00	62,75	12,37	41,95	143,08	73,93	123,18	33,25	560,10	375,74
S15	586,18	582,89	601,97	608,23	511,58	482,38	493,10	474,55	493,18	476,40	460,62	452,37	45,24	62,75	0,00	69,07	21,70	80,34	62,18	72,21	30,19	559,52	378,84
S16	598,93	591,36	629,41	639,52	538,93	504,12	521,61	495,53	522,53	506,10	492,53	483,08	31,46	12,37	69,07	0,00	47,46	149,03	69,12	123,81	38,88	571,57	387,07
S17	590,91	586,27	611,34	618,81	520,80	489,78	502,65	481,69	503,00	486,30	471,19	462,55	27,28	41,95	21,70	47,46	0,00	101,64	54,32	84,64	8,73	563,99	381,68
S18	592,86	594,65	590,22	591,35	501,64	480,28	482,05	473,59	481,02	464,19	445,85	439,44	124,85	143,08	80,34	149,03	101,64	0,00	116,14	64,18	110,33	567,51	396,10
S19	645,17	640,58	663,81	670,35	573,36	543,31	554,98	535,33	555,13	538,38	522,73	514,41	73,29	73,93	62,18	69,12	54,32	116,14	0,00	66,83	55,78	618,27	435,97
S20	643,37	642,67	648,18	650,93	558,77	534,35	539,51	527,17	538,85	521,99	504,43	497,39	111,88	123,18	72,21	123,81	84,64	64,18	66,83	0,00	92,11	617,33	440,52
S21	590,61	585,42	612,99	620,99	522,42	490,63	504,43	482,44	504,89	488,24	473,43	464,62	20,12	33,25	30,19	38,88	8,73	110,33	55,78	92,11	0,00	563,59	380,73
P1	27,71	37,20	146,16	183,89	132,22	105,26	145,75	106,61	152,16	159,73	181,03	176,02	549,87	560,10	559,52	571,57	563,99	567,51	618,27	617,33	563,59	0,00	184,93
P2	212,50	204,72	272,01	295,58	192,03	140,79	183,34	130,82	188,03	177,43	179,72	166,98	366,23	375,74	378,84	387,07	381,68	396,10	435,97	440,52	380,73	184,93	0,00

Tabla A.2: Diferencia de alturas entre yacimientos, nodos y plantas obtenida en gvSIG® [m]

	S1	S2	S3	S4	.....	N25	N26	N27	N28	P1	P2
S1	0	0	300	300	.....	600	250	250	450	100	75
S2	0	0	300	300	.....	600	250	250	450	100	75
S3	300	300	0	0	.....	300	50	50	150	400	375
S4	300	300	0	0	.....	300	50	50	150	400	375
S5	300	300	0	0	.....	300	50	50	150	400	375
S6	300	300	0	0	.....	300	50	50	150	400	375
S7	300	300	0	0	.....	300	50	50	150	400	375
S8	300	300	0	0	.....	300	50	50	150	400	375
S9	300	300	0	0	.....	300	50	50	150	400	375
.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
S19	250	250	50	50	.....	350	0	0	200	350	325
S20	250	250	50	50	.....	350	0	0	200	350	325
S21	250	250	50	50	.....	350	0	0	200	350	325
N1	0	0	300	300	.....	600	250	250	450	100	75
N2	0	0	300	300	.....	600	250	250	450	100	75
N3	0	0	300	300	.....	600	250	250	450	100	75
.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
N20	300	300	0	0	.....	300	50	50	150	400	375
N21	350	350	50	50	.....	250	100	100	100	450	425
N22	1950	1950	1650	1650	.....	1350	1700	1700	1500	2050	2025
N23	1650	1650	1350	1350	.....	1050	1400	1400	1200	1750	1725
N24	0	0	300	300	.....	600	250	250	450	100	75
N25	600	600	300	300	.....	0	350	350	150	700	675
N26	250	250	50	50	.....	350	0	0	200	350	325
N27	250	250	50	50	.....	350	0	0	200	350	325
N28	450	450	150	150	.....	150	200	200	0	550	525
P1	100	100	400	400	.....	700	350	350	550	0	25
P2	75	75	375	375	.....	675	325	325	525	25	0

Más detalles en: <http://lidecc.cs.uns.edu.ar/index.php/sw/datos>

## ANEXO B

### TABLAS DE DISTANCIAS Y COSTOS

**Tabla B.1:** Distancias obtenida en gvSIG® [Km]

	S1	S2	S3	S4	.....	N25	N26	N27	N28	P1	P2
S1	0,00	37,47	136,29	175,10	.....	541,65	548,68	540,33	652,47	27,71	212,50
S2	37,47	0,00	173,55	212,26	.....	545,96	542,53	539,40	656,05	37,20	204,72
S3	136,29	173,55	0,00	38,97	.....	531,70	575,83	549,43	641,46	146,16	272,01
S4	175,10	212,26	38,97	0,00	.....	531,35	585,50	554,34	639,71	183,89	295,58
S5	140,40	169,00	90,58	105,16	.....	444,13	485,29	459,38	554,56	132,22	192,03
S6	123,17	141,70	131,97	154,98	.....	425,94	451,40	432,70	537,06	105,26	140,80
S7	156,45	182,89	108,92	119,36	.....	424,27	467,81	440,52	534,59	145,75	183,34
S8	126,25	142,33	141,81	164,95	.....	419,80	442,95	425,26	530,92	106,61	130,82
S9	162,39	189,27	109,33	117,52	.....	422,87	468,64	440,28	533,00	152,16	188,03
.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
S19	645,17	640,58	663,81	670,35	.....	171,87	100,45	118,06	141,85	618,27	435,97
S20	643,37	642,67	648,18	650,93	.....	127,00	130,24	103,27	75,05	617,33	440,52
S21	590,61	585,42	612,99	620,99	.....	150,05	44,88	80,26	159,62	563,59	380,73
N1	113,54	150,70	39,96	73,60	.....	560,64	596,71	574,41	671,07	129,89	280,59
N2	46,52	82,70	97,14	135,91	.....	555,91	574,38	560,57	667,03	68,36	243,44
N3	29,91	20,65	163,59	202,55	.....	560,57	560,57	555,87	670,99	44,51	222,80
.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
N20	439,60	432,16	476,01	489,36	.....	187,18	111,14	134,25	269,27	412,21	227,71
N21	429,35	428,30	444,34	452,37	.....	134,25	134,25	111,14	234,90	403,12	227,19
N22	572,53	586,41	525,36	513,90	.....	152,10	304,12	228,12	189,52	552,35	422,63
N23	552,56	561,88	523,52	517,62	.....	76,04	228,08	152,07	135,06	530,05	382,26
N24	566,26	555,20	609,78	623,61	.....	228,08	76,04	152,06	255,61	538,59	353,96
N25	541,65	545,96	531,70	531,35	.....	0,00	152,05	76,03	111,12	517,10	352,91
N26	548,68	542,53	575,83	585,50	.....	152,05	0,00	76,03	189,46	521,50	337,84
N27	540,33	539,40	549,43	554,35	.....	76,03	76,03	0,00	135,04	514,19	337,47
N28	652,47	656,05	641,46	639,71	.....	111,12	189,46	135,04	0,00	627,71	460,12
P1	27,71	37,20	146,16	183,89	.....	517,10	521,49	514,19	627,71	0,00	184,93
P2	212,50	204,72	272,01	295,58	.....	352,91	337,83	337,47	460,12	184,93	0,00

Más detalles en: <http://lidecc.cs.uns.edu.ar/index.php/sw/datos>

Tabla B.2: Costos de construcción de cada camino  $e_{ij}$  [US\$/t]

	S1	S2	S3	S4	.....	N25	N26	N27	N28	P1	P2
S1	0,00	27,16	98,81	126,96	.....	446,27	452,06	445,18	537,57	200,92	1680,80
S2	271,64	0,00	125,83	153,90	.....	449,82	447,00	444,41	540,52	269,69	1551,75
S3	98,81	125,83	0,00	28,25	.....	438,07	474,43	452,68	528,50	1059,72	2061,84
S4	126,96	153,90	28,25	0,00	.....	437,78	482,40	456,73	527,06	1333,30	2240,51
S5	101,80	122,53	65,68	76,24	.....	365,92	399,83	378,48	456,90	958,66	1455,55
S6	89,30	102,74	95,68	112,37	.....	350,93	371,91	356,50	442,49	763,18	1067,22
S7	113,43	132,60	78,97	86,54	.....	349,56	385,43	362,94	440,45	1056,71	1389,73
S8	91,53	103,19	102,82	119,59	.....	345,88	364,95	350,37	437,43	772,98	991,60
S9	117,74	137,23	79,27	85,21	.....	348,41	386,11	362,75	439,14	1103,20	1425,28
.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
S19	552,82	548,89	568,79	574,40	.....	135,94	79,45	93,38	112,20	5297,72	3304,64
S20	551,28	550,68	555,40	557,76	.....	100,45	103,02	81,68	59,36	5289,68	3339,11
S21	506,07	501,63	525,25	532,11	.....	118,68	35,50	63,48	126,25	482,92	301,14
N1	89,80	119,20	31,61	58,22	.....	424,96	452,30	435,40	508,66	2097,51	4623,58
N2	36,79	65,41	76,83	107,50	.....	421,38	435,38	424,90	505,61	1081,35	3931,21
N3	23,66	16,34	129,39	160,21	.....	424,91	424,91	421,35	508,60	689,43	3524,43
N4	163,21	190,12	72,15	54,95	.....	354,88	403,38	375,84	435,98	1561,56	2044,05
N5	117,16	141,22	64,40	72,71	.....	341,62	375,80	354,81	425,03	1078,64	1567,54
N6	82,86	98,96	95,71	116,76	.....	337,07	354,79	341,58	421,30	668,62	1146,44
N7	219,21	240,22	154,48	142,68	.....	276,51	337,67	303,50	355,53	2020,25	1889,34
.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
N20	362,19	356,06	392,19	403,19	.....	141,88	84,25	101,76	204,11	3124,52	1726,01
N21	353,74	352,88	366,10	372,71	.....	101,76	101,76	84,24	178,05	3055,59	1722,06
N22	471,71	483,14	432,85	423,41	.....	115,29	230,52	172,91	143,66	4186,77	3203,47
N23	455,26	462,94	431,33	426,47	.....	57,64	172,89	115,27	102,38	4017,76	2897,49
N24	466,54	457,43	502,40	513,79	.....	172,88	57,64	115,26	193,75	4082,51	2682,98
N25	446,27	449,82	438,07	437,78	.....	0,00	115,25	57,63	84,23	3919,57	2675,06
N26	452,06	447,00	474,43	482,40	.....	115,25	0,00	57,63	143,61	3952,92	2560,79
N27	445,18	444,41	452,68	456,73	.....	57,63	57,63	0,00	102,36	3897,55	2558,02
N28	537,57	540,52	528,50	527,06	.....	84,23	143,61	102,36	0,00	4758,03	3487,66
P1	2009204,00	2696880,93	10597150,29	13333008,82	.....	39195765,60	39528874,87	38975315,15	47580269,01	0,00	14017542,33
P2	16107680,25	15517452,79	20618425,73	22405065,07	.....	26750667,71	25607451,66	25579899,55	34876597,93	14017542,33	0,00

