

**MÉTODO Y PROCEDIMIENTOS DE CLONACIÓN ARTIFICIAL DE
CONTROLADORES BASADOS EN TÉCNICAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL**

**JAVIER ANTONIO BALLESTEROS RICAURTE
ALONSO GUEVARA PÉREZ**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS COMPUTACIONALES
UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BUCARAMANGA
INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY
(MÉXICO)
BUCARAMANGA, 2006**

**MÉTODO Y PROCEDIMIENTOS DE CLONACIÓN ARTIFICIAL DE
CONTROLADORES BASADOS EN TÉCNICAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL**

**JAVIER ANTONIO BALLESTEROS RICAURTE
ALONSO GUEVARA PÉREZ**

**Proyecto de grado para optar al título de
Maestría en Ciencias Computacionales**

**Director
ANTONIO FAUSTINO MUÑOZ MONER
Ph.D. Ciencias Técnicas**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS COMPUTACIONALES
UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BUCARAMANGA
INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY
(MÉXICO)
BUCARAMANGA, 2006**

Nota de aceptación

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

Bucaramanga, 11 de julio de 2006

A Mónica, mi esposa, por su paciencia y comprensión.
A Sara, mi pequeña hija, por toda la felicidad que nos ha dado.
A mi familia.

Javier

Vitalina mi madre, por quien todo es y será posible.
Mi padre, Alejandro quien a su manera ningún estudio le será suficiente;
A mi familia y a quienes de alguna manera colaboraron para hacer posible la
culminación de esta etapa.

Alonso

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan los más sinceros agradecimientos a:

Antonio Faustino Muñoz Moner, Ph.D. en Ciencias Técnicas y director de nuestro proyecto por sus valiosas orientaciones y apoyo.

Cuerpo docente de la Universidad Autónoma de Bucaramanga y al Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey, por todos los conocimientos transmitidos.

A todas aquellas personas que de una u otra manera aportaron su conocimiento en la realización y que hacen parte de este trabajo.

RESUMEN

Los Algoritmos Genéticos son procedimientos adaptativos para la búsqueda de soluciones en espacios complejos inspirados en la evolución biológica, con patrones de operaciones basados en el principio Darwiniano de reproducción y supervivencia de los individuos que mejor se adaptan al entorno en que viven. En este trabajo se presenta un estudio sobre los Algoritmos Genéticos y la Lógica Difusa, en el desarrollo una metodología propuesta para replicar las funciones de un controlador (desconociendo su Firmware), utilizando procedimientos de obtención del conjunto de reglas de inferencia, agrupamiento difuso, para después aplicar el desarrollo del algoritmo genético simple con algunas alteraciones, buscando el objetivo del trabajo propuesto.

ABSTRACT

The Genetic Algorithms are procedures adapt for the search of solutions in complex spaces inspired by the biological evolution, with bosses of operations based on the principle Darwiniano of reproduction and survival of the individuals who better adapt to the environment in which they live. In this work one presents a study on the Genetic Algorithms and the Diffuse Logic, In the development a methodology proposed to answer the functions of a controller (not knowing your Firmware), using procedures of obtaining of the set of rules of inference, diffuse grouping, later to apply the development of the genetic simple algorithm with some alterations, looking for the aim of the proposed work.

MÉTODO Y PROCEDIMIENTOS DE CLONACIÓN ARTIFICIAL DE CONTROLADORES, BASADOS EN TÉCNICAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

La necesidad de desarrollar replicas de controladores propios de sistemas de automatización y control con alto costo de inversión y la posibilidad de aplicar técnicas de clonación artificial que permitan obtener instrumentación para estos sistemas con una reducción significativa de los gastos.

Por métodos y procedimientos de Clonación Artificial se logran replicar las funciones de los medios, instrumentación y sistemas de control a través de algoritmos que implementan Operadores Genéticos que involucran técnicas de avanzadas de inteligencia artificial.

El caso de uso “Proceso de Separación de Níquel y Cobalto” [34] donde la esencia del proceso de separación está basada en la necesidad de obtener el concentrado de sulfuros de níquel y cobalto con un mínimo de contenido de níquel y, de esta forma la parte principal del mineral ha de quedarse en el licor que pasa al siguiente proceso. Este recurso posee sistemas de control y plantas de flujo tecnológico, el presente trabajo de investigación se orienta a replicar algunos medios, instrumentación y sistemas de control y automatización; estos sistemas son multivariables por lo que se requiere replicar parte de la instrumentación (controladores) para implementarlos en otras plantas.

Desarrollar el método y procedimientos para la clonación artificial de controladores utilizados en la fabrica “Rene Ramos Latour” de Nicaro – Cuba, en la separación de níquel y cobalto, lo que permite extender la automatización a las variables y áreas tecnológicas del proceso definidas por la planta.

La modernización de las plantas de lixiviación carbonato amoniacal aplicada en la industria cubana del níquel, la precipitación de cobalto en forma de sulfuros constituye una de las etapas del proceso tecnológico, la cual se caracteriza por una baja eficiencia de la precipitación de cobalto y una alta relación níquel/cobalto en el sulfuro esto implica elevados costos de inversión, por tal motivo para lograr este objetivo es necesario introducir una tecnología novedosa basada en técnicas de clonación artificial que permita replicar medios, instrumentación y sistemas de control con gastos reducidos en maquinas, equipos y medios de automatización. Esta tecnología permite replicar funciones de cada uno de estos equipos y a través de operadores genéticos y circuitos

lógicos digitales realizar la transferencia de información (Genoma) para replicarlos e implementarlos en otras partes de la planta.

La solución brindada a través de esta tecnología de clonación artificial debe permitir disminuir hasta un 50% los gastos de inversión para la automatización total de la planta. Investigaciones similares se han desarrollado con éxito en la Refinería de Petróleo de Barrancabermeja [36], dependencia de ECOPETROL, donde se logró replicar un sensor de viscosidad para la planta de Visco Reducción logrando así un excelente desempeño de siete (7) replicas del transductor donde se aplicaron operadores genéticos para la clonación artificial y se obtuvo una disminución de los costos del 75% del valor total del sensor, para cada replica.

Solución del problema con otras variantes. La solución de este problema ha sido orientada a la introducción de sistemas de control distribuido e inteligente con variantes de control adaptativo y predictivo lo que ha permitido descomponer la tarea de control y desarrollar una descomposición jerárquica que permite aumentar la robustez de los medios, instrumentación y sistemas de control utilizados.

OBJETIVOS

Objetivo general

- Desarrollar una metodología de clonación artificial de controladores industriales basada en algoritmos genéticos, utilizando técnicas de computación evolutiva.

Objetivos específicos

- Estudiar técnicas de Computación Evolutiva para desarrollar clonación artificial de controladores industriales.
- Desarrollar el método de clonación artificial.
- Diseñar el procedimiento para que a través de algoritmos genéticos se puedan clonar controladores industriales.
- Integrar la metodología, generando sinergia entre el método y los procedimientos.
- Realizar pruebas con sistemas reales.
- Generar informes de datos experimentales sobre la investigación de clonación artificial para controladores.

RESULTADOS ESPERADOS

Método científico de clonación artificial de controladores industriales.

Procedimiento a través de Algoritmos Evolutivos para la clonación de controladores industriales.

Informe de datos experimentales obtenidos en la investigación para la clonación de controladores industriales.

Metodología de clonación artificial de controladores industriales.

Realizar pruebas del controlador clonado.

JUSTIFICACIÓN DEL TEMA

La investigación propuesta busca, mediante la aplicación de la teoría y los conceptos básicos de Inteligencia Artificial, Lógica Difusa, Algoritmos Genéticos, Controladores, procesos de sistemas de control y su aplicación, encontrar explicaciones a situaciones internas en el caso de estudio, y del entorno que afectan el sistema de control. Lo anterior permitirá en el proceso de investigación contrastar diferentes conceptos de variados autores en un proceso real que todavía no se ha contemplado.

Para lograr el cumplimiento de los objetivos de estudio, se acude al empleo de técnicas de investigación, a la consulta de diferentes autores que han utilizado las técnicas de Inteligencia Artificial en procesos como la optimización de controladores industriales y la aplicación de algoritmos genéticos en procesos de búsqueda. A través de la aplicación de procesos matemáticos, de extrapolar los resultados a Lógica Difusa y su procesamiento en MatLab®, se encuentran resultados que orientan la identificación de los valores que se necesitan para aplicar los conceptos de algoritmos genéticos; caracterizando cada uno de las variables que se utilizan y logrando que la toma de decisiones en el sistema de control aborden cada uno de los procesos reales. Así, los resultados de la investigación se apoyan en la aplicación de técnicas de metodología, de investigaciones válidas en el medio y en software que colabora para simular el proceso.

De acuerdo con los objetivos de la investigación, su resultado permite encontrar soluciones concretas a un problema real de sistemas de control, y que de una forma clara incide en la nueva dinámica de los controladores industriales.

IMPORTANCIA DEL TEMA

El primer y más importante punto es que los algoritmos genéticos 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, y si la

solución que descubren resulta subóptima, no se puede hacer otra cosa que abandonar todo el trabajo hecho y empezar de nuevo. Sin embargo, ya que los AGs 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.

Adicionalmente, los algoritmos genéticos se desenvuelven bien en problemas con un paisaje adaptativo complejo -aquéllos en los que la función de aptitud es discontinua, ruidosa, cambia con el tiempo, o tiene muchos óptimos locales. La mayoría de los problemas prácticos tienen un espacio de soluciones enorme, imposible de explorar exhaustivamente; el reto se convierte entonces en cómo evitar los óptimos locales - soluciones que son mejores que todas las que son similares a ella, pero que no son mejores que otras soluciones distintas situadas en algún otro lugar del espacio de soluciones. Muchos algoritmos de búsqueda pueden quedar atrapados en los óptimos locales: si llegan a lo alto de una colina del paisaje adaptativo, descubrirán que no existen soluciones mejores en las cercanías y concluirán que han alcanzado la mejor de todas, aunque existan picos más altos en algún otro lugar del mapa.

Como era de esperar, la demostración real del poder de la evolución que representan los AGs ha resultado sorprendente y desconcertante en algunas áreas, que siempre han afirmado que sólo un diseño inteligente, no la variación aleatoria y la selección, puede haber producido la cantidad y complejidad de información que contienen los seres vivos. Por tanto, han argumentado que el éxito de los algoritmos genéticos no nos permite deducir nada sobre la evolución biológica.

Respecto a la referencia del autor (Adam Marczyk), es interesante el punto de vista correspondiente al alcance de subóptimos en sistemas multiobjetivos, para la investigación objeto de estudio el enfoque de multioptimización orientado a la obtención de una replica funcional incluye una nueva perspectiva del problema basado en una combinación secuencial de operadores genéticos que permitan además de la optimización multiobjetivo desarrollar opciones de control robusto (insensible a perturbaciones). Sobre la clonación artificial no hay avances, es por eso el interés y la importancia de estudiar los algoritmos genéticos para mostrar que hay otros campos donde la aplicación de técnicas de inteligencia artificial son las más efectivas que las técnicas tradicionales.

CONTENIDO

RESUMEN	14	
MÉTODO Y PROCEDIMIENTOS DE CLONACIÓN ARTIFICIAL DE		
CONTROLADORES, BASADOS EN TÉCNICAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL	15	
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN	15	
OBJETIVOS	16	
Objetivo general	16	
Objetivos específicos.....	16	
RESULTADOS ESPERADOS.....	16	
JUSTIFICACIÓN DEL TEMA	17	
IMPORTANCIA DEL TEMA	17	
INTRODUCCIÓN	19	
1. ESTADO DEL ARTE	21	
1.1 VISIÓN DE LAS HERRAMIENTAS DISPONIBLES.....	22	
1.2 RECOCIDO SIMULADO.....	24	
1.3 ALGORITMOS GENÉTICOS.....	24	
1.4 ESTRATEGIAS EVOLUTIVAS.....	27	
1.5 ALGORITMOS EVOLUTIVOS.....	27	
1.6 LÓGICA DIFUSA.....	28	
1.7 CONTROLADORES.....	30	
1.8 TERMINOLOGÍA BIOLÓGICA.....	32	
1.8.1 Conceptos de Computación Evolutiva.....	34	
1.9 TEORÍA DE CONTROL.....	36	
2 METODOLOGÍA DE CLONACIÓN.....	40	
2.1 SELECCIÓN DE LOS MEDIOS Y/O SISTEMAS DE CLONAR.....	41	
2.2 DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE LA MUESTRA	41	
2.3 AGRUPAMIENTO DIFUSO ("FUZZY C-MEANS")	41	
2.3.1 Creación de clusters	43	
2.3.2 Selección de los clusters de entrada y de salida	44	
2.4 INFERENCIA DEL ALGORITMO GENÉTICO	44	
2.4.1 Creación de los cromosomas a partir de los clusters.	45	
2.4.2 Codificación del cromosoma.	46	
2.4.3 Identificación de operadores genéticos.	47	
2.4.4 Identificación de información de salida.....	47	
2.5 RESULTADOS	48	
2.6 ALGORITMO GENÉTICO PROPUESTO	48	
2.6.1 Representación.....	49	
2.6.2 Población inicial.	51	
2.6.3 Función de adecuación.....	52	
2.6.4 Operadores Genéticos.....	52	
2.6.4.1 Operador de Selección	53	

2.6.4.2	Operador de Cruce	55
2.6.4.3	Operador de mutación	55
2.6.5	Parámetros.....	56
2.7	DISPOSITIVO CLONADO	57
3	INVESTIGACIONES EXPERIMENTALES DEL PROCESO DE SEPARACIÓN DE NÍQUEL Y COBALTO COMO OBJETO DE REGULACIÓN.....	59
3.1	APLICACIÓN AL PROCESO DE SEPARACIÓN DE NÍQUEL (Ni) Y COBALTO (Co) DE LA TECNOLOGÍA CARON.....	59
3.2	RESULTADOS DE LAS INVESTIGACIONES EXPERIMENTALES EN LA INSTALACIÓN INDUSTRIAL	60
3.3	RESULTADOS DE LAS INVESTIGACIONES EN LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL.....	64
3.3.1	Estudio de la cinética de la sedimentación selectiva de sulfuros de cobalto a partir de los licores carbonato – amoniacaes.	65
3.3.2	Influencia del gasto de reactivos sobre el proceso de separación de cobalto	66
3.3.3	Influencia del gasto de semilla en el proceso de separación de cobalto.	73
4	METODOLOGÍA DE APLICACIÓN AL PROCESO DE SEPARACIÓN DE NÍQUEL Y COBALTO.....	76
4.1	DESCOMPOSICIÓN DE LA TAREA DE SÍNTESIS ESTRUCTURAL DEL SISTEMA DE DIRECCIÓN DEL PROCESO.....	76
4.2	METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE LOS SUBSISTEMAS ESTABILIZADORES DE FRECUENCIA MEDIA	80
4.2.1	Realización practica del sistema de dirección del proceso teniendo en cuenta las circunstancias mencionadas anteriormente.....	81
4.2.2	Compensador ideal.....	82
4.3	ALGORITMOS PARA LA COMPENSACIÓN DE PERTURBACIONES Y SU AUTORREGULACIÓN	82
4.4	CARGA INFORMATIVA DE LA DIRECCIÓN DE ACCIÓN SOBRE LA VARIACIÓN DEL RÉGIMEN DE SEDIMENTACIÓN	90
5	METODOLOGÍA APLICADA DE CLONACIÓN ARTIFICIAL DE CONTROLADORES	97
5.1.	SELECCIÓN DEL SISTEMA (CASO DE ESTUDIO).....	97
5.1.1	CONTROL DE SUPERVISIÓN	100
5.2.	VOLUMEN DE LA MUESTRA.....	101
5.3.	AGRUPAMIENTO DIFUSO	102
5.4.	INFENRENCIA DEL ALGORITMO GENÉTICO	110
5.4.1	Creación de los Cromosomas	111
5.4.2	Codificación de los cromosomas.....	111
5.4.3	Operadores Genéticos.....	111
5.4.4	Identificación de valores de salida	111
5.5.	RESULTADOS	112
6	CONCLUSIONES	118

7	TRABAJOS FUTUROS	119
	BIBLIOGRAFÍA	120

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Diagrama de flujo de la metodología para el diseño de un sistema borroso.	30
Figura 2.1. Metodología de Clonación.....	40
Figura 2.2. Proceso de agrupamiento, por conjunto borrosos.....	42
Figura 2.3. Función de pertenencia de tipo campana de gauss.	43
Figura 2.4. Representación de la información en grados de pertenencia.	44
Figura 2.5. Cluster por variable.	44
Figura 2.6. Estructura general del Algoritmo.	45
Figura 2.7. Representación del cromosoma, con antecedentes y consecuentes..	46
Figura 2.8. Tipos de codificación del cromosoma.	47
Figura 2.9.. Proceso de decodificar la información para obtener los resultados ...	48
Figura 2.10. Estructura de un Algoritmo Genético.....	50
Figura 2.11. Proceso completo del sistema de clonación.....	58
Figura 3.1 Relación entre el gasto necesario de reactivo y el contenido de Co en el licor inicial para mantener la concentración de Co del licor de salida del reactor igual a 10mg/l.....	60
Figura 3.2 Relación entre el contenido de Co a la salida del reactor y el gasto específico del reactivo a las diferentes concentraciones de Ni en el licor inicial: 4.8g/l y 0.12g/l.	61
Figura 3.3 Relación entre la concentración total de Co del licor de salida del reactor y el gasto específico de reactivo a diferentes concentraciones de Co^{+3} en el licor inicial.	61
Figura 3.4 Relación entre el contenido residual de Co en el licor de salida del reactor y el gasto de reactivo para diferentes temperaturas del licor inicial.	62
Figura 3.5 Relación del contenido de Ni residual en el licor de salida del reactor y el gasto específico de reactivo para diferentes temperaturas del licor inicial.	63
Figura 3.6 Dependencia de la capacidad energética de transportación de semillas.	64
Figura 3.7 Relación cinética de la variación de Co residual en el licor para la sedimentación en el reactor.	67
Figura 3.8 Relación cinética de la variación del contenido de Co^{+3} residual para la sedimentación en el reactor tubular.	67
Figura 3.9 Relación entre el contenido de Co residual en el licor de salida del reactor y el gasto de reactivo para diferentes gastos de semilla.....	68
Figura 3.10 Relación entre el contenido de Co en el licor de salida de reactor y el gasto de reactivo para diferentes gastos de semillas.....	68
Figura 3.11 Relación entre el contenido de Co del reactor y el gasto de reactivo para diferentes gastos de semillas a la salida del sedimentador.....	69

Figura 3.12 Relación entre el contenido de Co residual en licor de salida del reactor y el gasto de reactivo para diferentes gastos de semillas a la entrada del reactor.	69
Figura 3.13 Relación entre el gasto de reactivo y el gasto de semilla para 60mg/l de Co residual en el licor de salida del reactor de acuerdo a diferentes valores de concentración en el licor inicial.....	70
Figura 3.14 Relación entre el gasto de reactivo y el gasto de semilla para 40mg/l de Co residual a la salida del reactor y diferentes concentraciones en el Co en el licor inicial.	71
Figura 3.15 Relación entre el gasto de reactivo y el gasto de semilla para una concentración de Co=10mg/l según valores de concentración de Co en el licor inicial.	71
Figura 3.16 Relación entre el gasto de reactivo y semilla para la concentración constante de Co residual igual a 60mg/l a la salida del espesador según valores de concentración de Co en el licor inicial	72
Figura 3.17 Relación entre el gasto de reactivo y semilla para 40mg/l de Co residual a la salida del espesador según su variación en el licor inicial.....	72
Figura 3.18 Relación entre gastos de reactivo y semilla para 10mg/l de Co residual en el licor de salida del espesador según diferentes concentraciones de Co en licor inicial.	73
Figura 3.19 Relación entre el gasto óptimo de semillas y el contenido de Co en el licor inicial para mantener la concentración de Co residual del licor de salida del espesador a un valor determinado.....	74
Figura 4.1- Estructura del Seudosistema	83
Figura 4.2- Compensador ideal.....	84
Figura 4.3. X_1 --- Co	85
Figura 4.4. X_3 --- Co	86
Figura 4.5. Q --- Co	86
Figura 4.6. X_4 --- Co	87
Figura 4.7. X_2 --- Co	87
Figura 4.8- Densidad espectral de la compensación incompleta.	95
Figura 4.9 – Características transitorias del modelo imitador, la perturbación en forma de saltos en el momento $t=0$ para el gasto dado de semillas entregado al reactor.	95
Figura 4.10 – Relación entre la dispersión de la variación del contenido de Co en el reboso del sedimentador D_{fo} y los valores T_n y t_n en el lazo de retroalimentación	96
Figura 5.1. Esquema tecnológico del proceso de separación de níquel y cobalto en la fábrica “Rene Ramos Latour” de Nicaro – Cuba.	98
Figura 5.2. Sistema de control supervisito [50].....	101
Figura 5.3. Representación función de membresía gaussina.....	103
Figura 5.4. Modelo del Nivel 1 en Fuzzy Inference System.....	104
Figura 5.5. Conjunto de variables del Nivel 1, Rule Viewer.....	105
Figura 5.6. Sourface Nivel 1.	105
Figura 5.7. Modelo del Nivel 2 en Fuzzy Inference System.....	106
Figura 5.8. Conjunto de variables del Nivel 2, Rule Viewer.....	106

Figura 5.9. Sourface Nivel 2.	107
Figura 5.10. Modelo del Nivel 3 en Fuzzy Inference System.....	107
Figura 5.11. Conjunto de variables del Nivel 1, Rule Viewer.....	109
Figura 5.12. Sourface Nivel 3.	110
Figura 5.13. Sistema de clonación con una población de 500 individuos.....	112
Figura 5.14. Sistema de clonación con una población de 500 individuos, aplicando cruce y mutación.....	113
Figura 5.15. Sistema de clonación con una población de 1000 individuos.....	113
Figura 5.16. Sistema de clonación con una población de 1000 individuos, aplicando cruce y mutación.	114
Figura 5.17. Sistema de clonación con una población de 1800 individuos.....	114
Figura 5.18. Sistema de clonación con una población de 1800 individuos, aplicando cruce y mutación.	115
Figura 5.19. Error del sistema de clonación, para una población de 500 individuos.	116
Figura 5.20. Error del sistema de clonación con una población de 1800 individuos.	117
Figura 5.21. Error del sistema de clonación con una población de 1800 individuos, aplicando los operadores de cruce y selección.	117

LISTA DE TABLAS

Tabla 4.1. Valores de los coeficientes de extinción (amortiguamiento) y dispersión de las principales perturbaciones.....	78
Tabla 4.2. Valores de los parámetros del modelo linealizado del proceso de separación de Ni y Co.....	88
Tabla 4.3. Valores de la variaciones cuadráticas medidas de la concentración de Co y la efectividad del compensador.....	89
Tabla 4.4. Variación de la efectividad (E_{ik}) del compensador para variaciones de los valores iniciales de los parámetros del modelo matemático del objeto de regulación y del filtro de perturbaciones.	90

INTRODUCCIÓN

El motivo fundamental del trabajo de tesis, está relacionado con el interés de poder abarcar áreas distintas dentro de la teoría de control y las técnicas de Inteligencia Artificial, y poder lograr aplicación y resultados, prescindiendo para tal, del desarrollo analítico formal presente en la literatura especializada. La comunidad de control se ha interesado en aplicar los Algoritmos Genéticos (AG) a problemas de Ingeniería de Control de Sistemas; basados en modelos computacionales de la evolución biológica natural, los algoritmos genéticos pertenecen a la clase de algoritmos evolutivos, que también incluyen la programación evolutiva, la evolución de estrategias y la programación genética.

Existen problemas de optimización cuyos espacios de búsqueda son tan grandes que los algoritmos clásicos más eficientes para resolverlos requieren un tiempo exponencial. Es precisamente en estos casos en los que las heurísticas tienen especial relevancia. Las técnicas evolutivas, como heurísticas en sí, han demostrado su capacidad para demostrar soluciones casi óptimas en dicho tipo de problemas. Sin embargo, por su misma naturaleza, su comportamiento no es del todo conocido, es decir, no se conoce a ciencia cierta las condiciones bajo las cuales tendrán éxito o fracaso. Este es el caso, en particular, de los Algoritmos Genéticos.

Sin embargo, dado que es común enfrentarnos en la vida cotidiana a problemas en los que nos interesa optimizar más de un objetivo (por ejemplo repartir el mayor número de objetos con el menor costo posible), como era de esperarse, se trabajó en numerosas extensiones del AG clásico para dar lugar a lo que ahora se conoce como AG Multiobjetivo. Actualmente existen también múltiples variantes de este nuevo algoritmo, y se han hecho algunos esfuerzos por modelarlo teóricamente, aunque éstos han sido de alcance muy limitado hasta ahora.

En el presente trabajo, se lleva a cabo un estudio de algunos aspectos teóricos relacionados con la convergencia del Algoritmo Genético Simple que ofrece, por tanto, un campo de pruebas para diseñar y evaluar el arquetipo de Clonación Artificial, donde por medio del AG se busca clonar las funciones de un sistema, desconociendo el firmware de los dispositivos de control.

El contenido de la tesis se encuentra distribuido en seis capítulos. Inicialmente se presenta un capítulo donde se enseña la justificación e importancia del tema, también está dedicado a un breve estado del arte de las distintas metodologías relacionadas con el contenido de la tesis. En el capítulo dos, se presentan las técnicas que se utilizan para el desarrollo del proyecto; iniciando por computación evolutiva, teoría de control,

lógica difusa, algoritmos genéticos, para terminar con la propuesta de la metodología de clonación artificial, describiendo cada uno de sus pasos y profundizando en el algoritmo genético que se plantea desarrollar con objetivo primario en esta tesis.

Los capítulos tres y cuatro, describen el proceso del sistema de control que se toma como caso de uso; explicando cada uno de sus procesos y en especial el de separación del níquel y el cobalto, presentando las metodologías que se utilizan y los resultados de dichos procesos.

El capítulo cinco, es el desarrollo de la metodología de clonación artificial; en este capítulo se presentan los pasos y resultados obtenidos al aplicar las diferentes técnicas propuestas y como se combinan para obtener el resultado esperado.

Por último, el capítulo seis, se divide en dos partes: las conclusiones obtenidas durante todo el proceso de desarrollo de la tesis y las recomendaciones que se desprenden al analizar la metodología planteada y que líneas futuras pueden aportar para que esta investigación pueda continuar con mayores logros.

1. ESTADO DEL ARTE

La hipótesis fundamental de la selección natural como principio básico de la evolución fue formulada por Charles Darwin mucho antes que se descubriesen los mecanismos genéticos. Ignorando los principios básicos de la herencia, Darwin [8] postuló una fusión o mezcla hereditaria, suponiendo que las características paternas (maternas) se mezclasen como fluidos en el organismo descendiente. Esta teoría de selección suscitó serias objeciones, inicialmente levantadas por F. Jenkins: los cruces rápidamente llevarían al nivelamiento de las distintas características, y no es posible seleccionar en poblaciones homogéneas (hecho conocido como “pesadilla de Jenkins”).

Hubo que esperar hasta 1865, cuando G. Mendel descubrió el principio básico de la transferencia de los factores hereditarios de los padres para los descendientes, lo que demostró la naturaleza discreta de estos factores, y fue entonces cuando se pudo explicar la “pesadilla de Jenkins”, ya que debido a la naturaleza discreta de los factores, no podrá ocurrir la disolución de las distinciones hereditarias.

Las leyes de Mendel se hicieron conocidas por la comunidad científica después de ser redescubiertas independientemente por H. de Vries, K. Correns y K. von Tschermak en 1900. La Genética fue completamente desarrollada por T. Morgan y sus colaboradores, que probaron experimentalmente que los cromosomas son los principales vehículos de la información hereditaria y que los genes que representan los factores hereditarios, están alineados en cromosomas. Mas tarde, hechos experimentales acumulados mostraron que las leyes de Mendel eran verdaderas para todos los organismos reproducibles sexualmente.

Después de redescubiertas las leyes de Mendel y la teoría de la selección natural de Darwin, permanecieron independientes, como conceptos dispares. Llegaron a ser considerados como opuestos entre sí. Fue a partir de los años 1920 (ver por ejemplo el trabajo clásico de Cetverikov) que quedó probado que la genética de Mendel y la teoría de la selección natural de Darwin no son conflictivas entre sí, surgiendo de su casamiento feliz la moderna teoría de la evolución.

Los efectos de la evolución sobre los seres vivos a lo largo de millones de años, es el mayor testimonio de cómo este mecanismo natural produce soluciones, entendiéndose como tales, la adaptación de las especies y su supervivencia ante factores adversos del medio ambiente.

La evolución en el sentido darwiniano, es intrínsecamente un mecanismo robusto de búsqueda y optimización. Individuos producidos bajo sus leyes demuestran comportamiento adecuado con nivel de complejidad suficiente para superar las

dificultades de su entorno a todos los niveles: celular, orgánico individual y poblacional. Las especies biológicas han resuelto problemas cuya complejidad no puede manejarse por las técnicas clásicas de diseño y optimización [8], [9].

Las teorías evolutivas aceptadas de forma mas amplia son relativas al paradigma neo-darwiniano. Este paradigma afirma que la historia de la vida puede contarse a través de procesos de transformación operando sobre y dentro de poblaciones de individuos de especies diversas. Los procesos ambientales externos o internos pueden clasificarse como: reproducción, mutación, competición y selección.

Este paradigma según Mayr, posee como principales características:

- La selección tiene como meta el individuo
- Las variaciones genéticas son en gran parte un proceso aleatorio. Los procesos estocásticos juegan un papel muy importante en la evolución.
- La variación del genotipo es principalmente producto de la recombinación y tan sólo en detalles, de la mutación.
- La evolución gradual puede incorporar discontinuidades fenotípicas.
- No necesariamente todos los cambios fenotípicos son la consecuencia de la selección natural ad hoc.
- Evolución es un cambio en la adaptación y en la diversidad y no apenas un mero cambio en dispersiones genéticas.
- La selección es probabilística y no determinística.

Reproducción es una propiedad obvia pudiendo ser sexuada o asexuada. Las especies poseen un potencial de reproducción proporcional al número de individuos de la población idónea a cada instante, lo que de acuerdo con la ley del crecimiento orgánico (Isaac Newton [1642-1727]) hace que la población crezca exponencialmente desde que todos los individuos idóneos puedan reproducirse con éxito y posean un cierto tiempo de permanencia. La reproducción se efectúa con la transferencia de la información genética individual para los descendientes.

Mutación modela los aspectos no deterministas del proceso evolutivo, por cuanto perturba las replicas, pudiendo introducir aspectos inexistentes en los generadores.

Competición es consecuencia de la expansión poblacional bajo recursos limitados.

Selección es el resultado natural del conflicto presente al contar con recursos limitados y posibilidad de reproducción de los más aptos.

1.1 VISIÓN DE LAS HERRAMIENTAS DISPONIBLES

La ingeniería en sus diversas instancias, trata de desarrollar modelos de los procesos de interés (social, económico, etc.) para después, a través de herramientas y metodologías adecuadas, poder extraer resultados útiles en algún sentido. El modelado puede efectuarse apoyándose en las leyes físicas que rigen, bajo condiciones determinadas, las interacciones entre los diversos subsistemas que componen el proceso, e inclusive pueden obedecer relaciones empíricas elaboradas como fruto de la observación y experiencia (relaciones estadísticas, borrosas, etc.). Las relaciones pueden poseer carácter estático cuando no interviene el tiempo como parámetro modelador, o dinámico cuando dependen de éste. La extracción de resultados de un modelo está asociada a la determinación de valores paramétricos de variables conocidas como variables de estado del proceso. Estos valores pertenecen u obedecen al conjunto de las restricciones que definen el proceso y que configuran el espacio de soluciones viables.

Para nuestros propósitos supondremos un conjunto de restricciones consistente, o sea, que posee por lo menos un punto interior que las satisface a todas simultáneamente. De modo general suele adoptarse una medida sobre estos puntos, recibiendo el nombre de función objetivo del problema. La extracción de resultados se efectúa utilizando herramientas que saquen ventaja del tipo de formulación efectuada.

Efectuando una rápida taxonomía de los modelos y métodos de resolución, enfocando las herramientas de resolución, se obtiene la clasificación:

1. Modelado Analítico. Formulación clásica. Consiste en técnicas que utilizan un conjunto de condiciones necesarias y suficientes que deben ser satisfechas por las presuntas soluciones determinadas. Hay dos grandes grupos a considerar, a saber:

Técnicas directas. Las técnicas directas buscan la determinación de puntos en que la función objetivo alcance un máximo (relativo), efectuando movimientos en el espacio de estados permitidos o viables, en la dirección apuntada por el gradiente de la función objetivo, hasta alcanzar un punto en que se verifiquen las condiciones estacionarias que caracterizan un mínimo (máximo) local. Está claro que la obtención del gradiente o de hiperplanos separadores que linealicen las restricciones actuantes sólo será posible en casos en que el modelo se haya formulado a través de ecuaciones continuas de derivada continua [23]. Hay extensiones modernas de estas técnicas que pueden incorporar discontinuidades en el gradiente pero sin prescindir de la convexidad como garantía de éxito.

Técnicas indirectas. Estas técnicas consisten en resolver el sistema no lineal de ecuaciones que surge al establecer la condición necesaria para mínimo (máximo) local, o sea, satisfacer la condición de gradiente nulo. En los problemas con restricciones, éstas se incorporan a través de la técnica de los multiplicadores de Lagrange. Así como

en el caso de las técnicas directas, las funciones deben gozar de cierto grado de regularidad.

2. Modelado Algebraico. Técnicas enumerativas. Los modelos en este caso pueden representarse por grafos. Otras propiedades de regularidad están ausentes (descripción por tablas) o no se utilizan. Las decisiones de búsqueda se efectúan apenas sobre los valores de las funciones objetivo y restricciones. Las técnicas de búsqueda suelen ser muy sencillas pero el volumen de cálculo por efectuar, mismo en problemas sencillos, suele ser muy importante. La Programación Dinámica es el ejemplo típico de las técnicas enumerativas [22].

3. Técnicas Heurísticas. Son básicamente técnicas enumerativas que utilizan información adicional para dirigir la búsqueda. Son técnicas generales con las que se pueden tratar modelos formulados en cualquiera de las formas ya consideradas. Las principales vertientes desde el punto de vista algorítmico en este momento son:

1.2 RECOCIDO SIMULADO

Utiliza el modelo de evolución termodinámica de un sistema físico evolucionando en dirección a los estados de energía mínima. Este método elimina las principales desventajas de los métodos directos, pues las soluciones no dependen más de los puntos iniciales escogidos, ni deben estar próximas al punto óptimo. Esto se consigue introduciendo una probabilidad p de aceptación (substitución del punto actual por un punto nuevo): $p = 1$, si el nuevo punto proporciona un valor mejor para la función objetivo, siendo $p > 0$ en los demás casos. En estos casos, la probabilidad de aceptación p es una función de los valores de la función objetivo para el punto actual y el nuevo punto, y un parámetro adicional de control, frecuentemente llamado de temperatura T . De modo general, cuan menor fuere T , menores serán las posibilidades de aceptación de un nuevo punto. Durante la ejecución del algoritmo, la temperatura T del sistema se decrementa en valores discretos. El algoritmo cesa para un valor de T lo suficientemente reducido, en que no se acepten mas nuevos cambios [21].

1.3 ALGORITMOS GENÉTICOS

Los algoritmos genéticos son mecanismos de búsqueda basados en las leyes de la selección natural y de la genética. Combinan la supervivencia de los individuos mejor adaptados junto con un intercambio aleatorio de información, lo que le da al algoritmo un aire de búsqueda biológica. Fueron desarrollados por John Holland y su equipo de estudiantes de la Universidad de Michigan. Las metas que se proponían eran: explicar rigurosamente los procesos adaptativos y diseñar nuevos sistemas artificiales que sigan manteniendo los mecanismos de los sistemas naturales [16] y [3].

Se parte, inicialmente, de un conjunto de individuos, la población, y de una función que evalúa su eficacia para el problema concreto y que es la función que se desea optimizar. Al valor que se asigna a cada individuo a partir de esta función se le denomina salud.

Las características principales son:

- Los algoritmos genéticos no trabajan directamente con los objetos, sino con la codificación de esos objetos, que pueden ser un número, un conjunto de parámetros, entre otros. A esta codificación le llamamos cromosoma. Concretamente, en nuestro trabajo, hemos representado a cada individuo por un cromosoma definido por una sucesión de 0 y 1, que representan los coeficientes del modelo paramétrico.
- Los algoritmos genéticos realizan la búsqueda mediante toda una generación objetos, no buscan un único elemento.
- Los algoritmos genéticos utilizan una función objetivo que nos da la información de lo adaptados que están los individuos, y no las derivadas u otra información auxiliar.
- Las reglas de transición son probabilísticas, no determinísticas.
- Los mecanismos de los algoritmos genéticos simples son sorprendentemente fáciles, dado que los mecanismos que utiliza son el mecanismo de copia y el de intercambio de partes de las cadenas de cromosomas.

En cada generación un conjunto de nuevos individuos se forma utilizando partes de la información de los cromosomas de los individuos mejor adaptados de la generación anterior. Los algoritmos genéticos no son sólo una simple búsqueda aleatoria, ya que utilizan de forma eficiente la información histórica de las generaciones anteriores para indagar nuevos caminos de búsqueda que mejoren los resultados anteriores.

El por qué este mecanismo funciona es algo más sutil, y el efecto combinado de simplicidad de la operación y la potencia de su efecto son dos de las principales atracciones de la aproximación mediante algoritmos genéticos.

Algunos de los principales atractivos de los algoritmos genéticos como método de optimización son:

- Se pueden utilizar como método de optimización global o semi-local, según interese.
- No hace uso de ningún gradiente, ni conceptos similares. Por lo que se puede usar con señales con mucho ruido, en las que no tiene sentido las ideas asociadas a la derivada. No obstante, si las funciones son derivables, los algoritmos genéticos se pueden usar en la primera fase de minimización, para encontrar las cuencas de atracción, y a continuación utilizar, por ejemplo, un método basado en el gradiente.

- Se pueden utilizar en línea.

Estos procedimientos actualmente se conocen como algoritmos genéticos y poseen la implementación típica:

- (a) La configuración del problema por resolver debe poseer su bondad descrita a través de una función objetivo cuyo valor para una configuración determinada indique el grado de adecuación (fitness) de la propuesta.
- (b) Se construye una población de posibles soluciones viables. Cada solución viable es codificada como una cadena conocida por el nombre de cromosoma, con elementos básicos conocidos como genes, permitiendo cambios posicionales entre éstos en las localizaciones específicas conocidas como alelos. Holland sugirió que estas soluciones fuesen representadas a través de cadenas binarias. Esta representación fue ampliamente adoptada debido a la aritmética binaria operativa en los computadores.
- (c) Cada cromosoma se reproduce con una probabilidad asociada, de forma que la oportunidad de ser escogido sea proporcional a su adecuación relativa a los demás cromosomas en la población. Siendo la adecuación un número positivo, su valor, después de normalizado en relación a la población, puede asociarse a una probabilidad y sobre ella, efectuarse un sorteo.
- (d) Un conjunto de individuos (cromosoma) es seleccionado probabilísticamente de acuerdo con las probabilidades para que a través de cruces entre dos homólogos (parents) se generen dos descendientes (offsprings) efectuando cambios entre los contenidos genéticos de los padres (crossover) y mezclando sus características para generar los cromosomas de los descendientes. Se actúa sobre la nueva población con operadores que simulan las posibles imperfecciones en la elaboración de replicas (mutación) que actúa probabilísticamente pero con baja incidencia.
- (e) El proceso termina, cuando se haya obtenido un representante que satisfaga los requisitos necesarios o cuando los recursos disponibles para el algoritmo se hayan agotado.

El algoritmo genético enfatiza la importancia de la cruce sexual (operador principal) sobre el de mutación, y usa selección probabilística. El algoritmo básico es el siguiente:

- Generar (aleatoriamente) una población inicial.
- Calcular aptitud de cada individuo.
- Seleccionar en base a aptitud.

- Aplicar operadores genéticos para generar la siguiente población.
- Ciclar hasta que cierta condición se satisfaga.