Más detalles en: <http://lidecc.cs.uns.edu.ar/index.php/sw/datos>

## ANEXO C

### PARÁMETROS DE LOS CONTROLADORES

**Tabla C.1:** *Parámetros de los controladores para cada corrida*

Corridas	PID			PI		Aptitud	Iteraciones
	$K_p$	$K_i$	$K_d$	$K_p$	$K_i$		
1	4,900	11,860	0,293	5,025	0,520	8,85E <sup>-05</sup>	51
2	9,102	9,868	1,309	3,512	3,590	2,01E <sup>-05</sup>	51
3	8,515	6,973	0,455	4,248	3,725	1,39E <sup>-05</sup>	51
4	6,113	6,804	0,195	2,554	1,884	7,91E <sup>-05</sup>	51
5	8,622	5,594	0,978	2,730	3,237	7,57E <sup>-05</sup>	53
6	10,178	8,312	2,671	2,292	2,473	1,35E <sup>-05</sup>	52
7	8,649	5,249	0,758	2,048	2,320	7,31E <sup>-05</sup>	51
8	6,705	9,841	1,078	1,906	5,221	1,08E <sup>-05</sup>	51
9	7,941	5,528	0,559	3,406	0,750	6,38E <sup>-05</sup>	51
10	6,429	8,623	1,609	2,722	4,480	3,38E <sup>-05</sup>	51
11	6,283	6,861	0,188	3,319	8,209	4,89E <sup>-05</sup>	57
12	8,527	7,257	1,350	1,203	2,850	2,50E <sup>-04</sup>	54
13	7,413	9,379	1,075	5,697	4,858	1,34E <sup>-05</sup>	51
14	10,284	9,121	1,485	1,040	4,565	6,63E <sup>-06</sup>	51
15	8,355	7,262	2,494	3,153	2,048	1,21E <sup>-05</sup>	51
16	6,374	8,942	1,754	4,855	1,700	1,90E <sup>-05</sup>	51
17	9,749	5,687	2,023	4,619	4,403	1,28E <sup>-05</sup>	51
18	10,216	8,121	1,771	2,376	4,183	3,31E <sup>-07</sup>	51
20	6,574	6,758	0,549	3,982	1,622	4,08E <sup>-06</sup>	51
21	12,170	7,785	0,962	2,139	1,803	1,86E <sup>-05</sup>	51
22	5,819	7,258	0,084	0,950	1,400	6,50E <sup>-05</sup>	51
23	6,355	8,734	1,355	2,499	5,583	1,55E <sup>-05</sup>	51
24	8,024	7,730	2,031	1,392	3,461	2,42E <sup>-05</sup>	51
25	5,665	10,079	0,304	1,648	2,991	1,60E <sup>-05</sup>	51
26	8,891	6,712	0,209	5,928	0,961	3,52E <sup>-05</sup>	51
27	7,214	6,294	0,603	3,381	5,074	1,09E <sup>-05</sup>	51
28	7,782	6,780	1,450	1,869	3,608	3,56E <sup>-05</sup>	51
29	6,938	9,858	1,168	1,824	1,461	2,46E <sup>-05</sup>	51
30	8,722	9,17	0,595	1,523	2,306	4,90E <sup>-05</sup>	51

# ANEXO D

## PARÁMETROS Y DIAGRAMA DE CAJA PARA CADA CRUZAMIENTO

**Tabla D.1:** *Parámetros obtenidos para cruzamiento Scattered (30 corridas)*

Realimentado			Anticipativo								Aptitud	Tiempo (Seg.)	Iteraciones
PID			PI		C <sub>Ant1</sub>			C <sub>Ant2</sub>					
K <sub>p</sub>	K <sub>i</sub>	K <sub>d</sub>	K <sub>p</sub>	K <sub>i</sub>	K <sub>Ant</sub>	$\tau_1$	$\tau_2$	K <sub>Ant</sub>	$\tau_1$	$\tau_2$			
32,761	29,371	1,269	12,924	8,801	2,758	5,505	8,145	13,351	9,448	10,069	2,138	227,62	72
28,973	22,297	2,847	13,345	6,848	4,210	6,103	4,824	24,103	0,996	2,063	2,183	228,09	80
27,062	22,690	3,392	9,623	9,503	0,649	2,606	7,983	20,199	2,809	4,225	2,308	162,35	54
23,122	31,064	2,070	5,975	13,520	21,202	0,744	0,799	20,331	0,214	1,187	2,069	303,62	107
9,664	65,369	1,810	21,438	4,018	11,066	7,072	5,677	17,102	0,102	1,934	2,221	237,29	80
32,077	22,553	1,709	20,291	4,147	7,953	10,942	10,716	19,780	0,124	1,610	2,176	191,92	66
19,287	43,311	1,505	28,681	3,597	1,300	11,497	18,310	9,318	2,854	3,559	2,165	273,96	77
68,234	10,608	2,137	5,078	13,604	22,392	1,218	0,737	15,725	0,061	0,916	2,077	237,16	84
15,356	42,585	2,851	13,562	4,357	3,645	2,802	8,850	14,312	0,086	2,170	2,232	183,06	61
17,423	38,793	2,305	9,382	10,219	0,553	6,001	6,165	13,708	2,767	3,674	2,195	195,93	68
26,887	24,199	2,330	4,201	20,335	0,395	7,833	7,788	2,064	14,646	5,745	2,252	156,34	56
18,844	39,396	1,998	4,593	21,859	0,714	1,862	3,921	15,157	2,341	3,145	2,168	174,53	68
34,224	44,483	1,639	15,885	15,577	5,777	1,585	1,891	35,294	0,613	2,525	2,133	172,80	64
16,847	38,410	2,720	8,987	9,005	1,243	7,039	7,800	10,893	0,364	0,903	2,198	142,66	52
26,579	24,496	2,312	3,169	26,352	2,108	10,540	11,786	5,808	4,032	5,104	2,228	185,34	61
27,564	37,512	1,199	19,767	6,001	0,830	0,505	3,096	13,274	9,939	9,407	2,138	159,29	54
35,212	17,560	3,049	2,525	27,380	51,861	4,788	4,192	21,618	0,322	1,977	2,191	156,68	51
27,749	30,992	1,546	3,610	22,623	5,254	10,370	11,627	16,006	0,024	0,792	2,059	238,37	81
16,324	9,959	7,802	4,583	2,572	3,799	0,217	1,204	1,801	7,788	9,211	3,278	132,88	51
25,558	26,599	2,504	23,615	3,499	0,259	1,280	3,167	19,279	0,808	2,370	2,179	148,79	53
34,660	18,485	2,420	7,756	11,840	0,238	18,634	18,000	7,899	8,722	8,556	2,235	163,48	51
39,359	42,560	1,297	33,833	7,765	7,224	14,283	16,985	0,451	10,585	10,371	2,076	299,10	93
23,970	8,178	4,117	2,245	6,480	11,258	7,455	7,853	6,617	0,021	1,874	2,634	173,71	62
23,786	27,556	2,467	17,645	5,660	0,915	3,509	5,581	26,992	1,510	3,224	2,166	275,80	92
37,128	18,199	2,180	8,732	11,178	0,282	4,695	7,747	10,031	6,575	6,778	2,198	169,36	57
26,170	24,309	2,521	10,936	7,720	2,766	4,424	6,330	2,227	19,169	7,305	2,271	153,94	51
23,687	31,669	1,985	10,184	10,605	3,621	11,566	9,824	18,262	1,943	2,299	2,159	238,33	82
30,338	24,177	1,830	7,992	11,024	0,390	3,803	6,741	5,033	10,242	11,520	2,197	168,07	51
22,997	7,536	5,159	2,810	4,356	2,045	1,341	6,929	5,251	0,483	2,946	2,905	139,46	51
17,449	37,462	2,232	8,480	9,662	4,428	25,357	25,959	22,279	0,223	1,548	2,132	204,63	69