Para poder aplicar el algoritmo genético se requiere de los cinco componentes básicos siguientes:

- Una representación de las soluciones potenciales del problema.
- Una forma de crear una población inicial de posibles soluciones.
- Una función de evaluación que juegue el papel del ambiente, clasificando las soluciones en términos de su aptitud.
- Operadores genéticos que alteren la composición de los hijos que se producirán para las siguientes generaciones.
- Valores para los diferentes parámetros que utiliza el algoritmo genético (tamaño de la población, probabilidad de cruce, probabilidad de mutación, número máximo de generaciones).

1.4 ESTRATEGIAS EVOLUTIVAS

Los conceptos fundamentales de los procedimientos heurísticos incluyen: construcción de soluciones, perturbación de soluciones, repetición de procedimientos, criterios de reinicio, procedimientos de parada. El principio básico es el de moverse de una solución para otra solución.

La adopción de las Estrategias Evolutivas y los Algoritmos Genéticos como herramienta idónea para la obtención de resultados en este ámbito, se debe a su sencillez de paradigma, sus éxitos en la búsqueda y determinación de resultados aceptables sobre un corpus de problemas heredero de todos los aspectos inconvenientes desde el punto de vista clásico, y de los aspectos necesarios y deseables desde el punto de vista moderno. Sus características de desempeño en el tratamiento de problemas cuya solución comporta el uso de técnicas de hill - climbing las hacen especialmente atractivas.

Los algoritmos surgieron de la necesidad de resolver problemas en el área de hidrodinámica experimental relacionados con optimización de formas. Rechenberg desarrolló una teoría para la velocidad de convergencia para el problema básico conocido como de tipo (1+1) –EE, que consiste en un mecanismo sencillo de mutación – selección aplicado sobre un individuo que origina un descendiente a cada época a través de un proceso gaussiano, proponiendo también una regla exógena posteriormente confirmada del punto de vista teórico, para cambio de la desviación de esta distribución gaussiana.

1.5 ALGORITMOS EVOLUTIVOS

A lo largo de las tres últimas décadas se desarrollaron procedimientos que inspirados en el proceso de evolución natural, originaron algoritmos computacionales muy robustos, para la determinación de máximos y mínimos en espacios complejos y de tratamiento bastante limitado por las técnicas clásicas consagradas. Así mismo surgen versiones drásticamente simplificadoras de la riqueza de los procesos naturales, los llamados Algoritmos Evolutivos se pueden considerar ya como piezas esenciales en el tratamiento de problemas complejos [30].

Los Algoritmos Evolutivos [13] se basan en el proceso de aprendizaje o adecuación colectiva que se verifica en el seno de una población de individuos, cada uno de los cuales representa una solución potencial para un problema particular. La población es arbitrariamente inicializada y evoluciona dirigiéndose cada vez mas dentro de regiones mejores del espacio viable utilizando para ello a cada etapa o generación las transformaciones de:

- selección determinística o probabilística
- mutación necesaria en los algoritmos evolutivos
- cruce inexistente en algunas realizaciones algorítmicas
- valoración calidad de la solución individual

1.6 LÓGICA DIFUSA

La teoría de conjuntos difusos tiene su origen a mediados de los 60, desarrollada por Lotfi A. Zadeh [38] en la universidad de California. Existe un gran número de investigadores que desde un principio han reconocido el potencial de los conjuntos difusos para modelizar y resolver numerosos problemas del mundo real.

Sin embargo, también han existido otros investigadores que en los primeros años han cuestionado la validez de esta técnica. La situación cambia desde mediados de los 80, cuando ocurre un cambio, principalmente en Japón y Europa, que consistió en el lanzamiento de aplicaciones de control basadas en lógica difusa desarrolladas por Mamdani, Sugeno, Takagi y otros autores.

La lógica difusa puede ser descrita como un sistema interpretativo, en el cual los objetos o elementos son relacionados con conjunto de fronteras no nítidamente definidas, otorgándoles un grado de pertenencia relativa o graduada y no estricta como es de costumbre en la lógica tradicional. En un sentido más amplio se podría decir que existe una especie de interpolación entre una frontera y otra, o bien, entre un conjunto y otro.

Permite tratar información imprecisa, como estatura media, temperatura baja, en términos de conjuntos difusos. Estos conjuntos difusos se combinan en reglas para definir acciones. De esta manera los sistemas de control difuso basados en lógica

difusa combinan unas variables de entrada, por medio de grupos de reglas que producen uno o varios valores de salida.

La teoría de conjuntos difusos o borrosos, parte de la teoría clásica de conjuntos, añadiendo una función de pertenencia al conjunto, definida ésta como un número real entre 0 y 1. Así, se introduce el concepto de conjunto borroso asociado a un determinado valor lingüístico, definido por una palabra, adjetivo o etiqueta lingüística.

Lo anterior, ha permitido incorporar sentencias del lenguaje común, las que caracterizan por ser un tanto indefinidas, para interpretar el estado de las variables de cierto proceso, asignándoles en cada momento un grado de pertenencia a estos conjuntos borrosos. Esta interpretación puede ser fácilmente relacionada mediante operadores lógicos tradicionales con ciertas medidas de acción, también de naturaleza no exacta, que son diseñadas de tal manera que produzcan un cambio deseado en las variables de interés.

La deligación difusa, es decir, la descripción mediante modelos difusos de sistemas del mundo real, se convierte por tanto en una técnica fundamental, tanto para aplicaciones científicas, como de ingeniería. Existen diversas técnicas para realizar modelos difusos.

Modelización difusa: los conceptos de la teoría de conjuntos difusos pueden emplearse para modelizar sistemas de diversas formas. Diversos aspectos de ingeniería y teoría de sistemas pueden llevarse al campo difuso dando como resultado distintas clases de modelos difusos.

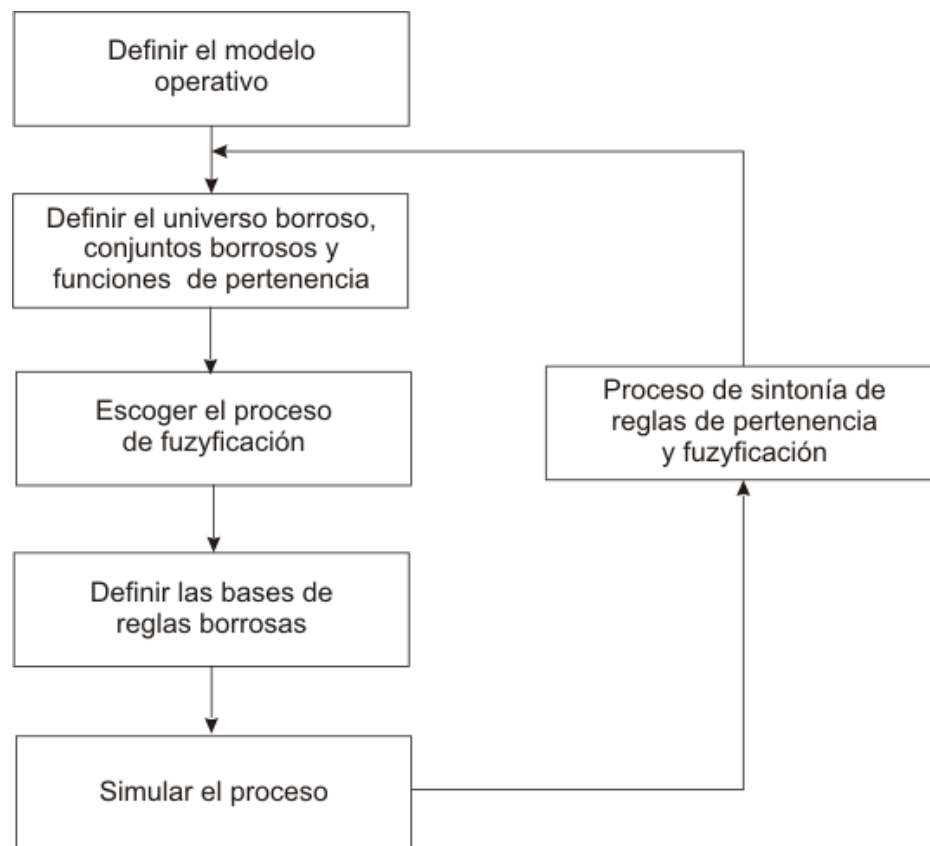
Para realizar un modelo difuso existen dos fases fundamentales:

1. Identificación de variables: en esta fase se identifican qué variables de entrada son significativas para calcular la salida del modelo. Esto permite descartar variables de entrada que no resultan significativas, por ser ruido o combinación de otras variables.
2. Identificación de la estructura: una vez se han identificado las variables de entrada al sistema, el siguiente paso consiste en identificar la estructura del propio modelo difuso. Dentro de esta fase se debe elegir el tipo de modelo difuso y los parámetros de dicho modelo.

La lógica borrosa viene siendo utilizada con éxito en el propósito de modelar y/o controlar procesos complejo, que no puedan ser fácilmente tratados a través de la elaboración de un modelo matemático, que se valga de las leyes físicas y relaciones algébricas pertinentes [11].

En la figura 1.1 puede observarse el flujo de una metodología típica para diseño de un sistema borroso. Como primer paso entra el entendimiento de la dinámica del proceso a controlar, mismo que en el caso del tratamiento borroso, se pueda efectuar un modelamiento menos exacto, expresándolo solo como estimativas de ganancia, retrasos y orden del sistema. El paso siguiente consiste en definir las fronteras del universo de discurso borroso, y del número de particiones que soporta. En seguida se pasa a la definición de las funciones de pertenencia en cada partición, así como también la forma de las funciones de pertenencia.

Figura 1.1. Diagrama de flujo de la metodología para el diseño de un sistema borroso.



El tercer paso en el proceso de diseño es la decisión del método de fuzificación y defuzificación. Este paso puede considerarse como el proceso de cuantificación y escalado de las relaciones existentes entre las variables borrosas.

El cuarto paso consiste en determinar las reglas lingüísticas que forman la base de conocimiento borroso [38].

1.7 CONTROLADORES

La función del controlador en un sistema es elaborar la acción de control sobre la planta a partir de señales que se hacen pasar a la entrada de la misma.

El controlador a lógica difusa (FC) utiliza el mecanismo de inferencia para elaborar dicha acción de control, que se denomina “salida” del controlador, mientras que la dinámica de la planta se describe de manera implícita mediante las reglas de implicación, donde las variables del antecedente son los valores lingüísticos de magnitudes medidas u observadas de la planta, y se denominan “entradas” del mismo.

Para el sistema de control con lazo de retroalimentación se utilizan como entradas:

El error: $e(k) = \text{Referencia} - \text{Variable controlada}(k)$

La variación del error: $r(k) = e(k) - e(k-1)$

El error acumulado: $e(k) = \sum e(i)^k$, donde “k” es el instante de muestreo.

El problema de la estabilidad del sistema de control difuso no ha encontrado solución todavía. El garantizar la estabilidad de sistemas no lineales (cualquier planta con controlador difuso es no lineal por excelencia) es un problema muy complicado, cuyo análisis presenta grandes dificultades sobre todo porque no admite generalizaciones.

En la literatura han aparecido los desarrollos teóricos de varios autores (Driankov, Hellendoorn, Reimnfrank (1993) o Passino y Yurkovich (1998)) así como cuatro métodos (funciones de Liapwiov, Popov, círculo y conicidad), pero todos ellos han tenido los resultados muy conservadores en su aplicación práctica.

Otra vía de garantizar la estabilidad es linealizar el controlador fuzzy y aplicar los métodos del diseño lineal a esta aproximación; este enfoque ha tenido resultados positivos a pesar de profunda fundamentación teórica.

Una de las ventajas de la lógica difusa en el ámbito de sistemas de control consiste en que esta no requiere del estudio directo de la dinámica de la planta, sino que las reglas de control se buscan por otras vías, entre las cuales se puede mencionar (Takagi and Sugeno en Lee, 1990).

El modelo del proceso basado en la lógica difusa se base en reglas sobre las variables lingüísticas se considera como el modelo inverso del proceso controlado, por ende las reglas de control pueden obtenerse invirtiendo el modelo del proceso. Este método es aplicable solo a sistemas de bajo orden, pero permite obtener la solución explícita, dado el caso de que el modelo del lazo abierto y cerrado sea válido (Braac and Rutherford en

Lee, 1990). Otro enfoque es la identificación con lógica difusa (Tong, Takagi and Sugeno, 1990; Pedrycz, 1993).

1.8 TERMINOLOGÍA BIOLÓGICA

El Acido Desoxirribonucleico (ADN) es el material genético fundamental de todos los organismos vivos. El ADN es una macro-molécula doblemente trenzada que tiene una estructura helicoidal. Ambos filamentos trenzados son moléculas de ácido nucleico lineales y sin ramificaciones, formadas de moléculas alternadas de desoxirribosa (azúcar) y fosfato. El ADN de un organismo puede contener desde una docena de genes (como un virus), hasta decenas de miles (como los humanos).

Un gene es una sección de ADN que codifica una cierta función bioquímica definida, usualmente la producción de una proteína. Es fundamentalmente una unidad de herencia.

El ADN de un organismo puede contener desde una docena de genes (como un virus), hasta decenas de miles (como los humanos).

Se denomina cromosoma a una de las cadenas de ADN que se encuentra en el núcleo de las células. Los cromosomas son responsables de la transmisión de información genética.

Cada gene es capaz de ocupar sólo una región en particular de un cromosoma (su "lugar" o "locus"). En cada determinado lugar pueden existir, en la población, formas alternativas del gene. A estas formas alternativas se les llama alelos.

Se llama Genoma a la colección total de genes (y por tanto, cromosomas) que posee un organismo.

Se denomina Gametos a las células que llevan información genética de los padres con el propósito de efectuar reproducción sexual. En los animales, se denomina esperma a los gametos masculinos y óvulos a los gametos femeninos.

Se denomina haploide a la célula que contiene un solo cromosoma o conjunto de cromosomas, cada uno de los cuales consiste de una sola secuencia de genes.

Un gene es una sección de ADN que codifica una cierta función bioquímica definida, usualmente la producción de una proteína. Es fundamentalmente una unidad de herencia.

Durante la mutación, se cambian nucleótidos individuales de padre a hijo. La mayoría de estos cambios se producen por errores de copiado.

La aptitud de un individuo se define como la probabilidad de que éste viva para reproducirse (viabilidad), o como una función del número de descendientes que éste tiene (fertilidad).

Se denomina ambiente a todo aquello que rodea a un organismo. Puede ser “físico” (abiótico) o biótico. En ambos casos, el organismo ocupa un nicho que ejerce una influencia sobre su aptitud dentro del ambiente total.

Un ambiente biótico puede presentar funciones de aptitud dependientes de la frecuencia dentro de una población. En otras palabras, la aptitud del comportamiento de un organismo puede depender de cuantos más estén comportándose igual.

A través de varias generaciones, los ambientes bióticos pueden fomentar la coevolución, en la cual la aptitud se determina mediante la selección parcial de otras especies.

La selección es el proceso mediante el cual algunos individuos en una población son seleccionados para reproducirse, típicamente con base en su aptitud.

La selección dura se da cuando sólo los mejores individuos se mantienen para generar progenia futura. La selección blanda se da cuando se usan mecanismos probabilísticos para mantener como padres a individuos que tengan aptitudes relativamente bajas. Aunque no existe una definición universalmente aceptada de especie, diremos que es una colección de criaturas vivientes que tienen características similares, y que se pueden reproducir entre sí. Los miembros de una especie ocupan el mismo nicho ecológico.

Si una subpoblación de una cierta especie se separa geográficamente de la población principal durante un tiempo suficientemente largo, sus genes divergirán. Estas divergencias se deben a diferencias en la presión de selección en diferentes lugares, o al fenómeno conocido como desvío genético. Se llama desvío genético a los cambios en las frecuencias de genes/alelos en una población con el paso de muchas generaciones, como resultado del azar en vez de la selección. El desvío genético ocurre más rápidamente en poblaciones pequeñas y su mayor peligro es que puede conducir a que algunos alelos se extingan, reduciendo en consecuencia la variabilidad de la población.

En los ecosistemas naturales, hay muchas formas diferentes en las que los animales pueden sobrevivir (en los árboles, de la cacería, en la tierra, etc.) y cada estrategia de supervivencia es llamada un “nicho ecológico”.

Dos especies que ocupan nichos diferentes (p.ej. una que se alimenta de plantas y otra que se alimenta de insectos) pueden coexistir entre ellas sin competir, de una manera estable.

Sin embargo, si dos especies que ocupan el mismo nicho se llevan a la misma zona, habrá competencia, y a la larga, la especie más débil se extinguirá (localmente).

Por lo tanto, la diversidad de las especies depende de que ocupen una diversidad de nichos (o de que estén separadas geográficamente).

Se denomina reproducción a la creación de un nuevo individuo a partir de:

- Dos progenitores (sexual)
- Un progenitor (asexual)

Se denomina migración a la transferencia de (los genes de) un individuo de una subpoblación a otra.

1.8.1 Conceptos de Computación Evolutiva

Denominamos cromosoma a una estructura de datos que contiene una cadena de parámetros de diseño o genes. Esta estructura de datos puede almacenarse, por ejemplo, como una cadena de bits o un arreglo de enteros.

Se llama gene a una subsección de un cromosoma que (usualmente) codifica el valor de un solo parámetro.

Se denomina genotipo a la codificación (por ejemplo, binaria) de los parámetros que representan una solución del problema a resolverse.

Se denomina fenotipo a la descodificación del cromosoma. Es decir, a los valores obtenidos al pasar de la representación (binaria) a la usada por la función objetivo.

Se denomina individuo a un solo miembro de la población de soluciones potenciales a un problema. Cada individuo contiene un cromosoma (o de manera más general, un genoma) que representa una solución posible al problema a resolverse.

Se denomina aptitud al valor que se asigna a cada individuo y que indica qué tan bueno es éste con respecto a los demás para la solución de un problema. Por ejemplo, si $f(x) = x^2$, entonces $f(1010_2) = 100$ (donde $f(x)$ es la aptitud de un individuo).

Se llama paisaje de aptitud (*fitness landscape*) a la hipersuperficie que se obtiene al aplicar la función de aptitud a cada punto del espacio de búsqueda.

Se denomina alelo a cada valor posible que puede adquirir una cierta posición genética. Si se usa representación binaria, un alelo puede valer 0 ó 1.

Llamamos generación a una iteración de la medida de aptitud y a la creación de una nueva población por medio de operadores de reproducción.

Se llama migración a la transferencia de (los genes de) un individuo de una subpoblación a otra.

Se llama operador de reproducción a todo aquel mecanismo que influencia la forma en que se pasa la información genética de padres a hijos. Los operadores de reproducción caen en tres amplias categorías:

- Cruza
- Mutación
- Reordenamiento

La cruza es un operador que forma un nuevo cromosoma combinando partes de cada uno de sus cromosomas padres.

Se denomina mutación a un operador que forma un nuevo cromosoma a través de alteraciones (usualmente pequeñas) de los valores de los genes de un solo cromosoma padre.

Un operador de reordenamiento es aquél que cambia el orden de los genes de un cromosoma, con la esperanza de juntar los genes que se encuentren relacionados, facilitando así la producción de bloques constructores.

La inversión es un ejemplo de un operador de reordenamiento en el que se invierte el orden de todos los genes comprendidos entre 2 puntos seleccionados al azar en el cromosoma.

En un algoritmo genético (AG), cuando una población no tiene variedad requisito, la cruza no será útil como operador de búsqueda, porque tendrá propensión a simplemente regenerar a los padres.

Es importante aclarar que en los AG's los operadores de reproducción actúan sobre los genotipos y no sobre los fenotipos de los individuos.

Se denomina elitismo al mecanismo utilizado en algunos AE's para asegurar que los cromosomas de los miembros más aptos de una población se pasen a la siguiente generación sin ser alterados por ningún operador genético.

Usar elitismo asegura que la aptitud máxima de la población nunca se reducirá de una generación a la siguiente. Sin embargo, no necesariamente mejora la posibilidad de localizar el óptimo global de una función. No obstante, es importante hacer notar que se ha demostrado que el uso de elitismo es vital para poder demostrar convergencia de un algoritmo genético [3].

Cuando se atraviesa un espacio de búsqueda, se denomina explotación al proceso de usar la información obtenida de los puntos visitados previamente para determinar qué lugares resulta más conveniente visitar a continuación.

Se denomina exploración al proceso de visitar completamente nuevas regiones del espacio de búsqueda, para ver si puede encontrarse algo prometedor. La exploración involucra grandes saltos hacia lo desconocido. La explotación normalmente involucra movimientos finos. La explotación es buena para encontrar óptimos locales. La exploración es buena para evitar quedar atrapado en óptimos locales [3].