**Tabla D.2:** *Parámetros obtenidos para cruzamiento Dos Puntos (30 corridas)*

Realimentado			Anticipativo								Aptitud	Tiempo (Seg.)	Iteraciones
PID			PI		C <sub>Ant1</sub>			C <sub>Ant2</sub>					
K <sub>p</sub>	K <sub>i</sub>	K <sub>d</sub>	K <sub>p</sub>	K <sub>i</sub>	K <sub>Ant</sub>	τ <sub>1</sub>	τ <sub>2</sub>	K <sub>Ant</sub>	τ <sub>1</sub>	τ <sub>2</sub>			
23,779	26,432	2,432	17,941	4,389	4,925	8,588	8,770	4,679	19,713	32,211	2,268	209,63	64
8,205	20,628	5,895	4,504	2,844	14,177	6,957	7,988	6,592	0,219	2,943	2,856	167,03	59
22,799	30,888	2,119	9,804	8,302	0,965	9,513	9,675	4,956	3,147	3,737	2,243	152,08	51
43,674	14,225	2,392	8,244	9,007	0,550	0,809	5,498	1,321	12,905	30,711	2,280	144,90	51
25,047	28,150	2,212	15,661	6,456	0,681	0,483	1,865	11,888	18,903	18,251	2,209	190,53	60
12,276	11,116	4,683	0,992	9,342	25,789	19,590	18,689	6,712	0,599	3,086	2,967	168,15	57
30,650	21,375	2,295	8,370	10,324	0,634	0,412	3,420	7,179	10,646	13,582	2,225	187,47	62
9,980	19,102	4,290	3,474	4,887	13,634	8,949	9,065	8,581	0,289	2,061	2,667	173,07	64
7,634	25,231	4,616	4,255	3,391	26,190	5,231	5,029	8,408	0,174	3,080	2,782	139,39	51
63,066	30,375	1,202	38,420	6,851	2,402	6,021	8,561	0,644	1,950	38,309	2,059	176,05	61
34,101	18,718	2,358	12,577	6,093	2,056	1,483	4,628	1,690	1,852	2,720	2,270	166,56	59
21,191	27,623	3,542	2,572	30,465	8,896	9,030	9,573	13,878	0,463	1,003	2,297	163,20	59
45,746	15,395	1,865	8,805	9,701	1,718	9,484	11,452	4,334	2,657	3,717	2,199	172,81	56
17,052	39,233	2,163	10,896	7,835	0,336	2,293	38,436	5,506	14,761	17,907	2,221	182,49	62
19,837	44,341	1,414	14,944	7,452	1,140	16,247	20,609	9,962	4,279	3,651	2,158	249,37	81
18,626	43,109	1,625	6,622	14,992	0,347	5,642	11,427	9,925	4,621	5,554	2,162	196,44	68
19,075	44,614	1,449	6,892	13,883	0,190	4,988	20,267	4,115	18,349	13,973	2,179	151,79	53
19,799	9,163	5,442	1,860	5,989	0,280	1,220	20,779	1,844	3,385	8,979	3,198	136,88	51
66,247	35,333	0,907	8,875	32,968	0,081	6,179	9,462	0,386	0,902	38,921	2,019	178,67	63
23,685	34,217	1,647	17,134	5,827	0,096	12,195	14,470	17,390	0,098	0,429	2,035	241,24	90
25,234	24,772	2,412	11,460	6,884	4,759	7,777	7,534	1,633	24,853	15,279	2,267	179,81	63
30,402	30,750	1,103	14,478	6,207	2,327	2,536	3,375	0,264	13,626	15,196	2,197	198,51	73
25,246	25,142	2,811	7,847	10,921	0,902	2,068	3,953	7,232	13,601	11,895	2,279	161,27	55
24,838	30,623	1,667	9,219	9,551	0,864	7,171	6,743	4,989	14,322	20,153	2,203	235,32	74
41,529	52,703	0,968	22,325	13,214	16,961	7,168	6,855	5,038	15,792	17,645	2,029	238,92	78
28,693	7,695	2,361	8,729	1,420	20,630	4,611	3,469	6,786	0,146	1,450	2,702	135,99	51
28,180	6,535	6,018	5,247	2,321	13,065	0,939	0,205	2,518	10,816	16,27	3,2054	136,98	51
27,469	39,684	0,994	3,823	25,619	0,269	17,522	21,108	3,228	17,128	15,537	2,171	177,20	60
35,525	20,268	1,9887	31,161	2,862	5,166	10,450	20,730	21,801	1,194	4,078	2,225	238,23	85
17,432	10,7608	3,7483	6,5443	2,3842	13,9041	8,185	7,61287	7,6588	0,087	1,4367	2,611	139,67	53

**Tabla D.3:** *Parámetros obtenidos para cruzamiento Simple Punto (30 corridas)*

Realimentado			Anticipativo									Aptitud	Tiempo (Seg.)	Iteraciones
PID			PI		C <sub>Ant1</sub>			C <sub>Ant2</sub>						
K <sub>p</sub>	K <sub>i</sub>	K <sub>d</sub>	K <sub>p</sub>	K <sub>i</sub>	K <sub>Ant</sub>	τ <sub>1</sub>	τ <sub>2</sub>	K <sub>Ant</sub>	τ <sub>1</sub>	τ <sub>2</sub>				
8,579	20,100	3,365	2,950	4,061	6,596	0,636	2,683	7,182	0,326	1,805	2,778	143,651	52	
31,240	21,106	2,897	34,791	1,702	44,593	3,805	3,618	12,690	0,090	1,032	2,180	141,555	51	
45,723	14,609	2,919	11,227	7,332	1,560	3,570	4,882	7,850	8,303	7,108	2,331	153,522	54	
20,441	29,528	3,210	7,562	8,562	15,859	5,606	3,093	18,426	0,190	1,859	2,226	145,743	51	
39,310	17,017	1,873	5,516	16,257	2,191	4,110	4,275	18,616	0,346	1,853	2,179	145,958	56	
25,408	24,983	2,928	22,644	2,937	8,654	3,616	4,157	12,421	0,337	1,860	2,229	189,289	71	
45,959	55,280	1,206	49,895	8,582	12,535	12,335	12,291	0,536	3,837	5,026	2,028	234,378	77	
6,891	13,484	6,791	7,224	0,688	7,995	0,634	7,640	2,662	1,125	6,026	3,364	135,736	51	
24,883	26,073	2,355	12,268	6,743	1,090	1,927	16,415	5,214	4,203	5,309	2,239	175,780	62	
44,361	17,023	1,860	17,302	5,663	8,335	13,398	55,228	22,737	0,353	1,005	2,044	219,243	76	
10,116	17,052	5,281	4,577	4,371	3,599	7,032	7,917	6,957	0,152	0,553	2,842	146,825	51	
15,796	13,995	3,911	7,826	2,137	4,834	5,308	7,658	8,641	0,850	3,438	2,830	159,835	55	
19,794	8,004	3,557	6,724	1,529	2,685	4,042	4,054	5,706	0,124	1,833	2,771	141,814	55	
15,667	11,219	6,534	1,814	6,246	3,004	8,255	1,265	3,529	1,385	4,670	3,107	141,172	51	
27,680	31,706	1,240	10,870	8,491	0,560	9,165	11,363	1,807	13,737	12,284	2,183	166,886	55	
17,612	35,849	3,233	12,709	5,558	10,147	3,825	1,454	17,624	0,543	1,870	2,229	255,956	91	
13,948	51,784	1,920	13,566	8,340	0,306	2,933	14,905	26,751	3,022	5,138	2,164	250,007	85	
35,919	22,248	1,604	10,435	10,629	2,822	15,325	12,444	6,652	5,584	3,278	2,207	160,123	58	
29,666	28,904	1,324	16,457	5,761	0,008	0,829	2,689	10,148	0,526	1,489	2,157	146,326	51	
26,936	25,333	2,757	5,983	11,489	1,248	2,223	9,408	10,833	0,224	0,768	2,196	194,050	70	
21,847	8,896	4,446	3,930	3,171	22,082	3,106	0,886	6,574	0,015	1,719	2,683	150,557	55	
40,797	20,106	1,438	6,607	14,428	2,112	0,669	0,715	4,215	4,608	4,541	2,178	181,278	68	
22,712	31,596	2,266	55,913	1,168	3,225	15,069	2,334	21,552	0,290	1,429	2,202	156,472	55	
24,647	9,655	3,104	3,540	4,378	5,095	5,048	6,183	6,940	0,059	2,036	2,639	152,822	53	
17,174	12,479	3,408	6,606	2,167	13,941	1,316	2,295	6,679	0,026	2,010	2,654	137,847	51	
17,768	10,928	4,841	2,876	4,743	0,834	4,422	7,806	4,888	1,003	3,636	2,966	140,415	51	
20,370	30,365	3,166	5,418	13,610	5,397	1,601	4,140	12,845	0,980	2,454	2,284	231,685	60	
68,133	10,000	2,000	3,717	23,610	0,924	8,740	8,062	5,265	0,951	1,269	2,201	243,648	85	
9,768	22,551	2,847	0,860	16,650	11,775	6,473	7,278	8,297	0,351	1,984	2,729	155,086	55	
33,011	19,447	2,460	9,212	9,494	6,382	3,671	4,321	7,646	1,728	2,357	2,234	172,357	57	

Tabla D.4: Parámetros obtenidos para cruzamiento Intermedio (30 corridas)

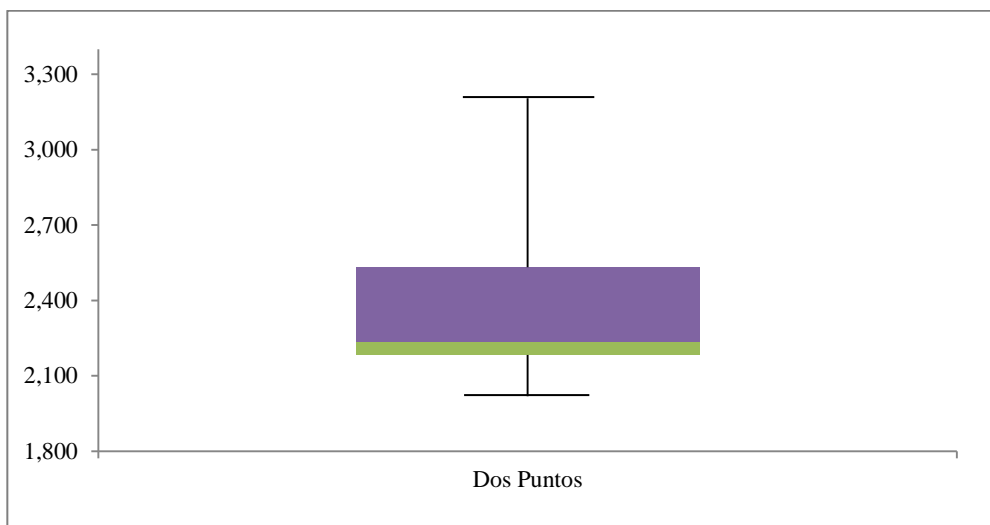
Realimentado						Anticipativo						Aptitud	Tiempo (Seg.)	Iteraciones
PID			PI			C <sub>Ant1</sub>			C <sub>Ant2</sub>					
K <sub>p</sub>	K <sub>i</sub>	K <sub>d</sub>	K <sub>p</sub>	K <sub>i</sub>	K <sub>Ant</sub>	$\tau_1$	$\tau_2$	K <sub>Ant</sub>	$\tau_1$	$\tau_2$				
26,890	27,139	1,795	8,349	11,176	7,246	4,810	8,237	8,234	3,828	5,153	2,178	345,176	103	
28,519	24,720	1,919	8,040	11,556	7,480	5,968	12,521	7,861	7,409	8,909	2,193	285,000	81	
16,216	14,029	2,976	3,729	5,563	5,291	7,070	7,752	8,803	0,071	1,052	2,492	522,401	150	
9,543	20,204	3,982	5,097	3,470	6,834	8,048	9,048	7,800	0,085	1,319	2,559	329,910	105	
15,581	12,745	3,812	1,355	15,488	4,079	3,789	5,858	10,478	0,290	1,431	2,582	331,504	102	
25,647	27,674	1,959	14,855	6,943	2,504	4,558	12,089	11,764	8,632	8,981	2,177	377,061	103	
29,307	30,109	1,340	7,453	13,046	1,810	11,175	3,908	6,335	10,748	12,787	2,162	407,010	111	
12,990	15,278	3,538	3,081	5,957	7,579	6,017	6,679	7,620	0,131	1,278	2,545	297,432	101	
13,469	13,864	4,063	2,140	8,303	4,063	8,378	9,637	7,460	0,039	1,152	2,564	278,385	95	
30,809	28,033	1,382	7,971	12,159	6,870	2,264	5,464	5,369	8,092	7,921	2,161	210,912	66	
37,669	22,222	1,444	13,459	7,260	13,946	5,297	9,405	5,535	12,588	12,220	2,172	252,541	71	
28,087	24,565	2,182	9,174	9,775	7,617	5,459	7,007	7,020	13,095	14,012	2,224	254,482	75	
41,178	21,317	1,409	17,817	6,033	1,829	3,917	11,406	8,373	11,385	9,263	2,160	267,175	79	
18,506	10,837	3,686	3,182	5,592	3,431	3,766	8,731	7,507	0,059	1,235	2,540	256,305	90	
12,282	16,708	3,456	2,415	8,236	7,270	6,539	8,015	8,758	0,086	1,146	2,521	412,637	132	
21,864	30,930	2,062	12,192	7,209	8,544	5,242	10,263	5,157	10,282	10,668	2,209	207,030	60	
13,893	14,697	3,555	4,075	4,726	5,078	6,426	6,977	8,665	0,098	1,244	2,530	165,634	59	
13,350	14,428	3,947	2,952	5,608	6,023	2,732	5,341	6,866	0,075	1,403	2,575	145,845	53	
16,163	21,869	2,072	5,022	4,541	5,138	4,835	4,754	9,100	0,031	1,025	2,467	324,047	111	
13,591	15,371	3,519	3,351	5,287	7,002	6,774	7,053	7,356	0,097	1,317	2,541	236,292	82	
21,092	9,554	3,455	6,477	2,755	2,929	8,176	9,940	7,031	0,022	1,104	2,522	482,105	150	
13,759	16,354	3,010	4,285	5,157	6,151	5,791	6,169	9,638	0,137	1,042	2,500	412,921	132	
14,382	16,335	2,947	3,025	8,309	6,695	10,282	7,274	12,584	0,225	1,150	2,536	260,517	84	
12,064	8,267	5,085	2,898	2,375	5,689	6,190	6,466	4,362	0,020	2,051	2,897	152,091	51	
11,615	17,894	3,444	5,052	3,759	5,201	6,911	5,605	8,234	0,053	1,179	2,513	386,248	125	
19,853	10,875	3,222	4,091	5,182	3,339	7,239	4,332	9,468	0,169	1,148	2,518	189,714	68	
24,929	27,447	2,020	10,565	8,561	7,120	10,420	8,032	7,170	2,872	3,478	2,194	206,077	61	
17,754	13,192	2,870	2,254	11,316	2,773	2,211	1,019	12,392	0,331	1,127	2,543	389,294	122	
14,279	12,935	4,147	3,160	5,668	8,746	7,592	3,466	7,500	0,103	1,222	2,573	221,802	84	
25,421	18,823	3,079	6,240	11,669	2,198	4,833	8,544	7,303	0,208	4,423	2,578	225,445	77	

**Tabla D.5:** *Parámetros obtenidos para cruzamiento Heurístico (30 corridas)*

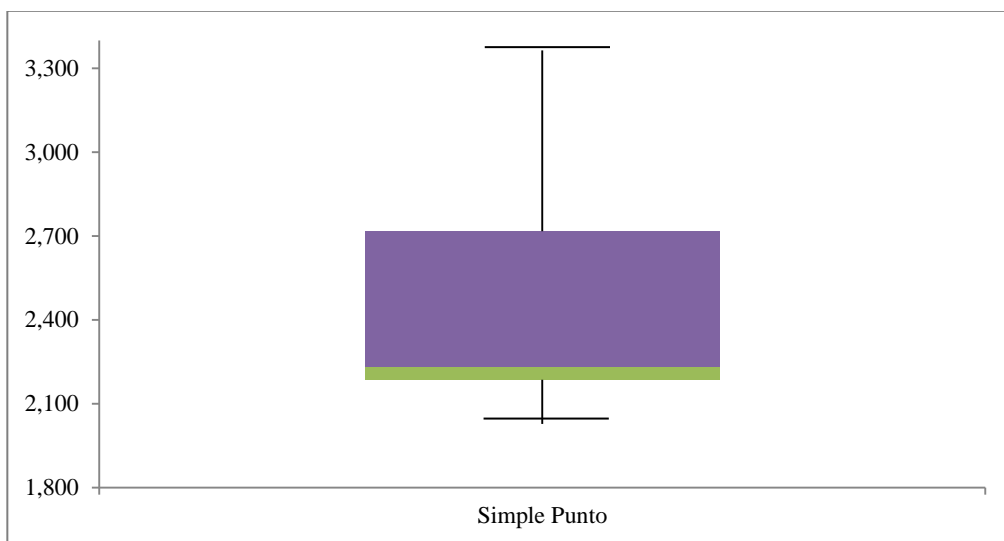
Realimentado						Anticipativo						Aptitud	Tiempo (Seg.)	Iteraciones
PID			PI			C <sub>Ant1</sub>			C <sub>Ant2</sub>					
K <sub>p</sub>	K <sub>i</sub>	K <sub>d</sub>	K <sub>p</sub>	K <sub>i</sub>	K <sub>Ant</sub>	τ <sub>1</sub>	τ <sub>2</sub>	K <sub>Ant</sub>	τ <sub>1</sub>	τ <sub>2</sub>				
13,783	16,546	2,998	6,008	4,540	2,612	0,720	2,506	5,308	10,241	9,454	3,056	158,555	51	
17,260	10,138	3,808	20,516	0,597	2,579	16,216	13,179	5,294	0,000	1,370	2,675	216,149	84	
18,775	48,620	1,220	2,836	33,264	17,931	3,484	4,279	3,120	23,314	21,861	2,170	173,855	51	
56,252	51,310	0,776	12,136	26,823	21,597	10,228	25,442	0,122	32,282	10,886	2,008	357,495	91	
48,215	113,602	0,550	24,985	36,621	10,228	7,921	9,287	11,892	45,267	24,043	2,020	333,127	81	
11,154	11,728	3,814	13,211	0,749	19,107	0,214	19,640	4,841	0,000	1,469	2,848	124,776	62	
17,002	12,282	3,143	1,767	11,483	6,847	7,399	6,148	7,714	0,001	0,846	2,483	180,623	71	
66,332	31,109	0,914	35,798	8,234	5,119	1,385	11,994	22,526	4,814	32,490	2,068	186,209	51	
48,768	52,811	0,835	14,184	21,610	10,361	13,041	44,041	24,054	0,171	31,374	2,062	182,114	54	
30,954	25,642	1,349	4,240	20,523	3,984	16,998	28,454	0,018	2,327	26,987	2,200	168,964	51	
12,412	17,776	3,133	10,327	2,520	2,492	9,516	5,459	5,640	5,962	6,825	3,053	179,032	51	
32,073	24,788	1,659	14,742	7,851	21,995	0,633	17,549	25,909	1,577	2,574	2,127	242,323	70	
34,166	50,767	1,063	14,301	19,682	7,595	0,191	38,279	0,693	0,286	16,373	2,051	151,774	51	
29,634	25,621	1,720	4,343	18,921	34,556	36,257	27,636	13,164	0,000	0,547	2,060	228,925	76	
25,246	9,012	3,095	0,617	28,022	3,306	0,103	0,058	6,347	0,000	1,129	2,521	300,428	136	
29,260	25,750	1,532	4,899	17,689	1,908	35,283	13,033	1,088	22,250	20,458	2,195	189,840	62	
15,342	11,666	3,675	4,821	4,471	2,497	0,655	3,047	8,409	0,001	0,733	2,542	124,658	67	
11,474	12,219	3,835	3,944	2,842	8,344	10,794	11,123	5,834	0,000	1,395	2,703	146,003	62	
11,908	18,015	2,702	5,359	5,880	11,803	8,007	7,178	13,423	0,030	0,533	2,500	223,153	72	
15,017	15,285	2,816	4,392	5,144	6,018	2,795	12,434	9,181	0,102	0,880	2,505	163,004	56	
20,791	36,706	1,414	11,636	7,457	1,727	28,223	5,471	2,962	0,182	24,940	2,234	146,353	51	
31,677	26,812	1,476	18,094	6,167	7,865	15,614	21,842	12,792	5,804	5,833	2,145	194,301	59	
13,687	15,078	3,115	10,531	1,998	3,068	4,291	5,538	8,382	0,020	0,868	2,501	243,684	85	
15,029	12,810	3,881	2,806	5,632	6,180	9,544	7,671	5,714	0,000	1,212	2,583	214,021	94	
18,656	49,104	1,334	4,417	24,752	1,876	48,338	20,843	11,224	6,036	6,276	2,141	173,003	59	
16,962	12,692	3,223	3,463	8,309	3,162	21,189	6,711	8,562	10,374	11,441	3,054	211,738	58	
15,398	14,618	2,934	3,403	6,154	10,723	2,179	2,296	8,519	0,007	0,931	2,475	282,336	121	
14,279	12,935	4,147	3,160	5,668	8,746	7,592	3,466	7,500	0,103	1,222	2,573	221,802	84	
17,768	10,928	4,841	2,876	4,743	0,834	4,422	7,806	4,888	1,003	3,636	2,966	140,415	51	
22,481	10,213	2,905	7,826	3,406	2,266	3,042	5,624	12,926	0,332	1,049	2,547	187,813	54	