1.9 TEORÍA DE CONTROL

A partir del año 1955, se desarrollan los métodos temporales, con el objetivo de solucionar los problemas planteados en aplicaciones aeroespaciales, estos métodos reciben un fuerte impulso con el desarrollo de los computadores digitales, que constituían la plataforma tecnológica necesaria para su implantación, prueba y desarrollo.

Aparece un nuevo método de diseño de control, conocido a partir de entonces como teoría de control moderna. Se basaba en representar los sistemas en variables de estado o representación interna y trabajando casi exclusivamente en el dominio del tiempo. La teoría de control moderna esta basada en el concepto de estabilidad de Liapunov [20] presentado a finales del siglo XIX. Los trabajos desarrollados por Lurie [30] sobre servomecanismos de posicionamiento de torretas de tanques dieron lugar al concepto de estabilidad absoluta, generalizada después por Popov [44] con el concepto de hiperestabilidad, que considera no linealidades en la realimentación.

Los criterios de controlabilidad y observabilidad de sistemas dinámicos lineales, se deben a Kalman [23], aunque la noción de controlabilidad fue utilizada anteriormente por Pontryagin [30]. El concepto de regulador autoajutable fue propuesto inicialmente por Kalman, utilizando un método de identificación de mínimos cuadrados recursivos en su artículo "Design of a self-optimizing control system", otro sistema, basado en la minimización de la varianza de salida es desarrollado por Peterka en 1970 [30]. Se consideraba el problema en un entorno estocástico.

La técnica de los sistemas autoajustables se basa en que si se dispone de un método válido de diseño de reguladores que parte del conocimiento del modelo del proceso, para realizar un control que se adapte a los cambios en el proceso basta con acoplar ese método de diseño de reguladores con un procedimiento de identificación en línea. Para ello se supone, evidentemente, que existe una separación entre las tareas de identificación y control. Se dispondrá de un "calculador" que en paralelo al control se encarga de calcular los valores óptimos de los coeficientes del regulador. Este "calculador" consiste en un estimador recursivo de los parámetros del sistema o proceso controlado. Los resultados del estimador servirán para calcular los valores óptimos de los coeficientes del regulador. El principal inconveniente de esta aproximación es que la estabilidad no llega a asegurarse en el caso general.

En principio se llegó a pensar que la teoría de control moderna conduciría a un método de diseño de sistemas de control bien definido, sencillo y que pudiera ser mecanizado. Pero se tuvo que admitir que la bondad del diseño dependía de la bondad del modelo y de las especificaciones que se emplean para desarrollarlos. Se han llegado a desarrollar métodos mecanizados de diseño en el dominio de la frecuencia que son equivalentes a los métodos de diseño de variable de estado cuando la estructura del control es coincidente.

El computador en el control de procesos industriales: La aplicación del computador en el control de procesos supone un salto tecnológico enorme que se traduce en la implantación de nuevos sistemas de control en el entorno Industrial. Desde el punto de vista de la aplicación de las teorías de control automático el computador no está limitado a emular el cálculo realizado en los reguladores analógicos el computador permite la implantación de avanzados algoritmos de control mucho más complejos como pueden ser el control óptimo o el control adaptativo. El objetivo en un principio era sustituir y mejorar los reguladores analógicos, pero este objetivo se fue ampliando dada las capacidades de los computadores en realizar un control integral de las plantas de fabricación, englobando también la gestión de la producción.

Las principales aplicaciones industriales del computador son: Adquisición de datos. Consiste en la recolección, tratamiento y almacenamiento de los datos. Supervisión. En esta función el computador no efectúa directamente el control de proceso. Se conecta a los controladores del proceso (autómatas, reguladores PID) por una red de comunicaciones industrial. La principal función es la ayuda al operador de planta. Control secuencial. En esta función el computador suele tomar la forma de autómata programable, en el cual se ejecutan programas de control de sistemas secuenciales. Control analógico digital. Es una forma de control que se utilizaba con los primeros computadores en la cual el computador se encargaba de elaborar la consigna de los bucles analógicos. Control digital directo. El computador ejecuta directamente el control del proceso continuo. Toma la forma de regulador industrial o de computador industrial

con tarjetas de interface con el proceso. Análisis de datos. Función clásica de los computadores de gestión en el que se analizan los datos de producción por medio de herramientas de ofimática.

Las ventajas del uso del computador en el control de procesos son múltiples, entre ellas se podría nombrar una mayor eficacia de las operaciones, mayor seguridad y una reducción drástica de las operaciones manuales. El desarrollo de la tecnología del computador aplicada al control de procesos industriales, recibió a finales de los años cincuenta un gran impulso debido a que existían industrias como las refinerías petrolíferas donde los procesos a controlar en este tipo de plantas son complicados.

Los sistemas de control disponibles estaban bastante limitados, implicando en el proceso de fabricación a gran cantidad de mano de obra, como sucedía en la Industria de producción de papel. La calidad de la producción dependía en muchos casos de la experiencia del operario y de su rapidez de reacción ante situaciones anómalas. Era por decirlo un control semiautomático y semimanual. Los operarios eran quienes decidían cuales eran las referencias de mando más adecuadas para el sistema de control analógico. El primer trabajo sobre la aplicación del computador al control Industrial aparece en un artículo realizado por Brown y Campbell en el año 1950 [30], [52].

El desarrollo en la década de los 70 del microprocesador permite que llegue a ser rentable el dedicar un computador para el control de un solo proceso. Incluso esta reducción de costes permite que se empiecen a desarrollar sistemas de control por computador encargados de controlar una sola planta.

Las bases de lo que hoy es la teoría de control automático y las nuevas técnicas de análisis para solucionar problemas más complejos y actuales. Entre los posibles caminos que tomará el análisis de los sistemas de control están los siguientes:

Control óptimo: En el área de ingeniería eléctrica se busca que el control de un sistema tenga un ahorro máximo de energía y un tiempo de respuesta mínimo, es así como día con día se lucha por mejorar la velocidad de los componentes eléctricos y electrónicos, se ha logrado en las últimas dos décadas desarrollar los transistores de tecnología CMOS de altísimas velocidades en dimensiones miniaturizadas que hacen posible su inclusión por millones en las PC que se han hecho del alcance popular en estas dos décadas.

Control adaptivo: En aplicaciones en las que el control convencional no encuentra éxito debido a la naturaleza cambiante de algunos sistemas se recurre al llamado control adaptivo, que pretende crear un sistema de control autosintonizado que se dé cuenta que sus parámetros han variado y logre ajustar la respuesta al valor deseado por sí mismo.

Redes neuronales: Es un intento de imitar el pensamiento humano que se realiza a fin de cuentas por redes bioquímicas accionadas por impulsos eléctricos que hacen posible el tráfico de millones de señales de entrada y salida al cerebro que este procesa, para hacer posible la vida cotidiana de las personas. Desde que en 1943 se propuso el primer modelo de red neuronal por parte de McCulloch-Pitts [49] han surgido muchos más como los de Jhon von Neumann, Marvin Minsky, Frank Rosenblatt y sin duda alguna nacerán nuevas tendencias que imiten mejor el funcionamiento del cerebro humano. Hasta el momento las redes neuronales han encontrado aplicación en juegos de video en los cuales la máquina es capaz de aprender sobre las intenciones de su rival (un ser humano) y utilizar esa información para mejorar el nivel de exigencia, también en el control motor han sido utilizadas con éxito las redes neuronales. Pero de tener en cuenta las aplicaciones que se han generado en el campo de las refinerías como ejemplo la “Implementación de sensores inteligentes utilizando redes neuronales aplicados en procesos de refinación del petróleo” [36].

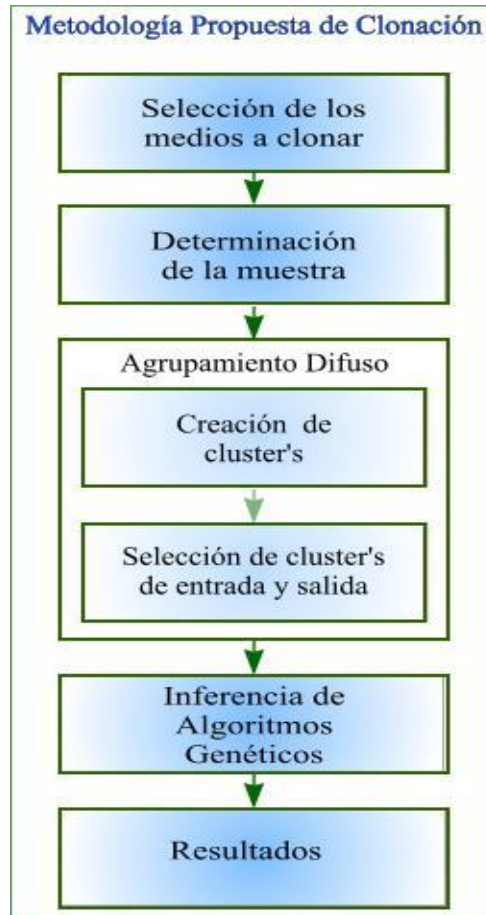
La síntesis de controladores prevista en la metodología de clonación artificial establece en los procedimientos las replicas de funciones pero expresada en forma de membresía (funciones de pertenencia), y sustituye las probabilidades por el análisis de posibilidades (teoría de posibilidad), relacionada esta última con las funciones de membresía, en tal sentido el cromosoma estaría estructurado por una relación de cadena de genes identificado con relaciones funcionales de pertenencia y/o membresía.

2. METODOLOGÍA DE CLONACIÓN

Los algoritmos genéticos han sido usados para resolver problemas difíciles con funciones objetivo que no poseen buenas propiedades, tales como continuidad, diferenciabilidad, condición de Lipschitz, etc. [16], [21]. Estos algoritmos mantienen y manipulan una familia, o población, de soluciones e implementan una “supervivencia de los mejor adaptados” como estrategia de búsqueda de mejores soluciones. De igual manera la lógica difusa es utilizada en procesos de optimización, y con ayuda de redes neuronales en procesos de aprendizaje.

Un problema que surge en la literatura de optimización es el de la clonación por medio de operadores genéticos, es decir, las funciones (operadores) que varíen con el tiempo, el comportamiento del sistema. Este es un problema especialmente interesante para la Teoría de Control, puesto que, en mayor o menor medida, los sistemas tiene un comportamiento estable.

Figura 2.1 Metodología Clonación.



Partiendo de estos enfoques se plantea una metodología (ver figura 2.1) que complementa cada una de estas técnicas, y las utiliza para otro tipo de problemas (que no son optimización, ni búsqueda), sino las replicas de las funciones de un sistema de control (se toma como una caja negra¹). A continuación se presentan los pasos que desde el análisis de los algoritmos genéticos, lógica difusa y teoría de control se trazan para desarrollar la metodología que se sigue en el proceso de clonación artificial de controladores.

2.1 SELECCIÓN DE LOS MEDIOS Y /O SISTEMAS PARA CLONAR

En esta etapa se determinan los medios, dispositivos y/o sistemas a clonar, se identifican las condiciones y/o funciones de entrada y salida. Se divide la población según el número de objetivos dados en unidades operativas funcionales; el conjunto de unidades operativas es llamada función objetivo. Por ejemplo, para un numero de N dispositivos que constituyen la población y un numero de n unidades operativas, se

¹ No se tiene en cuenta las funciones de control establecidas por los propietarios del Hardware y Software, es decir, se desconoce completamente la teoría matemática.

divide la población en subpoblaciones acorde con las unidades, cuyo tamaño es N/n , teniendo en cuenta si se tiene niveles de jerarquía, para determinar sus comportamientos y prioridades para generar un solo sistema.

2.2 DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE LA MUESTRA

En esta etapa se determina el método por el cual se determina la muestra con la cual desarrolla el sistema. Una de las técnicas que se analizó, es diseño con superficies de respuesta. La superficie de respuesta permite que el investigador inspeccione, de manera visual, la respuesta para cierta zona de los niveles de los factores de interés y evaluar su sensibilidad a los factores de tratamiento. En ciertas aplicaciones industriales, las superficies de respuesta se exploran para determinar la combinación de niveles de los factores que proporcionan una condición operativa óptima, como la combinación temperatura y tiempo para maximizar la producción.

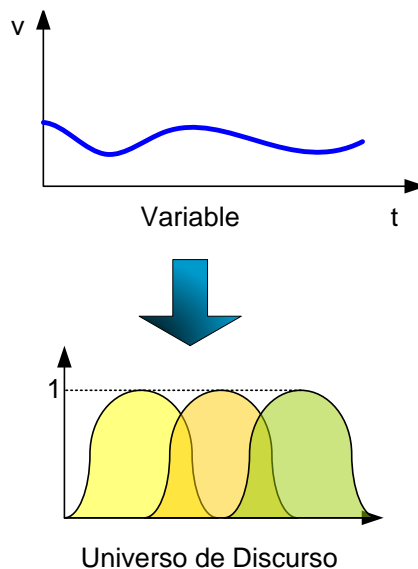
2.3 AGRUPAMIENTO DIFUSO (“FUZZY C-MEANS”)

El agrupamiento difuso o también llamado “Clustering”, es una metodología, que permite la partición del universo de discurso en diferentes grupos; el propósito de este agrupamiento es identificar los “grupos naturales” de datos a lo largo de un conjunto de datos, donde este grupo representa fielmente el comportamiento del sistema. Para realizar esta operación, se toma un universo de discurso Z , en el cual se define una *c-partición* como una recopilación de c conjuntos difusos definidos sobre Z , y con funciones de pertenencia $u_1(x)$, $u_2(x)$, ..., $u_c(x)$ respectivamente, esto será de gran utilidad siempre y cuando los conjuntos difusos cumplan con las siguientes características:

- Para todos los elementos de Z , la suma de sus funciones de pertenencia a los c conjuntos debe ser 1, esto quiere decir que para todo valor del universo de discurso, se encuentra un grado correspondiente a cada conjunto c .
- Para todos los conjuntos debe existir al menos un elemento de Z tal que su función de pertenencia al conjunto sea distinta de cero, por lo que cada conjunto tiene elementos “activos” en el universo de discurso.

El resultado esperado del proceso de agrupamiento se aprecia en la siguiente figura 2.2.

Figura 2.2. Proceso de agrupamiento, por conjunto borrosos.



Como se evidencia el procedimiento, busca poder clasificar de la mejor manera los datos de entrada en respectivos clusters, estos clusters o conjuntos de agrupamiento, serán posteriormente reflejados en conjuntos difusos, este último paso, revela la gran importancia de la teoría de agrupamiento.

Para realizar este tipo de “*Clustering*” se utilizan diversas técnicas, una de las más populares es la denominada “*Fuzzy c-means*” esta es una técnica de agrupamiento de datos, en la cual a cada dato le corresponde un grado de pertenencia. Esta técnica fue originalmente introducida por Jim Bezdek en 1981, como un mejoramiento a los métodos iniciales de “*Clustering*”, el gran aporte de esta metodología radica en su facilidad para agrupar datos de espacios multidimensionales dentro de un número de diferentes clusters.

Para implementar el “*Fuzzy c-mean*”, se deben realizar los siguientes pasos:

1. Seleccionar el número de clusters
2. Poner en el espacio los centros de los clusters aleatoriamente.
3. Asignar un grado de membresía a cada punto dependiendo de su distancia a cada centro.
4. Calcular nuevamente los centros.
5. Repetir los pasos hasta que los centros no cambien significativamente.

Para ampliar un poco más el paso 3 se describe

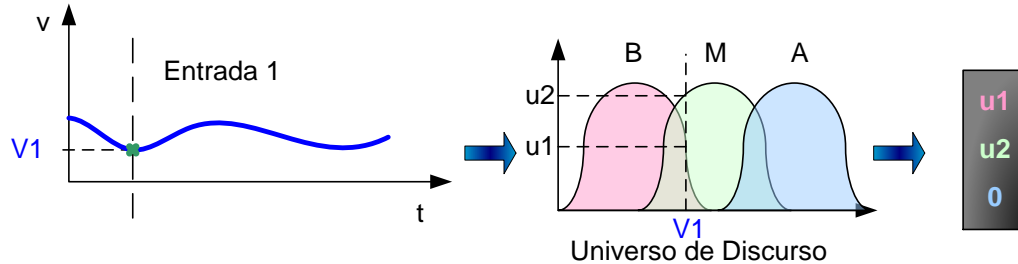
$$m_{ik} = \frac{1}{\sum_{j=1}^c \left(\frac{d_{ik}}{d_{jk}} \right)^{2/(q-1)}}$$

2.3.1 Creación de clusters

Este paso de clonación, consiste en crear los clusters para los valores de las entradas y salidas, esto contribuye con la concepción de una metodología que pueda trabajar con problemas multiobjetivo [19].

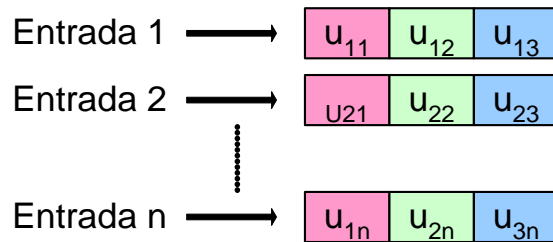
Para lograr este enfoque, es necesario, aplicar el “fuzzy c-mean” para encontrar los respectivos clusters de cada señal, estos clusters tienen una representación en conjuntos difusos, por lo que un valor V1 se puede representar en n valores de pertenencia, donde n es el número de clusters de la variable en mención [11]. Este procedimiento se aprecia en la figura 2.3.

Figura 2.3. Función de pertenencia de tipo campana de gauss.



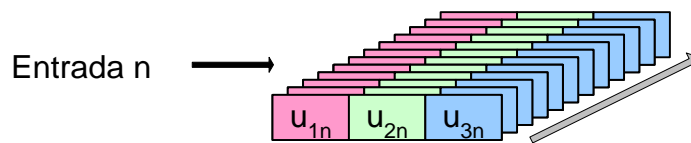
Este procedimiento se repite en las entradas del sistema y para todas las salidas, pasando de una representación por valor a una representación por grado de pertenencia en los clústeres, tal y como se aprecia en la figura 2.4.

Figura 2.4. Representación de la información en grados de pertenencia.



Para finalizar este paso, se convierte las señales en conjuntos de representaciones en clusters, lo que permite finalmente convertir todo el contenido de la señal en clusters, tal y como se aprecia en la figura 2.5.

Figura 2.5. Cluster por variable.



2.3.2 Selección de los clusters de entrada y de salida

Se dispone de la información de entrada y de salida ya filtrada y lista para la realización de los clusters, si se tienen niveles de jerarquía o según se halla identificado el sistema se debe entonces seleccionar el número de clusters para cada variable en el nivel de jerarquía, esta tarea, es sin lugar a dudas una de las tantas que afecta el correcto funcionamiento del sistema clonado, un gran número de clusters puede exigir un mayor costo computacional y una cantidad mínima de ciclos, evitará que el sistema encuentre una solución con la precisión adecuada.