**Tabla D.6:** *Parámetros obtenidos para cruzamiento Aritmético (30 corridas)*

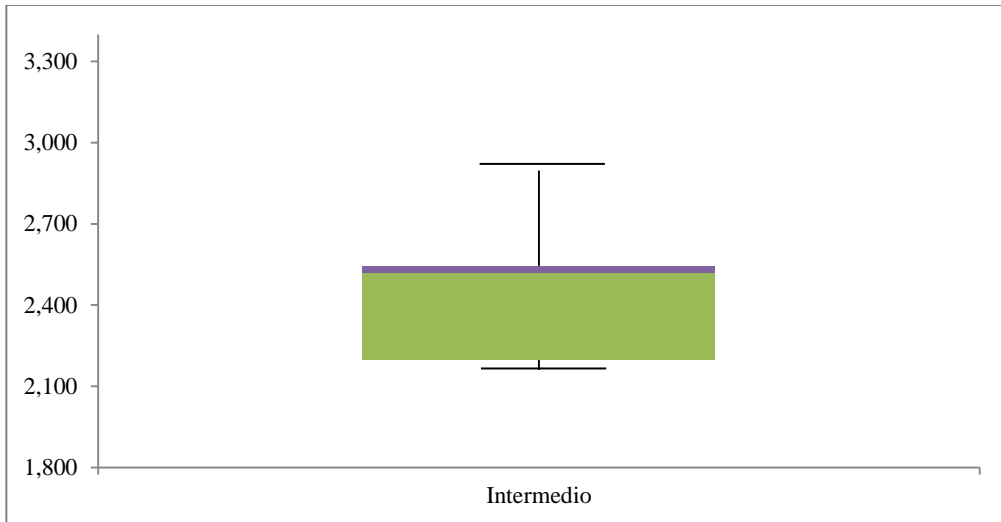
Realimentado						Anticipativo						Aptitud	Tiempo (Seg.)	Iteraciones
PID			PI			C <sub>Ant1</sub>			C <sub>Ant2</sub>					
K <sub>p</sub>	K <sub>i</sub>	K <sub>d</sub>	K <sub>p</sub>	K <sub>i</sub>		K <sub>Ant</sub>	τ <sub>1</sub>	τ <sub>2</sub>	K <sub>Ant</sub>	τ <sub>1</sub>	τ <sub>2</sub>			
12,471	33,577	2,173	6,002	3,521		11,342	3,304	8,655	8,976	0,130	1,716	2,565	188,302	65
12,946	14,622	3,720	4,834	4,076		10,475	4,335	2,188	7,860	0,004	0,899	2,512	264,414	93
27,531	25,466	1,970	10,033	9,450		3,311	4,152	5,776	9,722	6,359	8,012	2,188	502,338	130
15,309	14,650	3,181	5,023	4,332		7,097	16,835	7,054	10,224	0,143	1,200	2,526	233,208	71
12,620	15,230	3,654	6,440	3,890		6,641	4,693	3,687	4,832	5,290	5,538	3,073	231,578	67
8,953	11,287	5,246	4,400	1,940		6,842	2,862	6,013	4,947	0,002	1,663	2,867	223,341	83
20,181	19,045	2,453	7,003	10,969		11,583	17,062	3,497	7,796	2,382	9,009	3,003	203,676	62
15,197	13,554	3,336	4,399	5,395		1,732	8,092	3,242	3,661	5,330	5,965	3,092	169,696	52
25,490	26,549	2,019	7,470	11,528		2,811	7,688	14,650	3,890	11,963	11,837	2,206	259,905	70
14,324	14,366	3,510	4,327	3,972		5,599	6,713	5,374	6,740	0,001	1,181	2,521	476,713	141
18,318	11,028	3,225	8,573	2,996		11,664	6,775	3,337	11,197	0,077	0,748	2,500	419,572	124
26,373	25,021	2,128	7,122	12,266		4,457	19,493	4,300	12,711	10,822	27,352	2,276	249,134	69
14,838	13,859	3,832	5,820	3,255		6,375	8,463	7,862	10,373	0,431	2,085	2,677	272,447	81
26,015	26,859	1,885	8,704	10,122		2,897	11,502	2,953	5,515	4,910	6,615	2,201	183,048	55
24,085	29,268	1,874	9,520	9,221		4,501	2,416	9,211	9,689	3,181	7,519	2,213	368,266	106
25,051	28,657	1,810	14,167	6,449		19,052	15,133	17,324	9,323	1,681	2,924	2,177	183,318	54
12,403	14,407	4,627	1,738	9,480		9,475	6,181	6,688	8,653	0,603	2,911	2,765	158,378	51
29,330	29,442	1,415	13,496	7,743		11,368	6,412	9,000	8,752	8,835	8,545	2,154	316,184	88
30,973	24,075	1,740	12,842	7,602		15,886	6,402	10,932	7,954	9,680	9,921	2,181	184,829	52
29,167	24,129	1,975	18,485	6,237		1,872	11,953	13,141	17,920	6,461	6,644	2,175	271,309	81
12,450	13,616	4,838	4,587	3,154		5,498	5,326	2,048	5,562	0,059	1,601	2,677	235,243	81
13,751	13,582	3,803	3,529	4,704		1,678	9,711	7,448	6,552	0,035	1,261	2,569	180,069	66
11,625	16,115	3,950	3,449	5,050		2,944	7,700	5,538	6,936	0,017	1,116	2,557	357,813	120
13,731	14,132	3,719	5,098	3,303		7,848	5,993	3,664	6,864	0,003	1,287	2,540	353,655	118
15,236	11,661	3,462	5,595	3,768		5,182	5,785	4,168	9,178	0,001	0,959	2,560	287,435	104
14,924	13,154	3,579	2,486	7,737		2,129	1,364	6,075	8,103	0,058	1,083	2,537	328,661	109
12,471	33,577	2,173	6,002	3,521		11,342	3,304	8,655	8,976	0,130	1,716	2,565	188,302	65
12,946	14,622	3,720	4,834	4,076		10,475	4,335	2,188	7,860	0,004	0,899	2,512	264,414	93
27,531	25,466	1,970	10,033	9,450		3,311	4,152	5,776	9,722	6,359	8,012	2,188	502,338	130
15,309	14,650	3,181	5,023	4,332		7,097	16,835	7,054	10,224	0,143	1,200	2,526	233,208	71



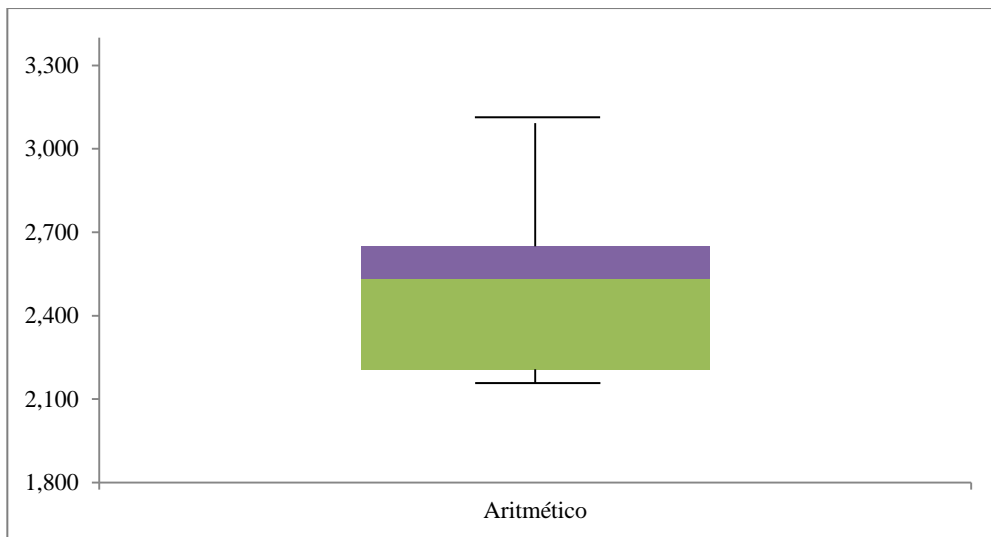
**Figura D.1:** Diagrama de caja vertical para cruzamiento Dos Puntos



**Figura D.2:** Diagrama de caja vertical para cruzamiento Simple Puntos



**Figura D.3:** Diagrama de caja vertical para cruzamiento Intermedio



**Figura D.4:** Diagrama de caja vertical para cruzamiento Aritmético

Tabla D.7: Parámetros obtenidos para cruzamiento Heurístico en paralelo (30 corridas)

Realimentado			Anticipativo									Aptitud	Tiempo (Seg.)	Iteraciones
PID			PI		C <sub>Ant1</sub>			C <sub>Ant2</sub>						
K <sub>p</sub>	K <sub>i</sub>	K <sub>d</sub>	K <sub>p</sub>	K <sub>i</sub>	K <sub>Ant</sub>	$\tau_1$	$\tau_2$	K <sub>Ant</sub>	$\tau_1$	$\tau_2$				
61,092	46,581	0,952	20,496	22,537	8,391	12,249	2,737	0,085	31,406	9,500	2,0200	31,0	52	
13,457	18,594	2,638	3,247	7,656	5,169	8,568	4,794	11,235	0,191	1,000	2,4942	27,0	51	
22,484	34,359	1,667	7,064	14,023	0,413	8,099	22,081	9,031	8,896	10,030	2,1649	40,0	60	
15,544	11,907	4,237	1,526	11,077	12,406	1,741	7,216	6,907	0,000	1,161	2,5841	29,0	55	
45,874	41,937	0,967	11,121	25,895	33,226	1,826	26,119	0,100	21,541	3,785	2,0436	32,0	51	
27,441	26,346	1,663	9,583	8,974	15,157	15,737	20,599	13,246	4,040	29,386	2,2848	34,0	56	
11,139	21,520	2,316	13,231	2,401	24,521	5,401	3,501	13,446	0,000	0,568	2,4443	26,0	55	
14,720	27,613	2,810	2,645	13,262	1,400	23,828	0,806	15,755	0,000	0,931	2,4559	26,0	60	
12,604	16,164	3,441	2,143	7,786	0,493	7,125	5,801	6,426	0,001	1,243	2,5305	36,0	83	
21,160	10,249	3,034	2,828	7,346	4,599	6,685	1,451	8,054	0,007	0,852	2,4731	24,0	52	
44,348	78,273	0,735	18,061	24,546	55,174	58,609	23,679	0,492	30,294	15,134	2,0242	36,0	51	
35,117	23,814	1,309	19,233	4,745	13,921	23,628	11,425	0,270	21,593	2,671	2,2092	39,0	62	
29,643	25,971	1,666	19,988	4,929	0,011	14,876	12,488	3,443	21,396	9,658	2,2040	36,0	60	
32,172	32,067	1,151	4,965	29,786	12,214	0,724	41,331	34,736	4,748	5,263	2,1306	28,0	51	
16,262	12,957	2,963	5,454	4,437	11,817	6,636	4,385	9,604	0,001	0,688	2,4669	42,0	82	
15,700	12,073	3,821	14,031	1,210	4,465	17,464	4,356	6,380	0,000	1,120	2,5584	36,0	84	
14,936	12,761	3,238	2,670	9,542	7,472	6,876	8,296	10,064	0,000	0,593	2,5077	46,0	92	
11,961	11,180	3,850	4,344	2,654	9,829	3,050	2,601	5,851	0,001	1,270	2,7134	50,0	111	
12,511	17,761	3,075	9,333	1,926	2,151	6,514	6,834	6,742	0,001	1,072	2,4961	49,0	95	
17,265	12,568	3,142	4,620	3,853	3,564	1,206	9,332	6,856	0,000	1,116	2,5075	35,0	83	
11,230	10,933	4,306	8,476	1,180	4,691	6,676	1,341	4,756	0,002	1,463	2,8000	30,0	70	
20,825	9,709	3,507	5,782	3,170	10,081	1,405	8,469	7,915	0,002	1,181	2,5406	26,0	51	
22,088	15,707	2,354	13,887	1,322	0,916	9,465	6,470	6,404	0,000	1,239	2,5524	23,0	54	
53,364	17,226	1,211	10,729	8,866	24,268	10,969	20,021	5,484	8,716	13,308	2,1881	32,0	51	
12,319	13,270	6,229	5,456	2,743	1,068	0,974	0,004	6,360	0,001	1,221	2,7602	38,0	68	
10,466	18,019	3,382	3,779	5,899	2,861	5,807	6,210	8,606	0,000	0,697	2,5163	58,0	123	
26,266	28,176	1,677	5,344	16,438	1,301	4,303	15,496	5,218	3,607	6,420	2,1888	40,0	73	
62,603	46,497	0,951	33,577	11,884	61,917	24,206	20,316	11,635	7,536	45,088	2,0295	65,0	81	
43,982	78,481	0,647	15,376	23,375	3,998	16,354	4,335	13,509	14,166	34,571	2,0198	42,0	65	
11,701	17,110	3,489	9,253	1,853	10,755	3,227	7,047	6,733	0,000	1,202	2,536	43,0	92	



Tabla D.8: Parámetros obtenidos para cruzamiento Scattered en paralelo (30 corridas)

Realimentado			Anticipativo									Aptitud	Tiempo (Seg.)	Iteraciones
PID			PI		C <sub>Ant1</sub>			C <sub>Ant2</sub>						
K <sub>p</sub>	K <sub>i</sub>	K <sub>d</sub>	K <sub>p</sub>	K <sub>i</sub>	K <sub>Ant</sub>	τ <sub>1</sub>	τ <sub>2</sub>	K <sub>Ant</sub>	τ <sub>1</sub>	τ <sub>2</sub>				
12,098	17,212	3,602	4,818	4,479	0,826	2,034	7,232	10,511	0,688	1,898	2,680	39,00	82	
36,011	17,377	3,156	14,232	5,651	3,850	3,273	6,333	21,559	0,966	2,620	2,236	26,00	51	
14,371	45,788	2,495	16,824	6,179	0,787	5,911	8,078	15,880	15,070	15,709	2,229	28,00	51	
30,452	36,048	1,088	6,457	18,549	5,452	2,177	2,321	13,824	14,713	14,719	2,129	33,00	60	
24,082	34,128	1,568	15,979	6,470	5,540	2,395	0,412	11,251	5,225	5,778	2,169	28,00	53	
33,497	23,516	1,600	9,923	9,174	4,033	10,428	9,379	11,300	0,327	0,951	2,119	42,00	84	
42,219	51,406	1,042	13,431	20,870	5,640	1,426	2,674	0,375	13,735	28,579	2,033	35,00	65	
53,092	48,722	1,273	6,558	57,816	3,735	31,751	33,357	0,649	0,468	3,330	2,024	40,00	74	
27,788	24,879	1,779	24,543	3,352	0,702	8,564	8,798	0,809	11,657	22,415	2,215	27,00	51	
19,949	32,573	2,482	13,263	6,730	1,213	8,331	9,399	13,890	1,586	2,749	2,198	27,00	51	
40,652	20,714	1,598	11,323	8,028	1,336	5,054	10,217	20,173	0,514	2,028	2,178	28,00	58	
19,805	38,426	1,728	22,083	4,495	0,028	13,986	35,133	8,602	2,883	2,987	2,166	44,00	91	
14,904	12,906	4,050	0,947	18,041	2,172	0,539	3,518	8,744	0,001	1,648	2,629	37,00	81	
27,267	33,264	1,373	18,862	6,341	0,514	4,999	9,716	20,147	4,107	5,234	2,133	43,00	84	
8,148	23,201	4,801	2,893	6,206	37,263	5,501	1,013	9,417	0,369	1,825	2,628	40,00	81	
29,433	23,986	2,419	11,329	7,073	0,620	9,118	8,522	23,624	0,553	2,152	2,164	37,00	74	
32,298	21,034	1,973	3,321	24,920	2,332	0,928	3,273	0,777	25,119	9,552	2,229	26,00	53	
21,085	33,403	1,941	4,952	20,953	2,495	16,502	15,556	9,895	3,434	3,293	2,197	30,00	60	
36,260	18,479	3,064	6,326	11,870	0,341	1,773	6,515	12,449	1,040	1,668	2,304	29,00	59	
23,877	32,813	1,617	20,549	4,877	0,914	11,483	11,143	8,268	9,626	9,916	2,164	38,00	73	
35,510	18,028	2,860	8,796	10,352	2,441	4,461	10,865	28,504	1,297	3,393	2,211	43,00	85	
50,957	20,530	1,094	7,840	12,721	6,132	5,905	5,661	20,504	0,601	2,312	2,180	35,00	71	
10,129	17,078	5,254	1,099	11,375	5,892	9,700	8,483	4,577	0,166	2,016	2,823	32,00	66	
23,257	30,432	2,138	7,644	13,906	2,228	9,143	0,337	27,646	0,868	1,680	2,085	25,00	52	
53,092	48,722	1,273	6,558	57,816	3,735	31,751	33,357	0,649	0,468	3,330	2,024	37,00	74	
24,883	28,903	1,997	5,276	15,679	8,355	2,720	2,183	27,110	0,290	1,916	2,153	51,00	102	
33,21296712	20,120	2,559	7,856	8,769	3,074	0,204	3,676	21,131	0,232	2,157	2,176	34,00	66	
26,01457637	32,407	1,506	4,519	22,229	0,337	8,611	5,083	8,095	19,874	19,723	2,159	35,00	64	
26,91179136	23,840	2,594	15,654	6,345	2,076	3,197	7,545	25,611	2,557	5,053	2,219	33,00	65	
29,4383085	24,178	1,982	8,718	12,036	5,460	4,336	4,239	26,015	0,515	1,217	2,065	27,00	54	



---

## REFERENCIAS

---

### A

Adb-El-Barr, M. Topological Network Design: A Survey. *Journal of Network and Computer Applications*. 32, 501-509. **2009**.

ADIGAS. Asociación Distribuidores de Gas de la República Argentina. <http://www.adigas.com.ar>. Ingreso: 27 de Octubre de 2011. **2011**.

Alba, E. *Parallel Metaheuristics: A New Class of Algorithms*. Wiley: New York, **2005**.

Anderson, D. R.; Sweeney, D. J.; Williams, T. A. Métodos Cuantitativos para los Negocios. 7ª Ed. Thomson Learning: México, 1999.

Andre, J.; Auray, S.; Brac, J.; Wolf, D.D.; Maisonnier, G.; Sidi, M.O.; Simonnet, A. Design and Dimensioning of Hydrogen Transmission Pipeline Networks. *European Journal of Operational Research*. 229, 239-251. **2013**.

APLA. Asociación Petroquímica y Química Latinoamericana, *Anuario Petroquímico 2011-2012*. **2012**.

Ares, F. *Capítulo 5: Modelo de localización. Localización final*, <https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/6368/8/07.pdf>. **2003**.

Aström, K. J. y Hägglund, T. *PID Controllers: Theory, Design and Tuning*. Instrument Society of America, Research Triangle Park, NC, USA. **1995**.

Aström, K.J. y Hägglund, T. Revisiting the Ziegler–Nichols Step Response Method for PID Control, *Journal of Process Control*. 14(6), 635-650. **2004**.

---

**B**

Baca Urbina, G. *Evaluación de Proyectos*, 4ta Ed., McGraw-Hill, México, **2003**.

BCRA, Banco Central de la República Argentina. <http://www.bcra.gov.ar/>. Ingreso: 3 de Septiembre de 2011. **2011**.

Bilge Bilgen, B.; Ozkarahan, I. Strategic tactical and operational production-distribution models: a review. *Int. J. Technology Management*. 28(2), 151-171, **2004**.

Bloomberg. Cipher Reports Q3 financial results. <http://www.bloomberg.com/article/2011-10-26/apjofUehPNbo.html> Ingreso: 7 de Octubre de 2011, **2011**.

Blum, C.; Roli, A. Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview and Conceptual Comparison. *ACM Computing Surveys*. 35 (3), 268–308. **2003**.

Boletín Informativo IPA: Instituto Petroquímico Argentino. Año 14. N° 60. <http://ipa.org.ar/images/PUBLICACIONES/BOLETINES/bol60.pdf>, Ingreso: 4 de Diciembre de 2010. **2010**.