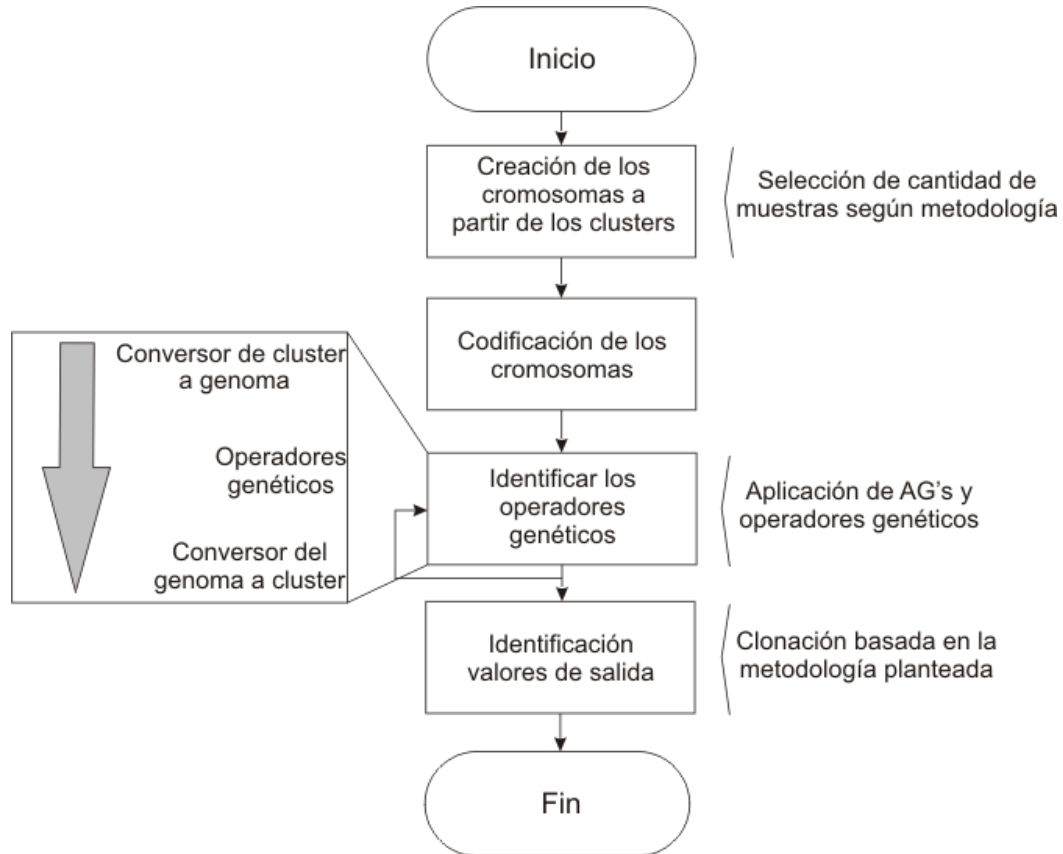
2.4 INFERENCIA DEL ALGORITMO GENÉTICO

La metodología del Algoritmo Genético permite manipular los clusters mediante operadores genéticos (jerarquizados) para alcanzar la clonación con un mínimo de error; el algoritmo genético enfatiza la importancia de la cruce sexual (operador principal) sobre el de la mutación (operador secundario), y usa selección probabilística, [21], [3], [33] esto se describe en los siguientes pasos (ver figura 2.6):

- Creación de los cromosomas a partir de los clusters
- Codificación del cromosoma
- Identificar los operadores genéticos

- Identificación de valores de salida

Figura 2.6. Estructura general del Algoritmo.



Finalmente, el resultado obtenido con esta metodología, son funciones de salida (para problemas multiobjetivo) que contienen la información de la clonación.

2.4.1 Creación de los cromosomas a partir de los clusters

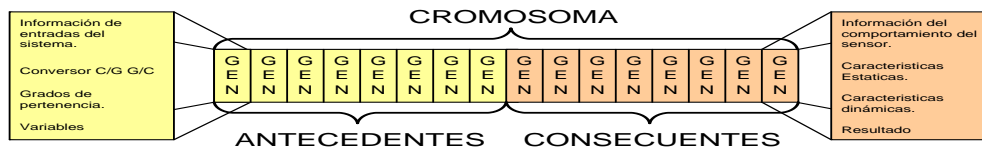
Para esta creación de cromosoma, fue implementada la visión dada por la referencia [12], en la cual se utiliza una división del cromosoma en antecedentes y consecuentes, los antecedentes corresponden a las entradas del sistema, es decir, todas las diferentes variables que influyen en la inferencia de la o de las variables de salida, en esta sección también se pueden encontrar la información codificada de los clusters, grados de pertenencia, tipos de conjuntos difusos, entre otros.

Los consecuentes del cromosoma contienen información que ha sido obtenida de los antecedentes, estas pueden ser, características estáticas y dinámicas [34], valor de salida propuesto, error estático y dinámico, por mencionar algunos.

La selección de los antecedentes y los consecuentes es libre y constituye una de las tareas más importantes para el desarrollo del proceso de clonación, esto es debido a que es en este punto del proceso, en donde se selecciona la información relevante para el proceso de clonación, la cantidad y variedad de los denominados “genes” del cromosoma será por lo tanto una de las decisiones particulares en cada proceso, esta representación de antecedentes y consecuentes se aprecia en la figura 2.7.

El procedimiento para encontrar los consecuentes es propio en cada sistema, pero es necesario saber, que esta información, como su nombre lo indica, es una consecucional de la implementación de los antecedentes en el sistema, por lo que se debe tener especial cuidado en la elaboración de esta característica.

Figura 2.7. Representación del cromosoma, con antecedentes y consecuentes.



2.4.2 Codificación del cromosoma

La codificación del cromosoma es uno de los pasos de mayor relevancia, esto es debido a la gran variedad de representaciones para los valores y estados de un sistema.

Codificación binaria: Es la más utilizada para realizar operaciones, esto debida gran facilidad a la hora de realizar operaciones genéticas (cruce, mutación), exige generalmente que el tamaño de los cromosomas crezcan cuando buscan la representación de varios valores con un alto grado de precisión, en el siguiente ejemplo se representa el número 36, el cual necesita 6 dígitos binarios para ser representado.

Codificación no binaria: Permite una lectura mas sencilla de los valores de cada “gen”, por lo que el tamaño del cromosoma se reduce considerablemente, exige un poco mas de atención a la hora de aplicar operadores genéticos en vista de no generar individuos incorrectos, en esta codificación se pueden encontrar valores enteros, caracteres (ideales para la representación fuzzy).

Codificación mixta: Incluye las dos codificaciones anteriormente mencionadas, y busca la flexibilidad de la codificación binaria en la implementación de los operadores genéticos y las bondades de la codificación no binaria en la disminución del tamaño del cromosoma, una representación de todas las posibles codificaciones se aprecian en la figura 2.8.

Figura 2.8. Tipos de codificación del cromosoma.

Binaria	1	0	0	1	0	0
No binaria	A	B	C			
Mixta	A	B	10	1	0	

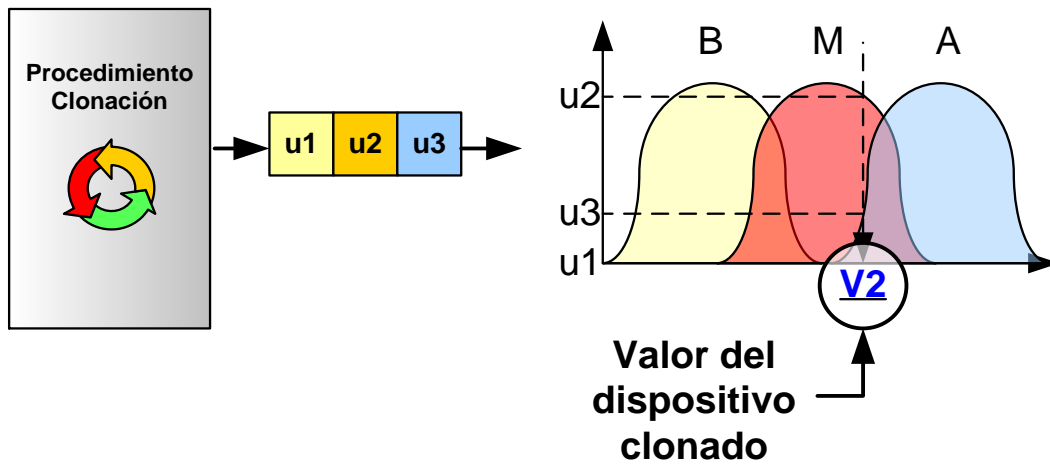
2.4.3 Identificación de operadores genéticos

Los operadores genéticos, serán los encargados de hacer interactuar los cromosomas previamente armados, estas operaciones convertirán los cromosomas de entrada en cromosomas de salida, estos cromosomas de salida deben corresponder a una estructura de cromosoma antecedente - consecuente, para lograrlo, la metodología de clonación dispone de una etapa de aprendizaje utilizando un método de comparación con el patrón, donde, evidentemente el patrón a utilizar como referencia es la señal de salida deseada..

2.4.4 Identificación de información de salida

Posterior a la búsqueda utilizando AG's, es necesario implementar el mejor individuo (la mejor secuencia) obtenido por el AG como controlador clonado, al utilizar esta secuencia, se toman los datos de entrada, se aplican los operadores genéticos y se obtiene el genoma de salida, a este genoma se le aplica un procedimiento de decodificación para tener el valor o los valores deseados de salida, cabe resaltar que el proceso de clonación también permite la obtención de otras características propias del sistema clonado y no únicamente un valor específico. Una breve ilustración se aprecia en la figura 2.9.

Figura 2.9. Proceso de decodificar la información para obtener los resultados.



2.5 RESULTADOS

En esta etapa se realiza un proceso de comparación de la función real contra el sistema de clonación, este procedimiento se puede observar por medio de varias técnicas, dentro de ellas se encuentran a, b y c.

La clonación del proceso propio de las soluciones parciales obtenidas en la etapa 4 y usando la información resultante, se determina el individuo que da solución; es decir, que satisface el coeficiente de ponderación de el sistema clonado con respecto a la función del sistema real. Esto representa el dispositivo clonado. Gráficamente se puede observar los comportamientos del sistema real simulado y el sistema clonado. [35]

2.6 ALGORITMO GENÉTICO PROPUESTO

Desarrollado originalmente por Holland [21] utiliza tradicionalmente una representación independiente del problema, en concreto se utilizan cadenas binarias de longitud fija para codificar los individuos y como operadores de variación utilizan el cruce y la mutación binaria.

Los algoritmos genéticos utilizan una representación y unos operadores de variación independientes del problema, se consideran métodos muy robustos, puesto que pueden

aplicarse a una gran diversidad de problemas sin tener que adaptarse a cada problema concreto.

El esquema básico del algoritmo genético es el siguiente:

1. *Inicializar y evaluar los N individuos de la población, a partir de un modelo calculado mediante clustering.*
2. *Seleccionar N individuos para ser padres.*
La selección tradicionalmente se realiza de forma proporcional a su adecuación, es decir, aquellos individuos con una mejor adecuación son seleccionados con mayor probabilidad que aquellos con peor adecuación.
3. *Generar N hijos mediante cruce de los padres.*
4. *Mutar los N hijos.*
5. *Evaluar los N hijos.*
6. *Reemplazar la población anterior por los N hijos.*
7. *Si se alcanza la condición de parada, terminar el algoritmo, en otro caso, volver al punto 2.*

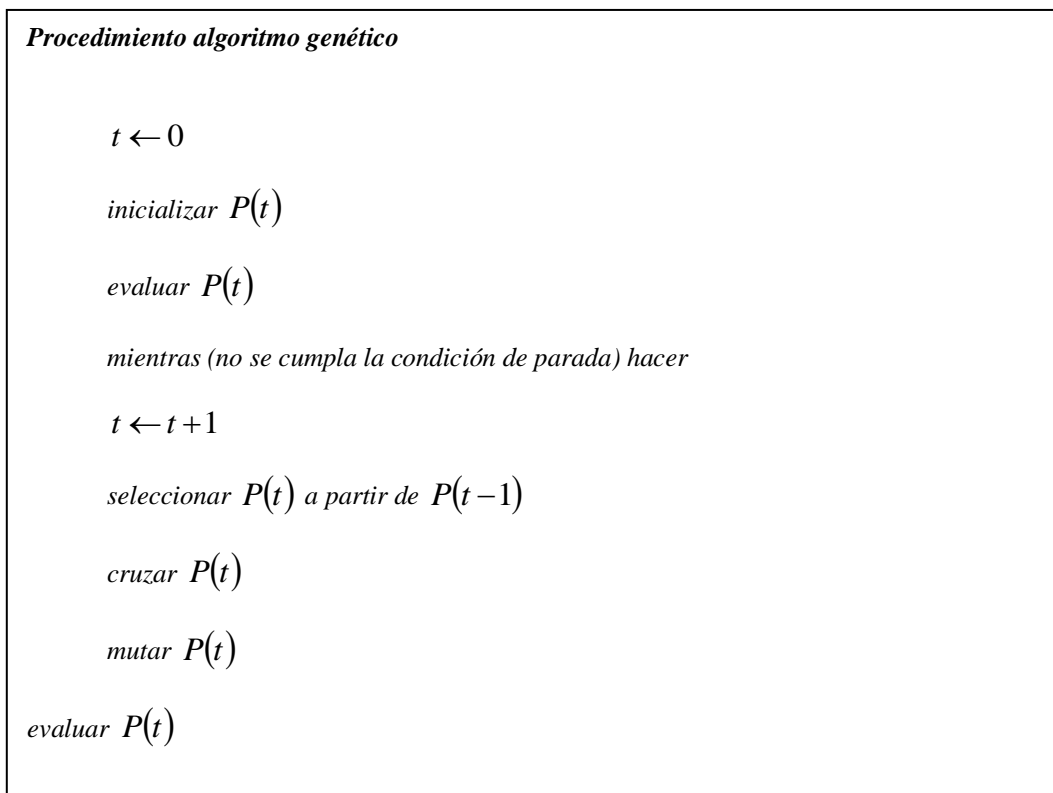
Resulta interesante notar que en los algoritmos genéticos históricamente se ha considerado el cruce como el operador principal [3], mientras que a la mutación se le ha concedido una importancia secundaria. Esto es lo contrario a lo que ocurre en la programación evolutiva. Sin embargo, el interés por la mutación es cada vez mayor, en parte debido a la influencia de la investigación realizada en el campo de la programación evolutiva y de las estrategias de evolución [43].

2.6.1 Representación

Existen diversos términos utilizados para referirse a una solución del problema, por ejemplo, string o estructura, y, siguiendo el vocabulario de los sistemas biológicos, cromosoma. Otros términos utilizados en computación evolutiva son:

Gen: Unidad básica de información. Los cromosomas están formados por genes. Si la representación es binaria, un gen corresponde a una unidad binaria. Donde el alelo es el valor de un gen determinado dentro del cromosoma y el locus determina la posición de un gen determinado dentro del cromosoma.

Figura 2.10: Estructura de un Algoritmo Genético.



Genotipo: Paquete genético total; es el cromosoma completo.

Fenotipo: Interacción del genotipo con su entorno, que se traduce en la decodificación del cromosoma para la obtención de una solución (conjunto de parámetros particular, o un punto en el espacio de búsqueda).

Utilizando una codificación binaria, podemos representar un cromosoma b como:

$$b = (b_1 \dots b_n) \text{ donde } b_i \in \{0,1\}, i = 1, \dots, n$$

La decodificación o fenotipo x está formada por las k variables de decisión:

$$x = (x_1 \dots x_k) \text{ donde } x_i \in D_i, i = 1, \dots, k$$

La adecuación f es un valor real que indica la adaptación del individuo a su entorno, es decir, indica cómo de óptimo es el valor alcanzado en la función objetivo por dicho individuo.

El término individuo es frecuentemente utilizado (Goldberg [16]) para referirse al conjunto de información *genotipo-fenotipo-adequación*. Así, podemos representar un individuo X como la terna:

$$X = (b, x, f)$$

donde b es la representación (genotipo, cromosoma), x es la decodificación (fenotipo), y f es la adecuación de la solución al entorno.

En un algoritmo genético, las soluciones potenciales al problema se representan mediante cadenas binarias de bits (0 y 1) de una longitud determinada n que viene impuesta por el número de variables existentes en la solución y por el número de bits necesarios para codificarlas. El número de bits necesario para codificar una variable depende de la precisión que deseemos obtener. Si se desea obtener una precisión de p decimales para la variable i -ésima, el dominio D_i debe dividirse en $(u_i - l_i) \cdot 10^p$ tramos y por tanto el número de dígitos binarios n_i necesarios para codificar la variable i -ésima es el menor entero n_i , tal que $(u_i - l_i) \cdot 10^p \leq 2^{n_i} - 1$. El número de bits n necesario para codificar una solución al problema se calcula por tanto como:

$$n = \sum_{i=1}^k n_i$$

Cada variable $x_i, i = 1, \dots, k$ se interpreta según la siguiente fórmula:

$$x_i = l_i + \text{decimal}(b_{i_1} \dots b_{i_2}) \frac{u_i - l_i}{2^{n_i} - 1}$$

donde *decimal* $(b_{i_1} \dots b_{i_2})$ representa el valor decimal de la cadena binaria $b_{i_1} \dots b_{i_2}$,

$$i_1 = \sum_{j=1}^{i-1} n_j + 1, \text{ y}$$

$$i_2 = \sum_{j=1}^{i-1} n_j + n_i$$

2.6.2 Población inicial

La población en un algoritmo genético está formada por un conjunto de N individuos, donde el número N (tamaño de la población) es un parámetro de entrada al algoritmo. De esta forma, en una generación determinada t , podemos representar una población $P(t)$ como:

$$P(t) = \{X_1^t, \dots, X_N^t\}$$

donde el individuo i -ésimo en una generación determinada t se representa como:

$$X_i^t = (b_i^t, x_i^t, f_i^t)$$

siendo $b_i^t = (b_{i1}^t, \dots, b_{in}^t)$ la representación, $x_i^t = (x_{i1}^t, \dots, x_{ik}^t)$ la decodificación, y f_i^t , es la adecuación.

Para obtener una población inicial $P(0) = \{X_1^0, \dots, X_N^0\}$, debemos por tanto generar N individuos iniciales. Estos individuos deben generarse de forma aleatoria uniforme en todo su dominio.

En el caso de representación binaria, el procedimiento de inicialización de un individuo X_i^0 consiste simplemente en asignar, para cada gen de su cromosoma b_i^0 , un valor aleatorio 0 ó 1.

Con la decodificación del cromosoma b_i^0 obtendremos su fenotipo x_i^0 , y la adecuación de la solución al entorno se obtiene a través de la función de adecuación f_i^0 .

2.6.3 Función de adecuación

Una forma sencilla de medir la adecuación de una solución en una generación t consiste simplemente en evaluar su fenotipo a través de la función objetivo f del problema que se este resolviendo. Así pues, la función *adecuación* se corresponde con la función objetivo f del problema, y entonces, dado un cromosoma b_i^t y su fenotipo x_i^t , podemos obtener su adecuación f_i^t como:

$$f_i^t = \text{adecuación}(b_i^t) = f(x_i^t)$$

La función objetivo juega por tanto un papel fundamental en un algoritmo genético, puesto que esta es la única información que se usa del entorno, lo cual hace que estos métodos sean muy generales y robustos.

2.6.4 Operadores Genéticos

Una vez que se han evaluado todas las soluciones de la población en una generación, el proceso evoluciona hacia una nueva generación. La población en la nueva generación t sufrirá una transformación con respecto a la población en la generación anterior $t - 1$. El objetivo de esta transformación es guiar a la población de una forma probabilística hacia la solución óptima del problema, de forma que las soluciones de la población en la generación t se encuentren, en su conjunto, más "cerca" de la solución óptima al problema que las soluciones de la población en la generación $t - 1$.

Esta transformación se lleva a cabo, en un esquema básico de funcionamiento, por medio de la aplicación de los tres operadores genéticos siguientes como reglas de transición probabilísticas:

1. Selección.
2. Cruce.
3. Mutación.

El operador de selección se encarga de modelizar el mecanismo de reproducción dentro del algoritmo genético, es decir, asegura la supervivencia en mayor número de los individuos más adaptados (soluciones más adecuadas). Los operadores de cruce y mutación realizan la recombinación de los individuos seleccionados para generar otros individuos. El cruce combina información de individuos diferentes, mientras que la mutación introduce una variación aleatoria en la información, necesaria para mantener la suficiente diversidad entre las soluciones que forman la población.

2.6.4.1 Operador de selección

Los *operadores de selección* de un algoritmo genético pueden ser modelizados a través de dos algoritmos diferentes [19]:

1. Algoritmo de selección

Si t es la generación actual, el algoritmo de selección obtiene la probabilidad de selección de cada individuo de la población en la generación anterior $t - 1$, es decir, asigna a cada individuo el número esperado de descendientes en la generación actual t .

2. Algoritmo de muestreo.

El algoritmo de muestreo produce copias de los individuos, desde la población en la generación $t - 1$ a la población en la generación actual t , de acuerdo a sus probabilidades de selección.

En el algoritmo genético que se está describiendo se usa, como algoritmo de selección, la *selección proporcional* [28], y como algoritmo de muestreo, el *muestreo estocástico con reemplazamiento* [25]. La combinación de estos dos algoritmos de selección y muestreo se denomina *selección por rueda de ruleta* en [16], y *selección simple* en [17].

La selección proporcional asigna a cada individuo i de la población en la generación $t - 1$, la siguiente probabilidad de selección:

$$p_i^{t-1} = \frac{f_i^{t-1}}{F^{t-1}}, i = 1, \dots, N$$

donde F^{t-1} es la suma de la adecuación de todos los individuos de la población en la generación $t - 1$:

$$F^{t-1} = \sum_{i=1}^N f_i^{t-1}$$

El algoritmo de muestreo estocástico con reemplazamiento realiza los siguientes pasos:

- Calcular la probabilidad acumulada de cada individuo i de la población en la generación $t - 1$:

$$q_i^{t-1} = \sum_{j=1}^i p_j^{t-1}, i = 1, \dots, N$$

- Repetir N veces:

- Generar un número real aleatorio $\alpha \in [0,1]$,
- Si $\alpha \leq q_1$ entonces seleccionar el primer individuo de la población en la generación $t - 1$ y copiarlo en la población de la generación actual t ; en otro caso seleccionar y copiar el i -ésimo individuo $2 \leq i \leq N$ tal que $q_{i-1}^{t-1} < \alpha \leq q_i^{t-1}$.

Este proceso de muestreo representa una rueda de ruleta con N marcas y separaciones entre ellas fijadas proporcionalmente de acuerdo a la adecuación de los individuos. En

un algoritmo genético normalmente se usa el esquema de *sustitución generacional completa* [16], con el cual los N miembros de la población anterior son sustituidos por los N miembros de la nueva población, por lo que "tendremos que girar N veces la rueda de ruleta". Los individuos con mayor probabilidad de selección (mejor adecuación) serán seleccionados un número mayor de veces, y tendrán mayor contribución en las siguientes generaciones.

2.6.4.2 Operador de cruce

Una vez formada la nueva población en la generación actual t , se aplica el primer operador de variación, el *operador de cruce* [21]. Uno de los parámetros de entrada que usa el algoritmo genético es la probabilidad de cruce p_{cruce} que nos da el número esperado de individuos $p_{cruce} \cdot m$ a los cuales se les aplicará el operador de cruce en cada generación. La forma de seleccionar los individuos para el cruce se describe a continuación:

Para cada individuo i de la población en la generación t :

- Generar un número real aleatorio $\alpha \in [0,1]$,
- Si $\alpha < p_{cruce}$ entonces seleccionar dicho individuo para el cruce.

Seguidamente, se realiza el cruce de los individuos seleccionados. Uno de los esquemas de cruce más usados es el *cruce aleatorio* [16], el cual selecciona el cruce de forma aleatoria con igual probabilidad, y el *cruce simple* [16].

Dados dos individuos i y j seleccionados para el cruce en la generación t :

$$b_i^t = (b_{i1}^t \dots b_{ipos}^t b_{i(pos+1)}^t \dots b_{in}^t)$$

$$b_j^t = (b_{j1}^t \dots b_{jpos}^t b_{j(pos+1)}^t \dots b_{jn}^t)$$

se genera un número entero aleatorio $pos \in [1..n-1]$, el cual indica la posición del punto de cruce y los individuos anteriores son sustituidos por sus descendientes:

$$b_i^t = (b_{i1}^t \dots b_{ipos}^t b_{i(pos+1)}^t \dots b_{in}^t)$$

$$b_j^t = (b_{j1}^t \dots b_{jpos}^t b_{j(pos+1)}^t \dots b_{jn}^t)$$

los cuales contienen la información genética cruzada de los padres.

2.6.4.3 Operador de mutación

El siguiente operador de variación es el *operador de mutación* [21]. En el algoritmo genético que estamos describiendo se usa la *mutación simple* [16], que se aplica, después del operador de cruce, en cada cromosoma de la población en la generación actual t . En cada bit del cromosoma se lleva a cabo un cambio de 0 a 1 o viceversa con probabilidad $p_{mutación}$, parámetro éste de entrada que nos da el número esperado de bits mutados $p_{mutación} \cdot n \cdot m$ en cada generación. Se puede entonces proceder de la siguiente forma:

Para cada individuo i de la población en la generación t , y para cada bit del cromosoma de dicho individuo:

- Generar un número real aleatorio $\alpha \in [0,1]$,
- Si $\alpha < p_{mutación}$ entonces mutar dicho bit.

Después de la aplicación de los operadores de variación (selección, cruce y mutación), la nueva población está preparada para su evaluación. El resto de la evolución, tal como muestra el esquema de la figura, es simplemente un proceso iterativo de selección-operadores genéticos-evaluación en el transcurso de las generaciones hasta que se cumple la condición de parada, que suele ser alcanzar un número determinado de generaciones o el cumplimiento de algún predicado de éxito si es posible reconocer soluciones óptimas o satisfactorias para el decisión.

2.6.5 Parámetros

Los parámetros de entrada más significativos que el algoritmo genético utiliza son los siguientes:

- Tamaño de la población
- Número de generaciones
- Probabilidad de cruce
- Probabilidad de mutación

De Jong [10], completando los primeros estudios de Holland [21], realiza un análisis para la correcta fijación de parámetros haciendo distinción entre situaciones *off-line* y situaciones *on-line*. Para el tamaño de la población, tales estudios apuntan a un buen rendimiento *off-line* para poblaciones grandes, ya que convergen finalmente mejor debido a una mayor diversidad, y a un buen rendimiento *on-line* para poblaciones pequeñas, ya que éstas tienen la habilidad de cambiar más rápidamente y ofrecer una convergencia inicial mejor. En [21] se establece una guía para la elección de posibles tamaños de población para representaciones binarias de longitud fija en función de la longitud de los cromosomas. Asimismo, en [21] se estima que el número esperado de generaciones hasta la convergencia es una función logarítmica del tamaño de la población. Para las probabilidades de cruce y mutación, los estudios realizados en el tema apuntan a probabilidades de cruce altas y probabilidades de mutación bajas. Los siguientes valores han sido considerados como aceptables para un buen rendimiento de los algoritmos genéticos para funciones de optimización [39];

- Tamaño de la población: 50 a 100.
- Probabilidad de cruce: 0.60.
- Probabilidad de mutación 0.001.

2.7 DISPOSITIVO CLONADO

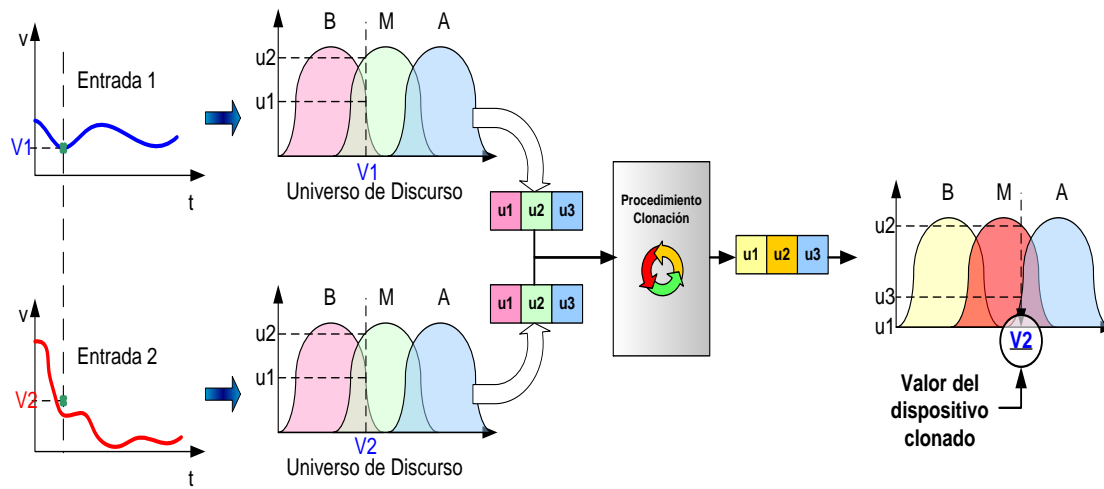
El dispositivo clonado, ya no precisa de una etapa de aprendizaje, esta ya ha sido realizada en el procedimiento del AG (en la etapa de búsqueda de la correcta secuencia), por lo que se implementa directamente, reemplazando al dispositivo "padre", el cual se puede utilizar como elemento de referencia en una etapa primaria de implantación y como respaldo para el sistema en una etapa final de implantación, la figura 2.11, muestra un resumen de la operación del sistema clonado, en esta ilustración se aprecia, como las entradas son convertidas, gracias al "*Fuzzy c-mean*" en clusters difusos y estos a su vez son reflejados en conjuntos difusos.

Posteriormente, se convierte la información de los conjuntos, de las características de las señales en los respectivos cromosomas, estos cromosomas, como se apreció en "Creación de los cromosomas", ...Véase el numeral 2.4.1..., contienen antecedentes y consecuentes.

Luego de poseer esta información en forma de “cromosoma”, se aplica la secuencia de operadores genéticos, la cual convierte la información de entrada en “cromosomas” de salida con la misma estructura de datos (antecedentes y consecuentes).

El conjunto de datos entregado por el proceso de clonación, es procesado por el sistema, una de las etapas importantes de este proceso es la defusificación de una parte del “cromosoma”, de tal forma que podamos tener el valor de la variable clonada en rangos del universo de discurso y no en términos de pertenencia a conjuntos borrosos.

Figura 2.11. Proceso completo del sistema de clonación.



3. INVESTIGACIONES EXPERIMENTALES DEL PROCESO DE SEPARACIÓN DE NÍQUEL Y COBALTO COMO OBJETO DE REGULACIÓN

3.1 APLICACIÓN AL PROCESO DE SEPARACIÓN DE NÍQUEL (Ni) Y COBALTO (Co) DE LA TECNOLOGÍA CARON

La industria cubana del níquel, basada en la explotación de yacimientos lateríticos, posee una rica experiencia de más de 50 años, y en las fábricas que explotan estos yacimientos se han seguido criterios análogos, observando las características propias de los mismos, equipamiento minero y proceso metalúrgico [18] y [42]. Esto es de vital importancia, pues junto a la existencia de centros como el *Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa* y el Centro de Investigaciones de las Lateritas de Moa, provincia de Holguín - Cuba, que se dedican especialmente al estudio de la explotación óptima de estos yacimientos, a la búsqueda de información actualizada y al intercambio científico – técnico con especialistas y centros análogos cubanos y extranjeros, se dispone de un significativo nivel de conocimiento teórico y práctico sobre este tema.²

“En la tecnología de lixiviación carbonato amoniaca aplicada en la industria cubana del níquel, la precipitación de cobalto en forma de sulfuros constituye una de las etapas del proceso tecnológico, la cual se caracteriza por una baja eficiencia de la precipitación de cobalto y una alta relación níquel /cobalto en el sulfuro”.

El carácter específico del planteamiento y la solución del proceso de separación de níquel y cobalto están determinados por las particularidades del esquema tecnológico – operacional de precipitación de níquel y cobalto en la Planta de Cobalto de la fábrica y los métodos de control sobre el desarrollo del mismo. Los licores carbonato – amoniaca de la lixiviación y los reactivos (hidrosulfuro de amonio y semillas) en la refundición de metálica durante la sedimentación de sulfuros, es sometida a un tratamiento hidroquímico. Aquí se utilizan el reactor tubular y el sedimentador, y su conexión se efectúa a través de la recirculación potente fundamentada en el envío de semillas de la descarga del sedimentador hacia la entrada del reactor tubular, esta recirculación origina un lazo de retroalimentación a causa del cual, desde el punto de vista de dirección, todo el complejo productivo del proceso de separación de níquel y cobalto debe ser analizado como un objeto único dirigible multidimensional.

3.2 RESULTADOS DE LAS INVESTIGACIONES EXPERIMENTALES EN LA INSTALACIÓN INDUSTRIAL

² Tecnología de control con análisis instrumental on-line.

El análisis de los resultados de las investigaciones experimentales efectuadas en la instalación industrial posibilita llegar a importantes razonamientos a cerca del gasto de reactivo para la sedimentación de cobalto mediante el mantenimiento de los gastos de semillas a determinado nivel. En la figura 3.1 se muestra la dependencia del gasto específico necesario del reactivo respecto al contenido de cobalto en el licor inicial para mantener constante la cantidad de cobalto en la salida del reactor tubular según el valor deseado. En la misma figura puede observarse cómo con la disminución de la concentración de cobalto en el licor que entra al reactor aumenta bruscamente el gasto específico necesario de reactivo.

En el estudio de la influencia de la concentración de níquel en el licor de entrada al reactor, respecto al gasto específico de reactivo según la variación del contenido de cobalto residual, se concluye que la variación del contenido de níquel no influye en el gasto de reactivo (figura 3.2). Esto explica por que el cobalto en las condiciones del proceso de separación tiene mucha mayor tendencia a la creación de sulfuros de níquel, y por lo tanto la concentración residual de cobalto representa un freno para la sedimentación del níquel.

La esencia del proceso de separación está basada en la necesidad de obtener el concentrado de sulfuros de níquel y cobalto con un mínimo de contenido de níquel y, de esta forma la parte principal del mineral ha de quedarse en el licor que pasa al siguiente proceso.

En la figura 3.3 se muestra el gráfico de variación de cobalto que queda en el licor respecto al gasto específico de reactivo a diferentes concentraciones de Co^{+3} en el licor inicial.

Figura 3.1 Relación entre el gasto necesario de reactivo y el contenido de Co en el licor inicial para mantener la concentración de Co del licor de salida del reactor igual a 10mg/l .

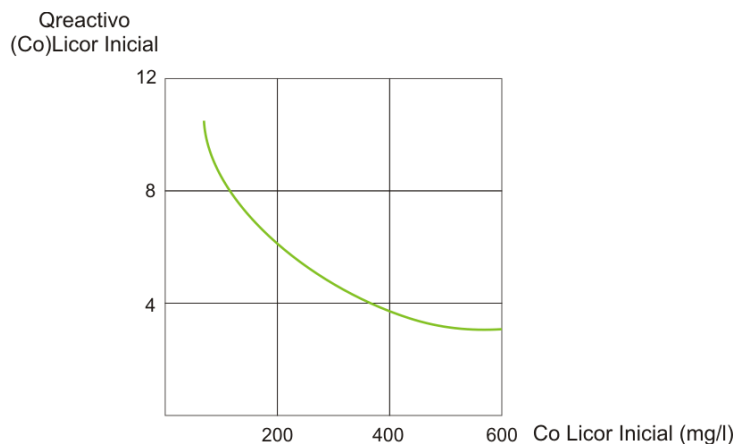


Figura 3.2 Relación entre el contenido de **Co** a la salida del reactor y el gasto específico del reactivo a las diferentes concentraciones de Ni en el licor inicial: 4.8g/l y 0.12g/l.

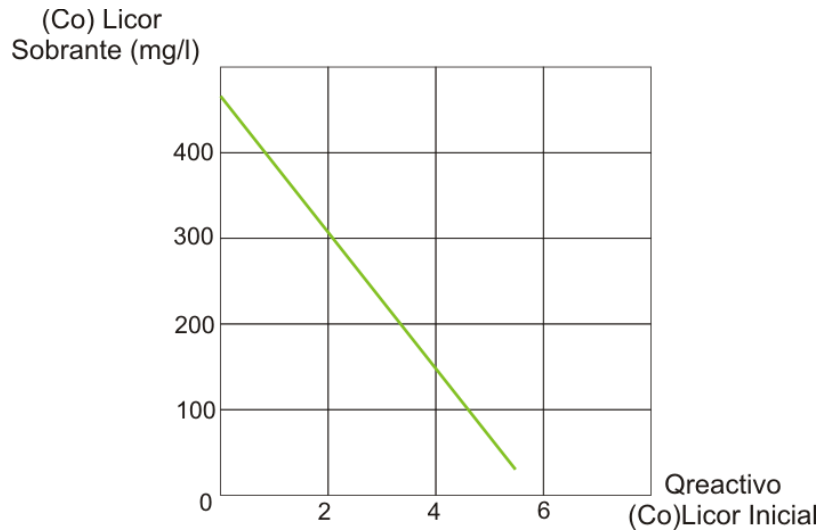
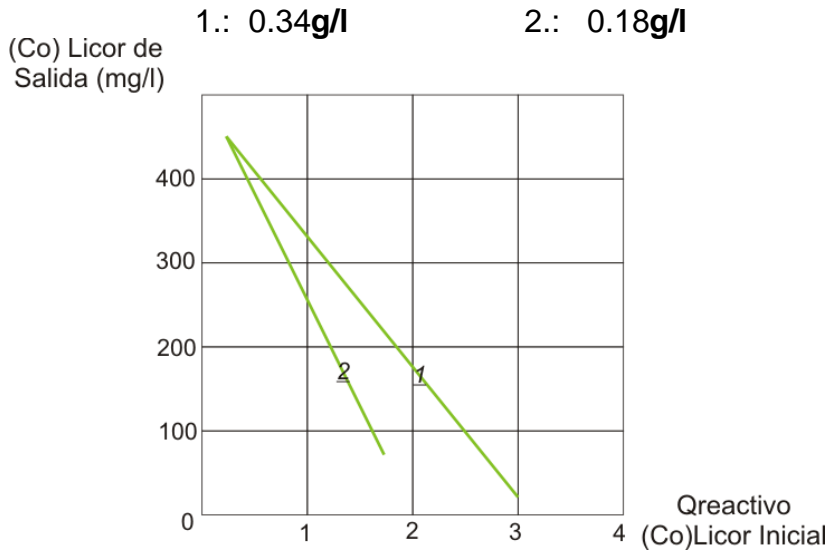


Figura 3.3 Relación entre la concentración total de **Co** del licor de salida del reactor y el gasto específico de reactivo a diferentes concentraciones de **Co⁺³** en el licor inicial.



Como se aprecia, con el aumento de la concentración de cobalto de valencia tres aumenta el gasto de reactivo ya que el cobalto **Co⁺³** debe convertirse primero en **Co⁺²** para luego sedimentarse, y para llevar a cabo esta reacción de cambio de valencia es necesario un gasto adicional de reactivo. En los licores carbonato – amoniacaes existen iones **Co⁺²** y **Co⁺³** en diferentes concentraciones, trayendo como consecuencias

la oscilación en el gasto de reactivo para mantener el contenido de cobalto necesario en el licor.

En la figura 3.4 se muestra la dependencia de la velocidad de sedimentación de cobalto respecto a la temperatura del licor inicial en el reactor y la variación del contenido residual de cobalto respecto al gasto específico de reactivos a diferentes temperaturas. De su análisis se puede inferir que con el aumento de la temperatura del licor se reduce considerablemente el gasto de reactivos para la sedimentación del cobalto.

Algo similar ocurre para el contenido de níquel en el licor. La relación entre la variación del contenido de níquel en el licor y el gasto específico de reactivo a diferentes temperaturas del licor inicial se muestra en la figura 3.5. En la sección de cobalto, el carbonato – amoniacal entra a una temperatura de 40°C, después de la sección de enfriamiento del licor ya que a ésta temperatura se observa la sedimentación mínima de níquel en forma de sulfuro. Todas las dependencias expresadas tienen relación con el gasto y reactivo para la sedimentación de cobalto hasta un valor determinado.

En el proceso de separación de níquel y cobalto debe dedicarse especial interés a las relaciones y dependencias de temperaturas sin restar, el valor al gasto de semillas, del cual se hace mención en el Epígrafe 3.2, en el cual, mediante los resultados de las investigaciones en la instalación industrial debemos detenernos en la incógnita que depara el gasto de energía en la recirculación de semillas de la pulpa de sulfuros proveniente de la descarga del espesador hacia la entrada del reactor tubular respecto a los gastos de reagentes.

Figura 3.4 Relación entre el contenido residual de **Co** en el licor de salida del reactor y el gasto de reactivo para diferentes temperaturas del licor inicial.