Boletín Informativo IPA: Instituto Petroquímico Argentino. Año 14 N°61. <http://www.ipa.org.ar/images/PUBLICACIONES/BOLETINES/bol61.pdf>, Ingreso: 16 de Abril de 2011. **2011**.

Boschetto, S. N.; Magatão, L.; Neves-Jr, F.; Barbosa-Póvoa, A. P. F. D. MILP Planning Model for Real-World Multiproduct Pipeline Network. *21<sup>st</sup> European Symposium on Computer Aided Process Engineering*. 29, 995–999. **2011**.

Brooke, A.; Kendrick, D.; Meeraus, A.; Raman, R. *GAMS: A Users Guide*. GAMS Development Corp: Washington DC, **2004**.

Buchanan, J.E.; Garven, S.C.; Genis, O. Shapiro, J.F.; Singhal, V.; Thomas, J.M.; Thorpis, S. A. Multi-refinery, Multi-period Modeling System for the Turkish Petroleum Refining Industry. *Interfaces*. 20 (4), 48-60. **1990**.



Cafaro, D. C.; Cerdá, J. A Rigorous Mathematical Formulation for the Scheduling of Tree-Structure Pipeline Networks. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 50, 5064, **2011**.

Cañete, B.; Oteiza, P.P.; Gigola, C.E.; Brignole, N.B. GASOLINA NATURAL: Un Sustituto Atractivo para la Producción de Etileno en Argentina. *Revista Petroquímica, Petróleo, Gas & Química*. Resumen completo en la sección: Trabajo Científico Técnico, N° 283, 206-210, Noviembre **2012**. Artículo completo en versión electrónica extendida: (25 pp) disponible desde el 4 de Febrero de **2013** en <http://revistapetroquimica.com/gasolina-natural-un-sustituto-atractivo-para-la-produccion-de-etileno-en-argentina/>.

Catálogo Grundfos, <http://www.gomezroco.com.ar/sources/pdf/grundfos/nk.pdf> , Ingreso 2 de agosto de 2014. **2014**.

Cecchini, R. L. *Desarrollo de Técnicas de Computación Evolutiva para Soporte en Minería de Datos y Texto*. Tesis de Doctorado en Ciencias de la Computación. Universidad Nacional del Sur. Disponible en <http://www.cs.uns.edu.ar/~cr/web/Thesis.pdf>, **2010**.

CEI. Centro de Economía Internacional. <http://www.cei.gov.ar/node/26>, Ingreso: 23 de Septiembre de 2011. **2010**.

Chemical Engineering. Economic Indicators. <http://www.chemengonline.com/magazine/economic-indicators/>, Ingreso: 5 de Junio de 2011. **2011**.

Chipperfield, A.; Fleming, P.; Pohlheim, H.; Fonseca, C. *Genetic Algorithm TOOLBOX for Use with MATLAB®*. Department of Automatic Control and System Engineering, University of Sheffield: UK, **1994**.

Coello Coello, C. A.; Lamont, G. B.; Van Veldhuizen, D. A. *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*. 2<sup>da</sup> Ed. Springer: New York, **2007**.

Cook, S.A. The Complexity of Theorem-Proving Procedures, *Proceedings of the third Annual ACM Symposium on Theory of Computing*, ACM. 5, 151-158. **1971**.

## D

De la Cruz, J. M.; de Andres-Toro, B.; Herrán, A.; Besada Porta, E.; Fernandez Blanco P. Multi-Objective Optimization of the Transport in Oil Pipelines Networks. *Emerging Technologies and Factory Automation*, IEEE Conference. 1, 566–573. **2003**.

Dimeo, R. y Lee, K. Y. Boiler-Turbine Control System Design Using a Genetic Algorithm. *Energy Conversion*. 752–759. **1995**.

DPEyC. Dirección Provincial Estadísticas y Censos San Luis. Gobierno de la Provincia de San Luis. Índice de Precios al Consumidor. <http://www.estadistica.sanluis.gov.ar/estadisticaasp/Paginas/Pagina.asp?PaginaId=76>, Ingreso. 4 de Junio de 2011. **2011**.

## E

Echarte, R. *Equipos para Procesos Químicos*. EdiUNS: Bahía Blanca, **2010**.

EIA. U.S. Energy Information Administration. International Energy Outlook. <http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484%282011%29.pdf>, Ingreso: 8 de Junio de 2011. **2011**.

Enders, W. *Applied Econometric Time Series*. 3<sup>ra</sup> Ed. Wiley: New York, **2009**.

Esposito, L. J.; Formanek, K.; Kientz, G.; Mauger, F.; Maureaux, V.; Robert, G.; Truchet, F. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*. John Wiley & Sons:New York, **1997**.



García Sánchez, A. *Programación del Transporte de Hidrocarburos por Oleoductos Mediante la Combinación de Técnicas Metaheurísticas y Simulación*. Tesis Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Madrid. Disponible en [http://oa.upm.es/1262/1/ALVARO\\_GARCIA\\_SANCHEZ.pdf](http://oa.upm.es/1262/1/ALVARO_GARCIA_SANCHEZ.pdf), **2007**.

GASNOR. Industria del Gas Natural. <http://www.gasnor.com/cont/10/industria-del-gas-natural-%202011>, Ingreso: 3 de Junio de 2011, **2011**.

Goldberg, D.E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, **1989**.

González, L. y Rial P. Elaboración de un Sistema de Información Geográfica para la Provincia de Santa Cruz y sus Aplicaciones a Través de un Formato Web. Primer Congreso de la Ciencia Cartográfica y VIII Semana Nacional de Cartografía, Buenos Aires 25-27/**2003**.

gvSIG Association, gvSIG Desktop 1.11, *Manual de Usuario*. **2010**.

gvSIG; <http://www.gvsig.org/web/>, **2014**.



Hägglund, T. y Aström, K-J. Revisiting the Ziegler-Nichols Tuning Rules for PI Control, *Asian Journal of Control*. 364-380. **2002**.

Hernán-González, A.; De La Cruz, J.M.; De Andrés-Toro, B.; Risco-Martin, J.L. Modeling and Simulation of a Gas Distribution Pipeline Network. *Applied Mathematical Modelling*. 33, 1584–1600, **2009**.

Hill, T.; Westbrook, R. SWOT Analysis: It's Time for a Product Recall. *Long Range Planning* 30 (1): 46–52. **1997**.

Holland, J. Genetic algorithms. *Scientific American*. 66-7, **1992**.

Holmquist, K. CMAI Houston, Global Ethylene Surplus to Last Through 2011, *Oil & Gas Journal*. 108 (27), 46-52. **2010**.

Hsieh, S-C.; Perng, J-W.; Ma, L-S. PI Control Design Based on Sensitivity Analysis and Genetic Algorithms. *Information Security and Intelligence Control (ISIC)*. 95–98, **2012**.



IAMC. Anuario Bursátil '10. <http://www.iamc.com.ar/articulo/ANUA2010/>, Ingreso: 4 de Octubre de 2011, **2010**.

IAMC. Informe Mensual Septiembre 2011  
<http://www.iamc.com.ar/Handlers/SecureStreamer.ashx?code=MEN201109>, Ingreso: 6 de Septiembre de 2011, **2011**.

ICIS, Chemical Business, Analysis of Chemical Markets. **2011**.

Inghenia. SWOT Tool. [http://www.inghenia.com/gadgets/swot/swot\\_en.php](http://www.inghenia.com/gadgets/swot/swot_en.php), **2009**.

IPA: Instituto Petroquímico Argentino. *Información Estadística de la Industria Petroquímica y Química de la Argentina*, Ed. N°28, **2008**.

IPA: Instituto Petroquímico Argentino. *Información Estadística de la Industria Petroquímica y Química de la Argentina*, Ed. N°29, **2009**.

IPA: Instituto Petroquímico Argentino. *Información Estadística de la Industria Petroquímica y Química de la Argentina*, Ed. N°30, **2010**.

IPA: Instituto Petroquímico Argentino. *Información Estadística de la Industria Petroquímica y Química de la Argentina*, Ed. N° 31, **2011**.



IPA: Instituto Petroquímico Argentino. *Información Estadística de la Industria Petroquímica y Química de la Argentina*, Ed. N° 33, **2013**.

IPA: Instituto Petroquímico Argentino. *Información Estadística de la Industria Petroquímica y Química de la Argentina*, Ed. N° 34, **2014**.

Iyer, R. R. y Grossmann, I. E.; Optimal Planning and Scheduling of Offshore Oil Field Infrastructure Investment and Operations. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 37, 1380-1397. **1998**.



Jyh-Cheng Jeng. Closed-Loop Identification of Multivariable Systems, Using B-Spline Series Expansions for Step Responses *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 51, 2376–2387. **2012**.



Kabirian, A. y Reza Hemmati, M. A Strategic Planning Model for Natural Gas Transmission Networks. *Energy Policy*. 35 (11), 5656-5670. **2007**.

Kariv, O. y Hakimi, S. L. An Algorithmic Approach to Network Location Problems. I: The p-Centers. *SIAM Journal on Applied Mathematics*. 37(3), 513–538. **1979**.

Kennedy, J. Particle Swarm Optimization. *In Encyclopedia of Machine Learning*. Springer: S. 760-766. **2010**.

Kidnay, A. J. y Parrish, W. *Fundamentals of Natural Gas Processing*. 1<sup>ra</sup> Ed. CRC Press Taylor & Francis Group: London, **2006**.

Kirkpatrick, S. C. D.; Gelatt, Jr.; Vecchi, M. P. Optimization by Simulated Annealing. *Science, New Series*. 220 (4598), 671-680. **1983**.

Kwok, D.P. y Sheng F. Genetic Algorithm and Simulated Annealing for Optimal Robot Arm PID Control, *Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation*, 2, 708–713. **1994**.



La Nación. Volvió el Frío y les Cortaron el Gas a más de 300 Industrias. <http://www.lanacion.com.ar/1385020-volvio-el-frio-y-les-cortaron-el-gas-a-mas-de-300-industrias> , Ingreso: 29 de Junio de 2011. **2011**.

Leeuwen, J. *Handbook of Theoretical Computer Science: Algorithms and complexity*. Amsterdam. Elsevier, Ámsterdam. 1. 67-162, **1998**.