1. 40°C

2. 60°C

3. 70°C

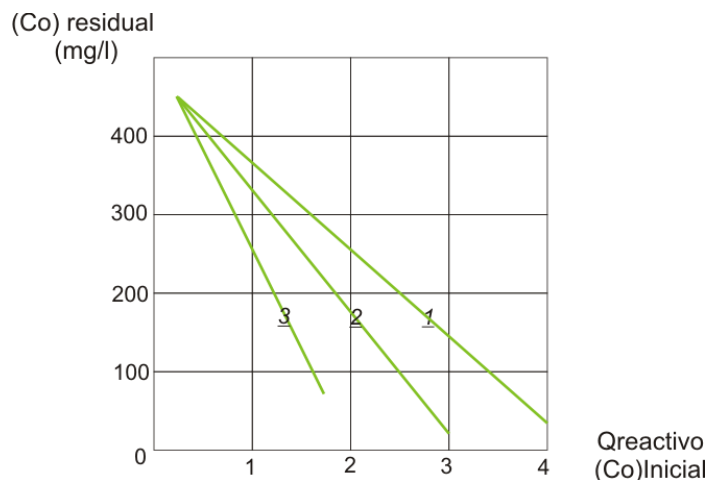
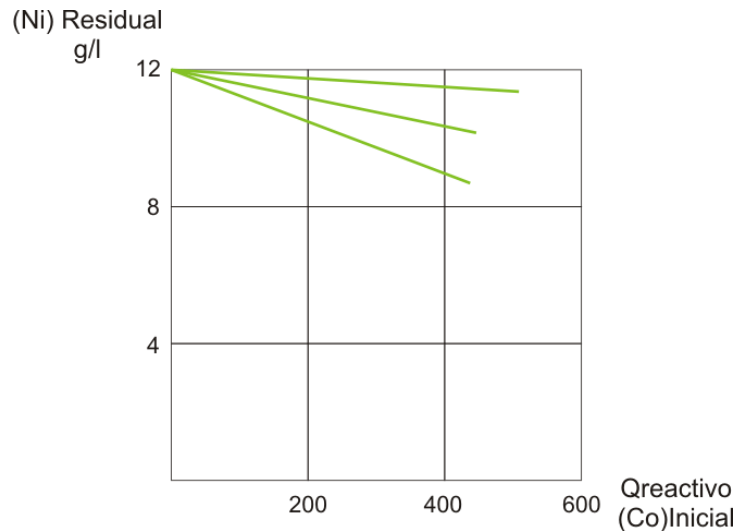


Figura 3.5 Relación del contenido de Ni residual en el licor de salida del reactor y el gasto específico de reactivo para diferentes temperaturas del licor inicial.

1. 40°C

2. 60°C

3. 70°C



En la figura 3.6 se representa la relación entre la capacidad específica de energía para la transformación de la pulpa de sulfuros y su concentración volumétrica. Llegándose a la conclusión que los gastos de energía en el rebombeo son despreciables.

Los gastos de energía se determinan por la formula:

$$E = (\rho_s . I . L) / c$$

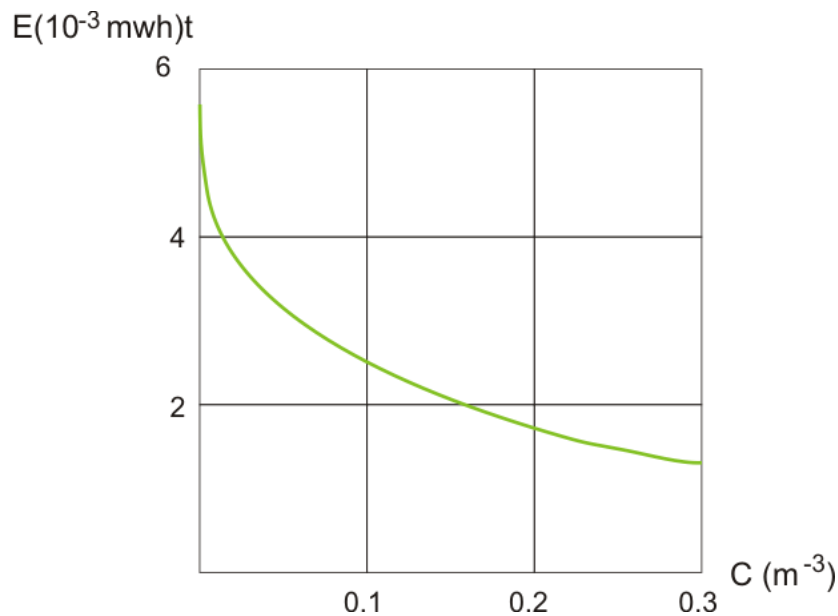
ρ_s	Densidad de semilla
I	Pérdidas específicas de presión
L	Distancia de transformación
C	Concentración volumétrica de semillas

Expresado en dinero, los gastos por conceptos de reagentes superan en varios exponentes a los gastos de energía eléctrica en el rebombeo de semillas. De esta forma se puede considerar que variando el gasto de semillas debe orientarse en la minimización de los gastos de reagentes en el proceso de separación de níquel y

cobalto. Esta posibilidad se basa en los resultados de las investigaciones realizadas en la instalación experimental.³

Durante las investigaciones realizadas en la instalación industrial no pudo ser estudiada la interrogante acerca de la influencia del gasto de semilla sobre el gasto de reagentes.

Figura 3.6 Dependencia de la capacidad energética de transportación de semillas.



3.3 RESULTADOS DE LAS INVESTIGACIONES EN LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

Las investigaciones experimentales del proceso de separación de níquel y cobalto a partir de los licores carbonato – amoniacaes se llevaron a cabo en la instalación experimental, equipada especialmente para el estudio de la influencia de la variación de los principales factores tecnológicos de los gastos de reagentes y semillas sobre la cinética del proceso de sedimentación de sulfuro de níquel y cobalto. La selectividad de la sedimentación de cobalto (relación del níquel respecto al cobalto en el licor), el nivel de extracción. El análisis de los resultados de las investigaciones sobre los datos experimentales permitió plantear las principales regularidades del proceso de separación de níquel y cobalto y valorar, en forma de pronóstico, sus perspectivas tecnológicas.

³ MUÑOZ MONER, Antonio F. Tecnología de control con análisis instrumental On-Line.

3.3.1 Estudio de la cinética de la sedimentación selectiva de sulfuros de cobalto a partir de los licores carbonato – amoniacaes

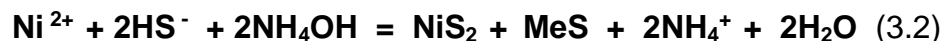
El sentido de la cinética de la sedimentación selectiva de sulfuros de cobalto está dado por la necesidad de determinar la velocidad de la reacción de la formación de la fase sólida del sulfuro de cobalto **CoS** con el contenido mínimo de sulfuro de níquel, a partir de las disoluciones carbonato – amoniacaes que contienen níquel. En estas disoluciones, la reacción de sus concentraciones ocupan el 40/1:50/1 por los datos obtenidos en la fábrica “Rene Ramos Latour” de Nicaro - Cuba. Partiendo de los razonamientos teóricos acerca de la sedimentación de los metales en forma de sulfuros puede afirmarse que el desprendimiento de los sulfuros poco solubles de cobalto está relacionado estrechamente con la composición del licor, en particular depende de su **pH** siendo esta magnitud en los licores industriales de la fábrica de Nicaro constantes y con un valor igual a diez. Si ésta magnitud se encuentra entre 9 y 11 existe entonces, ventajosamente, iones de **HS⁻**.

La reacción fundamental de sedimentación de sulfuro de níquel y cobalto a partir de los licores carbonato – amoniacaes está representada de la siguiente forma:

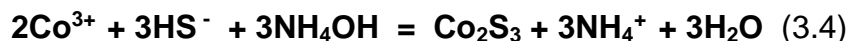


Pero el análisis rengteno – estructural de fase de las muestras de concentradores sulfurosos obtenidos a partir de los licores amoniacaes mostrando que:

- El níquel en las muestras está presente en la fase predominante de **NiS₂** estructura cúbica lo que atestigua acerca de cómo transcurre la reacción:



- El cobalto esta presente en forma de **CoS** de estructura hexagonal además de las reacciones mencionadas anteriormente, junto con el proceso ocurren las reacciones siguientes:



El cobalto se sedimenta en un mayor grado con respecto al níquel a partir de los licores carbonato – amoniacaes, a esta conclusión se llega a partir de las magnitudes de multiplicación de las solubilidades de los sulfuros de níquel y cobalto.

En medio acuoso (agua):

$$\begin{aligned} L \text{ NiS} &= [\text{Ni}^{2+}][\text{S}^{2-}] = 1.10^{-21} \\ L \text{ CoS} &= [\text{Co}^{2+}][\text{S}^{2-}] = 1,8.10^{-22} \\ L \text{ Co}_2\text{S}_3 &= [\text{Co}^{3+}]^2 [\text{S}^{2-}]^3 = 1,21.10^{-126} \quad (3.5) \end{aligned}$$

En el medio amoniacal se debe tener en cuenta la inestabilidad de los complejos:

$$[\text{Ni}(\text{NH}_3)_6]^{2+} / [\text{Co}(\text{NH}_3)_6]^{2+} = (k_2 L \text{ NiS}) / (k_1 L \text{ CoS}) = 2.4.10^4 \quad (3.6)$$

Por eso, en el licor se queda una gran parte del níquel se sedimenta en primer lugar el cobalto. El cobalto de valencia 3 (Co^{3+}) origina complejos amoniacales del tipo: $[\text{Co}(\text{NH}_3)_6]^{3+}$, entonces:

$$[\text{Ni}(\text{NH}_3)_6]^{2+} / [\text{Co}(\text{NH}_3)_6]^{2+} = (k_2 L \text{ NiS}) / (k_1 L \text{ Co}_2\text{S}_3) = 1.4.10^{78} \quad (3.7)$$

El obtenido habla acerca de que en el medio amoniacal, en presencia de iones de cobalto y níquel de valencia dos y tres ocurre la reacción (3.7). En las figuras 3.7 y 3.8 se muestran las características cinéticas, la variación del contenido residual del cobalto en el licor dentro del reactor tubular. En el tiempo de llegada de la pulpa al espesador, después de su salida del reactor tubular, ocurre el paso inverso al licor del cobalto. Este fenómeno está relacionado con que la fase líquida (el licor) contiene una pequeña cantidad de oxígeno disuelto; esto origina una oxidación de sulfuros de cobalto mediante la reacción:



En las figuras 3.9 – 3.12 se muestra la relación de equilibrio de la composición residual de cobalto en el licor y el gasto de semillas a diferentes concentraciones de cobalto en licor inicial.

3.3.2 Influencia del gasto de reactivos sobre el proceso de separación de cobalto

La influencia del gasto de reactivo para la sedimentación de sulfuros de cobalto está relacionada estrechamente con la concentración de este elemento en el licor carbonato – amoniacal que entra al reactor. En las figuras 3.9, 3.10, 3.11 y 3.12 está mostradas las dependencias de la variación del contenido residual de cobalto de la fase inicial de

la pulpa proveniente del reactor (en el licor) respecto al gasto de reactivos para diferentes gastos de semilla (concentrados de sulfuro de níquel y cobalto) y el mantenimiento del contenido residual de cobalto en el licor a una concentración determinada.

Estas dependencias que fueron estudiadas para diferentes concentraciones de cobalto en el licor inicial muestran que la concentración del cobalto residual en el licor disminuye proporcionalmente con el aumento de los gastos de reactivos; y teniendo en cuenta que mientras más grandes sea el gasto de semillas, menor es la necesidad de gastos de reactivos para mantener constante una determinada concentración de cobalto residual en el licor.

Figura 3.7 Relación cinética de la variación de Co residual en el licor para la sedimentación en el reactor.

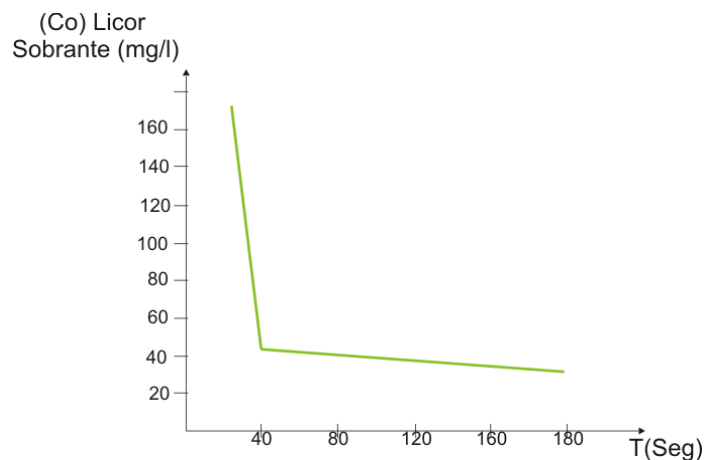


Figura 3.8 Relación cinética de la variación del contenido de Co^{+3} residual para la sedimentación en el reactor tubular.

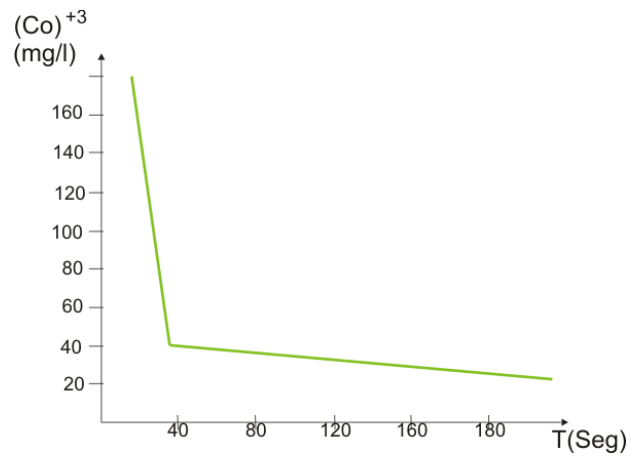


Figura 3.9 Relación entre el contenido de **Co** residual en el licor de salida del reactor y el gasto de reactivo para diferentes gastos de semilla.

1.: 3000mg/l 2.: 4000 mg/l 3.: 5000 mg/l

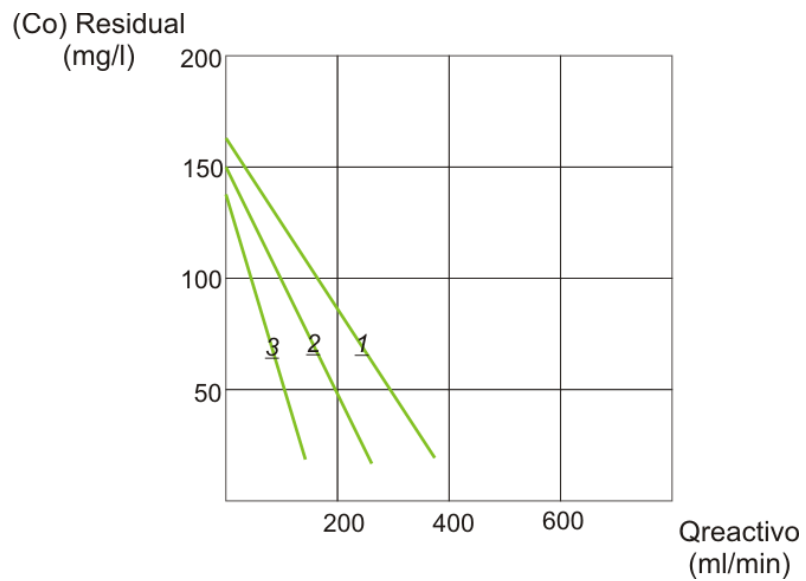


Figura 3.10 Relación entre el contenido de **Co** en el licor de salida de reactor y el gasto de reactivo para diferentes gastos de semillas.

1.: 3000mg/l 2.: 4000 mg/l 3.: 5000 mg/l

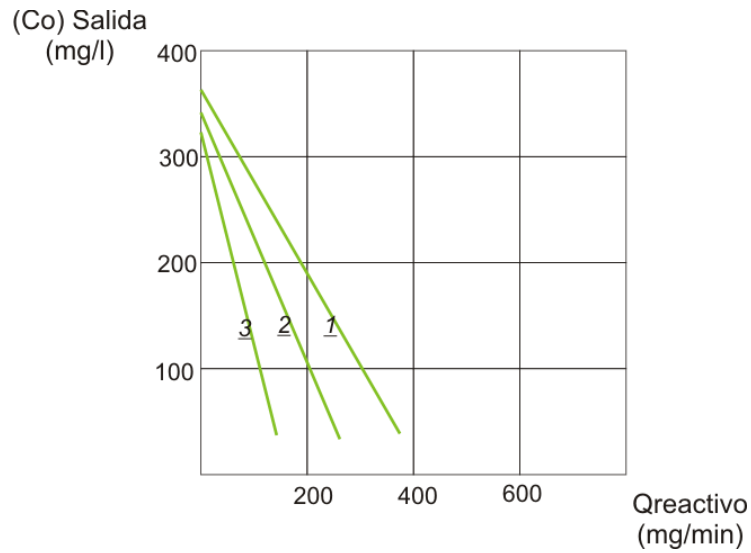


Figura 3.11 Relación entre el contenido de **Co** del reactor y el gasto de reactivo para diferentes gastos de semillas a la salida del sedimentador.

1.: 3000mg/l 2.: 4000 mg/l 3.: 5000 mg/l

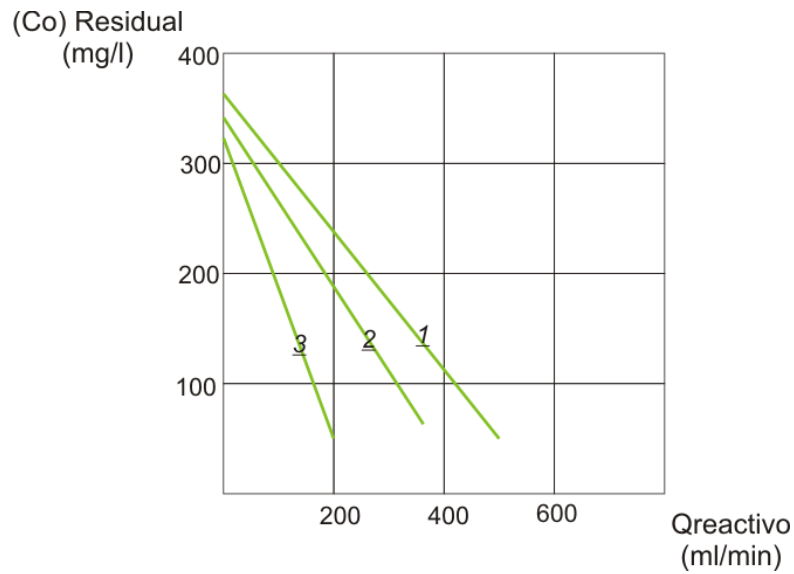
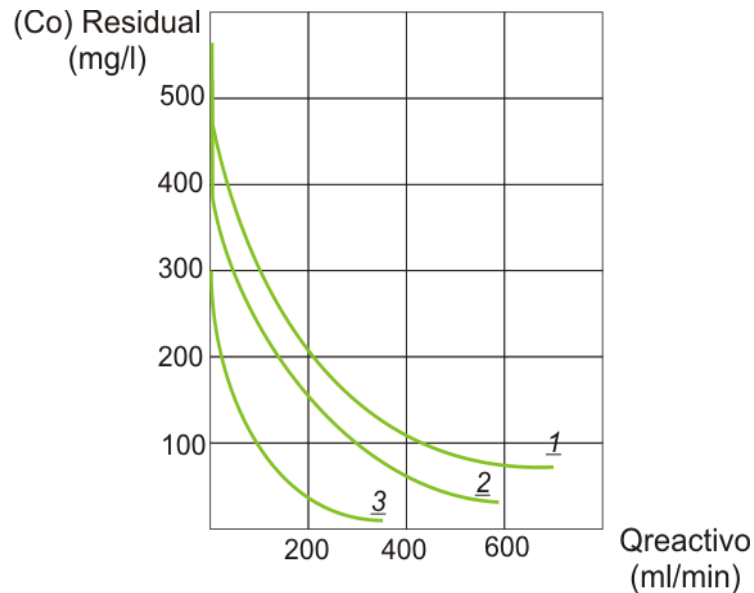


Figura 3.12 Relación entre el contenido de **Co** residual en licor de salida del reactor y el gasto de reactivo para diferentes gastos de semillas a la entrada del reactor.

1.: 3000mg/l 2.: 4000 mg/l 3.: 5000 mg/l



Además con el aumento de la concentración de cobalto en el licor es necesario aumentar el gasto de reactivo. Como afirmación de las conclusiones hechas anteriormente sirven los gráficos 3.13, 3.14, y 3.15 los cuales muestran la relación existentes el gasto necesario de reactivos y el gasto de semillas para mantener estable una determinada concentración de cobalto residual a la salida del reactor, para diferentes concentraciones de cobalto en el licor inicial. Así puede considerarse que existe un determinado intervalo en el gasto de semillas cuando este tiene influencia sobre el proceso de sedimentación de cobalto. Hasta el principio y fuera de las fronteras de éste intervalo, el gasto de semillas no influye sobre la sedimentación. En el intervalo mencionado, con el aumento del gasto de semilla disminuye la cantidad necesaria de reactivo para mantener una determinada cantidad de cobalto residual, lo que constituye una ventaja, pues el valor por tonelada de **NH₄HS** oscila entre los límites de 3 hasta 10000 dólares.