Lippe, D. Sluggish Economic Conditions May Retard Ethylene production, *Oil & Gas Journal*. 109.16, 75-81. **2011**.

Liu, C.H. y Hsu, Y.Y. Design of a Self-Tuning PI Controller for a STATCOM Using Particle Swarm Optimization. *IEEE Transactions on Industrial Electronic*. 57 (2), 702–715. **2010**.

Luna Valero, F. Metaheurísticas avanzadas para problemas reales en redes de telecomunicaciones. Tesis Doctoral. Universidad de Málaga, **2008**.

Luyben, W. y Luyben, M. *Essential of Process Control*. McGraw Hill: US, **1997**.



Maguire, D. J. An Overview and Definition of GIS. *Geographical Information Systems: Principles and Applications*. 1, 9-20. **1991**.

Marcoulaki, E. C.; Papazoglou, I. A.; Pixopoulou, N. Integrated Framework for the Design of Pipeline Systems using Stochastic Optimisation and GIS Tools. *Chemical Engineering Research and Design*. 90 (12), 2209–2222. **2012**.

Meng, X. y Song, B. Fast Genetic Algorithms Used for PID Parameter Optimization *Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics*. 2144–2148. **2007**.

Meninato, R. A Pesar del Crecimiento Dow Producirá un 5% Menos por Falta de Gas. *Revista Petroquímica, Petróleo, Gas & Química*. 257, 18-22. **2010**.

Merval. Cotizaciones, <http://www.merval.sba.com.ar/Vistas/Cotizaciones/Indices.aspx>, Ingreso: 8 de Octubre de 2011. **2011**.

Miller, S.A. *Ethylene and its Industrial Derivatives*. 1<sup>ra</sup> Ed. Benn Limited: London, **1969**.

Moura, A. V.; de Souza, C. C.; Cire, A. A.; Lopes, T. M. T. Heuristics and Constraint Programming Hybridizations for a Real Pipeline Planning and Scheduling Problem. *11<sup>th</sup> IEEE International Conference on Computational Science and Engineering*. 455–462. **2008**.



Neiro, S.M. y Pinto, J.M. A General Modeling Framework for the Operational Planning of Petroleum Supply Chains. *Computers & Chemical Engineering*. 28(6-7), 871-896. **2004**.



Oh, W.S.; Sol, K.; Cho, K.M.; Yo, K.S.; Kim, Y.T. Genetic Based Self-Tuning Speed Controller for Induction Motor Drives. *International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD)*. 88–91. **2011**.

Ore, O. *Graphs and Their Uses*. Anneli New Mathematical Library: US. 3<sup>ra</sup> Ed. **1990**.

Osiadacz, A. J. y Górecki, M. Optimization of Pipe Sizes for Distribution Gas Network Design. *Proceedings of the 27<sup>th</sup> PSIG Annual Meeting, Albuquerque, Pipeline Simulation Interest Group*. **1995**.

Oteiza P.P.; Gigola C.E.; Brignole N.B. Modelo de Transporte de los Líquidos del GN Mediante Grafos. Resumen aceptado en 9° Congreso Interamericano De Computación Aplicada A La Industria De Procesos CAIP2009, Montevideo, Uruguay, 25-28/8/**2009**.

Oteiza P.P.; Gigola C.E.; Brignole N.B. Modelo de Transporte de los Líquidos del Gas Natural. Congreso de Producción del Bicentenario. Publicado en CD-ROM (12 pág.), Salta, Argentina, 18-21/5/**2010**.

Oteiza, P.P.; Rodriguez, D.A.; Brignole, N.B. Sistema de Control para el Almacenamiento Intermedio de Gasolina Natural. *Mecánica Computacional*. XXXII: 2503-2516. **2013**.

Oteiza, P.P.; Rodriguez, D.A.; Gígola, C.E.; Brignole, N.B. Diseño de un Sistema de Control Multivariable Mediante Algoritmos Genéticos. *III Reunión Interdisciplinaria de Tecnología y Procesos Químicos RITeQ 2014*. 132-133. **2014**.

Oteiza P.P.; De Meio M.; Rodriguez D.A.; Viego V.; Brignole N.B. Metaheuristic Techniques for the Optimal Design of NGL Pipelining. *Computer Aided Chemical Engineering: 12th International Symposium on Process Systems Engineering and 25th European Symposium on Computer Aided Process Engineering*. 37, 785-790. **2015a**.

Oteiza, P.P.; Rodriguez, D.A.; Brignole, N.B. Parallel Genetic Algorithms for the Design of MIMO Control Systems. *First Pan American Congress on Computational Mechanics*. 1380-1386. **2015b**.



Parker, N. Using Natural Gas Transmission Pipeline Costs to Estimate Hydrogen Pipeline Costs. Institute of Transportation Studies. University of California. 2004.

Pérez Gosende, P. A. y Diéguez Matellán, E. L. *Métodos de Localización de Instalaciones de Producción y Servicios*. Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos” Cuba, 20, **2010**.

Peters, M.S. y Timmerhaus, K.D. *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. 4<sup>ta</sup> Ed. McGraw-Hill: New York. **1991**.

### R

Rejowski, R. y Pinto, J. M. Scheduling of a multiproduct pipeline system. *Computers & Chemical Engineering*. 27(8), 1229-1246. **2003**.

Ren, T.; Patel, M.; Blok, K. Olefins From Conventional and Heavy Feedstocks: Energy Use in Steam Cracking and Alternative Processes. *Energy*. 31, 425-451. **2006**.

Revista Petroquímica. Total y Shell Invertirán u\$s 550 Millones en Nuevos Proyectos en Vaca Muerta. <http://revistapetroquimica.com/total-y-shell-invertiran-us-550-millones-en-nuevos-proyectos-en-vaca-muerta/>, Ingreso: 12 de Marzo de 2015. **2015**.

Rodriguez, D.A.; Oteiza, P.P.; Brignole, N.B. Simulated-Annealing Optimization for Hydrocarbon Pipeline Networks. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 52 (25), 8579–8588. **2013**.

### S

Sahinidis, N. V. Optimization Under Uncertainty: State-of-the-art and Opportunities *Computers & Chemical Engineering*. 28, 971–983. **2004**.

Rios, L. M. y Sahinidis, N. V. Derivative-Free Optimization: a Review of Algorithms and Comparison of Software Implementations. *Journal of Global Optimization*. 56, 1247–1293. **2013**.

Secretaría de Energía. República Argentina. Información Estadística de Hidrocarburos. Precios de Petróleo Crudo, Gas Natural, GLP, Gasolina y Condensado (Regalías). <http://energia3.mecon.gov.ar/contenidos/verpagina.php?idpagina=3182>. Ingreso: 22 de Octubre de 2011. **2011**.

Secretaría de Energía. República Argentina. Información Geográfica. <http://sig.se.gob.ar/visor/visorsig.php?layers=a118129b62aad424cbae736f32840525,fe8a16a8a31f5a814e4d6aafcca541fa,28c92bd3f67893e8eb518816ad461a75,08e09c035b596305d35bc0f4bc4e6d3d,c7e2c347fc0ebbbce9b614b2aa40ce0f>, Ingreso: 10 de Agosto de 2012. **2012**.

Secretaría de Energía. República Argentina. Producción de Petróleo y Gas (Tablas Dinámicas), <http://energia3.mecon.gov.ar/contenidos/verpagina.php?idpagina=3299>, Ingreso 10 de Agosto de 2012. **2012**.

Secretaría de Energía. República Argentina. Reservas de Petróleo y Gas. Datos de Reservas Comprobadas y Probables de Petróleo y Gas <http://energia3.mecon.gov.ar/contenidos/verpagina.php?idpagina=3312>, Ingreso 9 de abril de 2015. **2015a**.

Secretaría de Energía. República Argentina. Producción de Petróleo y Gas (Tablas Dinámicas). <http://www.energia.gov.ar/contenidos/verpagina.php?idpagina=3299>, Ingreso 5 de Febrero de 2015. **2015b**.

Seddon, D. *Petrochemical Economics. Technology Selection in a Carbon Constrained World*. 2da Ed. Imperial College Press: London, 8, 1-31. **2010**.

Shinsky, F. G. *Process-Control Systems: Application, Design, Adjustment*. McGraw Hill: New York, **1979**.

Soltoggio, A. An Enhanced GA to Improve the Search Process Reliability in Tuning of Control Systems. *Conference Genetic and Evolutionary Computation*. 2165–2172. **2005**.

**T**

Tarhan, B.; Grossmann I.E.; Goel, V. Stochastic Programming Approach for the Planning of Offshore Oil or Gas Field Infrastructure under Decision-Dependent Uncertainty. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 48 (6), 3078-3097. **2009**.

True, W. R. Global Ethylene Production Continues in Advance in 2009. *Oil & Gas Journal*. 108.27, 34-44. **2010**.

**U**

Ulrich, G. D. y Vasudevan, P. T. *Chemical Engineering Process Design and Economics: A Practical Guide*. 2<sup>da</sup> Ed. Process Publishing. Cap. 5. **2004**.

**V**

Van der Heever, S.; Grossman, I.; Vasantharajan, S.; Edwards K. A Lagrangean Decomposition Heuristic for the Design and Planning of Offshore Hydrocarbon Field Infrastructures with Complex Economic Objectives. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 40 (13), 2857-2875. **2001**.

Viswanathan, P. K.; Toh, W. K.; Rangaiah, G. P. Closed-Loop Identification of TITO Processes Using Time-Domain Curve Fitting and Genetic Algorithms. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 40 (13), 2818–2826. **2001**.

**W**

Wei-Der Chang. A Multi-Crossover Genetic Approach to Multivariable PID Controllers Tuning. *Expert Systems with Applications: An International Journal*. 33 (3), 620–626. **2007**.

Whitley, D. A Genetic Algorithm Tutorial. *Statistics and Computing*. 4 (2), 65-85. **1994**.

Willjuice Iruthayarajan, M. y Baskar,S. Evolutionary Algorithms Based Design of Multivariable PID Controller. *Expert Systems with Applications: An International Journal*. 36 (5), 9159–9167. **2009**.

## Z

Zhang, H.; Yuanhu C.; Yuchun C. Parameter Optimization of PID Controllers Based on Genetic Algorithm. *2010 International Conference on E-Health Networking Digital Ecosystems and Technologies (EDT)*. 1 47-49. **2010**.