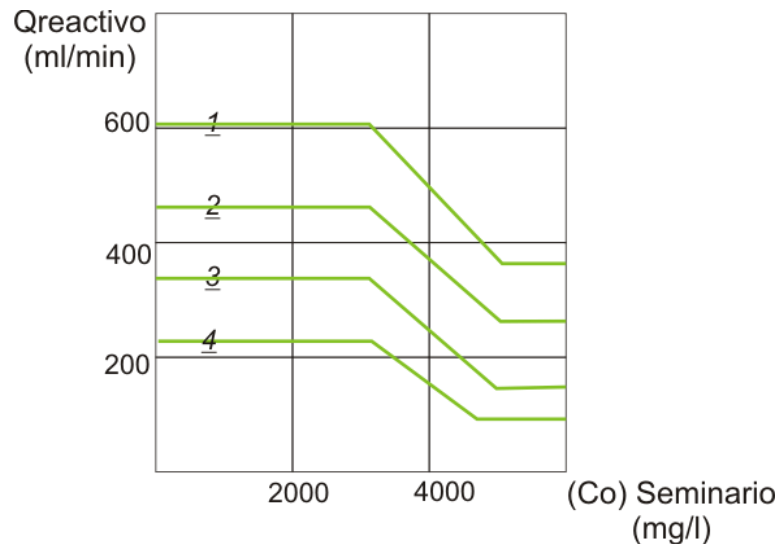
Figura 3.13 Relación entre el gasto de reactivo y el gasto de semilla para 60mg/l de Co residual en el licor de salida del reactor de acuerdo a diferentes valores de concentración en el licor inicial.

1.: 0.6g/l

2.: 0.45g/l

3.: 0.31g/l

4.: 0.22 g/l



Las reacciones expuestas fueron obtenidas a la salida del reactor, pero para condiciones semejantes, los gráficos 3.16, 3.17, y 3.18 muestran que en la salida del espesador, con el aumento de los gastos de semilla por encima de un valor determinado, el gasto necesario de reactivos también aumenta. Esto se explica por la aparición del paso inverso del cobalto a licor, ya que en el momento de llegada de la pulpa después del reactor hacia el espesador ocurre la reacción secundaria del sulfuro de cobalto con la pulpa disuelta en la fase líquida provocando una oxidación de los sulfuros de cobalto mediante las reacciones descritas en [34] por lo que la concentración de cobalto en el licor aumenta nuevamente. En todas estas reacciones, mientras mayor es el contenido de cobalto en el licor inicial mayor será la cantidad a suministrar el reactivo a la entrada del reactor.

Figura 3.14 Relación entre el gasto de reactivo y el gasto de semilla para 40mg/l de **Co** residual a la salida del reactor y diferentes concentraciones en el **Co** en el licor inicial.

1.: 0.6g/l

2.: 0.45g/l

3.: 0.31g/l

4.: 0.22 g/l

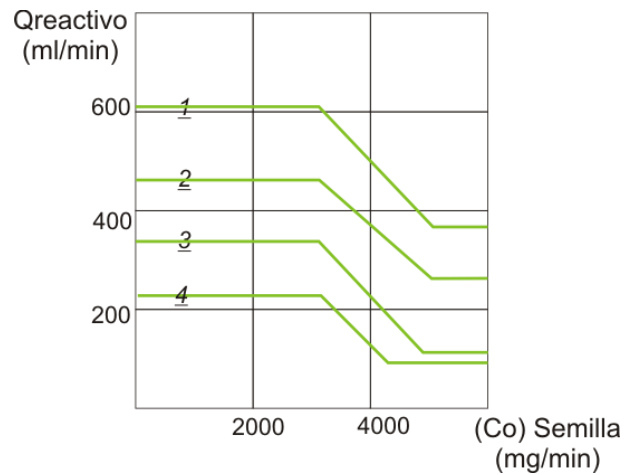


Figura 3.15 Relación entre el gasto de reactivo y el gasto de semilla para una concentración de $C_o=10\text{mg/l}$ según valores de concentración de C_o en el licor inicial.
 1.: 0.6g/l 2.: 0.45g/l 3.: 0.31g/l 4.: 0.22g/l

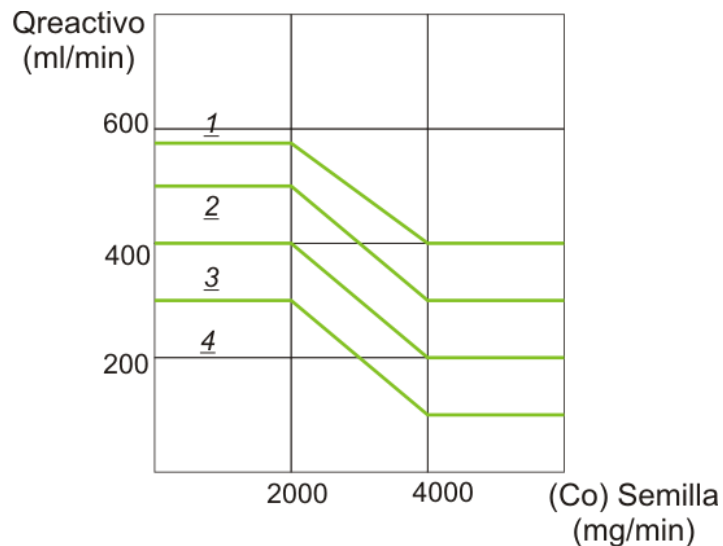


Figura 3.16 Relación entre el gasto de reactivo y semilla para la concentración constante de C_o residual igual a 60mg/l a la salida del espesador según valores de concentración de C_o en el licor inicial

1.: 0.6g/l 2.: 0.45g/l 3.: 0.31g/l 4.: 0.22g/l

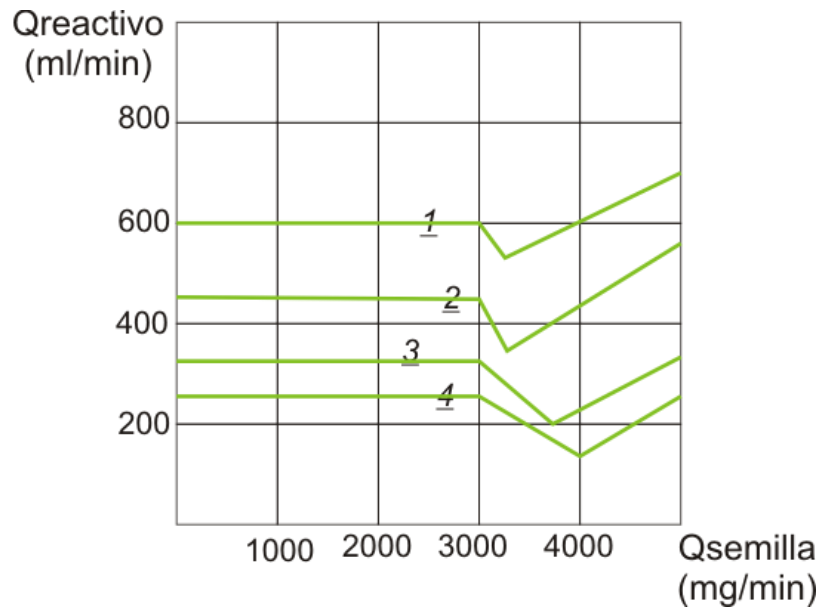


Figura 3.17 Relación entre el gasto de reactivo y semilla para 40mg/l de **Co** residual a la salida del espesador según su variación en el licor inicial.

1.: 0.6g/l 2.: 0.45g/l 3.: 0.31g/l 4.: 0.22 g/l

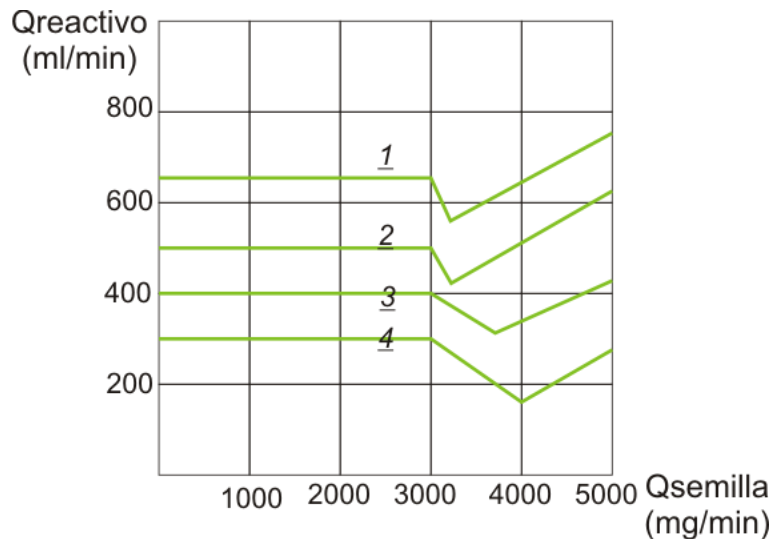
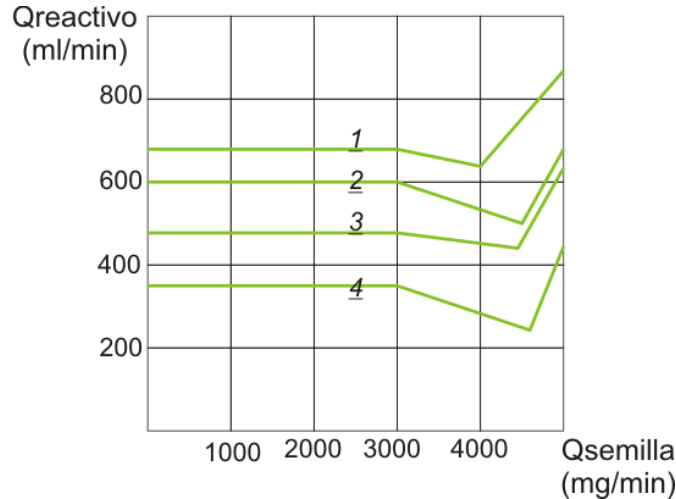


Figura 3.18 Relación entre gastos de reactivo y semilla para 10mg/l de **Co** residual en el licor de salida del espesador según diferentes concentraciones de **Co** en licor inicial.

1.: 0.6g/l 2.: 0.45g/l 3.: 0.31g/l 4.: 0.22 g/l



3.3.3 Influencia del gasto de semilla en el proceso de separación de cobalto

El análisis de la influencia del gasto de semillas, a juzgar por las relaciones mencionadas, muestra que el ahorro del costoso reagente se puede alcanzar mediante el aumento de los gastos de semilla hasta un valor determinado.

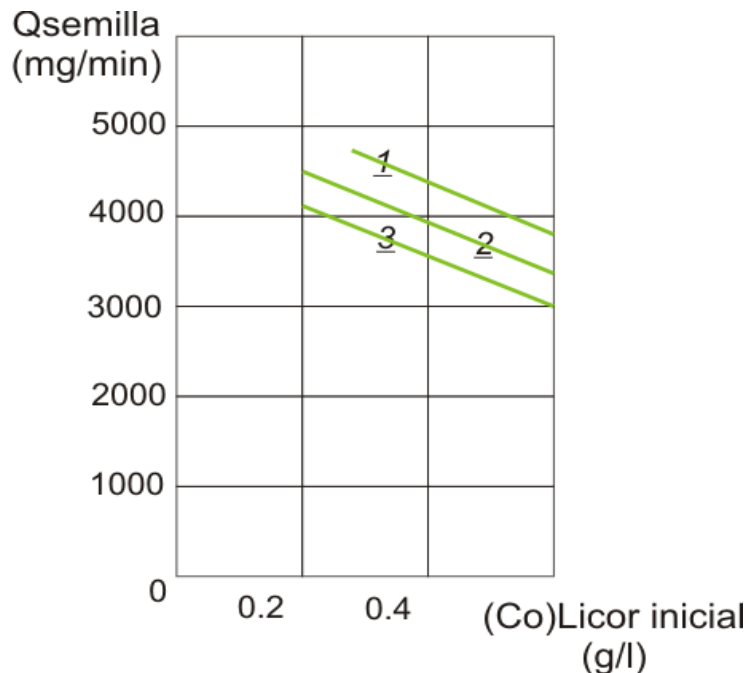
En las figuras 3.16 y 3.18 los gráficos tienen un carácter experimental, es decir, se tiene un mínimo, por eso existe un gasto óptimo de semillas, para lo cual se obtiene un mínimo de gastos de reagente. Estos gráficos para diferentes concentraciones de cobalto en el licor inicial se diferencian por el lugar de posición del mínimo.

En la figura 3.19 se muestran los mínimos de gastos óptimos mostrados por los valores de gasto de semilla a los cuales corresponden los mínimos de gastos de reactivos para diferentes concentraciones de cobalto en el licor inicial.

Cada concentración muestra en la figura 3.18 un contenido determinado de cobalto residual en el licor de salida del espesador. El mínimo de gastos de reagentes alcanzado mediante un flujo de semilla determinado representa el óptimo económico. Este último está determinado porque el principal artículo sobre gastos para la mayor transformación es el relacionado con los gastos de reagentes. El gasto de energía eléctrica en el rebombeo del concentrado sulfuroso (semillas) es muy pequeño, como se puede observar en [34], por los datos experimentales y por esto es racional llevar a cabo el proceso del mínimo de gastos de reagentes, sin tener en cuenta la magnitud del gasto de semillas necesario para el abastecimiento de ésta descomposición.

Figura 3.19 Relación entre el gasto óptimo de semillas y el contenido de **Co** en el licor inicial para mantener la concentración de **Co** residual del licor de salida del espesador a un valor determinado.

1.: 10mg/l 2.: 40mg/l 3.: 60mg/l



La investigación del proceso y sus agregados en condiciones industriales es siempre compleja, larga y costosa, en estas condiciones es difícil tener en cuenta la influencia de todos los factores determinantes y establecer la efectividad de su acción conjunta, por eso para efectuar las investigaciones experimentales de la tecnología de separación de níquel y cobalto fue creada una instalación experimental en la cual fueron tomadas en cuenta las expresiones de demanda de la *teoría de la semejanza* [20] con el objetivo de compatibilizar los resultados experimentales con el objeto industrial.

La base de datos que se consulto como referencia para la elaboración de esta investigación fue tomada de un proyecto realizado por el Director, con las empresas de níquel cubanas. Sin embargo los desarrollos de la metodología de clonación artificial forman parte de la investigación realizada en el tema de indagación de la Maestría, y para lo cual se establecieron diferentes entornos industriales tales como: inicialmente Termo Paipa IV - Boyacá, posteriormente planta de Visco reducción Refinería - Barrancabermeja y finalmente dadas las características y disponibilidad de información

completa sobre los sistemas de control, objeto de clonación, se adopto la fábrica de Níquel cubana, mencionada en el trabajo.

4. METODOLOGÍA DE APLICACIÓN AL PROCESO DE SEPARACIÓN DE NÍQUEL Y COBALTO

4.1 DESCOMPOSICIÓN DE LA TAREA DE SÍNTESIS ESTRUCTURAL DEL SISTEMA DE DIRECCIÓN DEL PROCESO

Se puede decir que el objetivo de dirección para una productividad determinada de cobalto (es decir para un flujo dado de licor tratado) es garantizar tal dirección con los flujos de reactivos y un flujo recirculado de semilla para con el cual se logra un mínimo de gastos de reactivos, es decir el problema de dirección se formula de la siguiente forma:

$$\Gamma = \left(\int_0^{10+T} Q_r dt \right) / \left(\int_0^{10+T} Q_{pe} dt \right) \quad (4.1)$$

Q _r	Cantidad de reagente utilizado por unidad de tiempo
Q _{pe}	Masa de producción elaborada por unidad de tiempo
T	Fragmento de tiempo en el cual se calcula el criterio Γ

Aquí es necesario tener en cuenta las limitaciones de tipo igualdad (del modelo matemático) para propiedades dadas de perturbaciones y limitaciones.

$$[Co]_{\min} \leq [Co]_{licor.residual} \leq [Co]_{\max} \quad (4.2)$$

Donde $[Co]_{licor.residual}$, $[Co]_{\max}$ y $[Co]_{\min}$ son el contenido de cobalto residual en el licor del rebose del sedimentador y los valores máximos y mínimos permisibles respectivamente, y $Q_{licor.inicial}$ es el flujo inicial para una productividad dada.

Como resultado de la experiencia acumulada en las empresas cubanas, las cuales trabajan por el esquema tecnológico (Método de precipitación en forma de sulfuros), se pueden obtener las siguientes perturbaciones principales del proceso:

$X_1(t)$ – variación de la composición del reactivo (concentración de NH_4HS) la cual puede disminuir el nivel de sedimentación de cobalto a partir del licor carbonato-amoniacal. La

variación de la composición del reactivo depende del trabajo del departamento de hidrosulfuro de amonio, donde mediante la absorción de amoniaco se logra el valor necesario de la concentración.

$X_2(t)$ – variación de la composición del licor carbonato amoniacal de lixiviación. La cuál está relacionada con la composición respecto a las concentraciones de mineral entregado al proceso, depende del trabajo en el departamento de lixiviación.

Por lo general, la perturbación dada influye en la velocidad de sedimentación y en el gasto necesario de reactivo.

$X_3(t)$ – variación de la concentración de cobalto en los licores carbonato-amoniacaes. Esta perturbación está relacionada con lo anterior pero es racional analizarlo por separado ya que la concentración de cobalto en los licores iniciales en forma general, determina los índices de gastos del proceso (variaciones límites de la concentración en los licores carbonato-amoniacaes 0,1 – 0,6 g/l y esta se puede variar en los casos en que se conserva la relación necesaria de níquel respecto al cobalto).

$X_4(t)$ – variación de la productividad, la cual está relacionada no solo con la inexactitud de los equipos que miden el flujo que alimenta una línea de sedimentación de sulfuros, sino con la variación de alimentación de la línea de licor encaminada a alcanzar este objetivo por diferentes causas tecnológicas.

Este es uno de los parámetros, de quien su variación influye más negativamente en la extracción del cobalto, dado por que para un gasto inestable de licores es necesario ajustar los índices fundamentales del reactor tubular y el sedimentador (el gasto de reactivos) con un determinado retardo originado por el tiempo de llegada del licor carbonato-amoniacal al reactor y sedimentador. Todas las perturbaciones antes mencionadas se pueden considerar débilmente controlables excluyendo la productividad, por lo que se pueden llamar exponencial-correlativos. Por eso, se puede considerar que la función correlacional y la densidad espectral de la perturbación $X_1(t)$ tiene la forma siguiente:

$$R_{xi}(t) = D_{xi} e^{-\lambda_{xi} t} \quad (4.3)$$

$$S_x(w) = (D_{xi} \lambda_{xi}) / [P(\lambda_{xi}^2 + w^2)] \quad (4.4)$$

D_{xi}	Dispersión del proceso estacionario casual
λ_{xi}	Coficiente de extinción de la función correlacional

Partiendo de la práctica productiva, se tomaron los valores de orientación de la dispersión y el coeficiente de extinción x_i (tabla 4.1) para investigar la síntesis del sistema de dirección. Además las perturbaciones antes mencionadas son débilmente correlacionadas. Con mucha frecuencia para la descomposición de la tarea de dirección de procesos metalúrgicos se utilizan las diferencias entre características de las perturbaciones no regulables, las cuales influyen sobre estos procesos. Entre estas perturbaciones siempre se pueden separar las rápidas y las lentas; por esto se tomaron el principio de la descomposición frecuencial, basado en el método de regulación jerárquica de los parámetros del régimen tecnológico donde la calidad en la dirección se evalúa por el criterio:

$$\Gamma = m_{ij}(A_i, A_{jk})dt \quad (4.5)$$

A_i	Parámetros del régimen tecnológico
A_{jk}	Índice no regulables de las propiedades de los flujos

Tabla 4.1. Valores de los coeficientes de extinción (amortiguamiento) y dispersión de las principales perturbaciones.

Parámetros	Canal de perturbaciones			
	$X_1(t)$	$X_2(t)$	$X_3(t)$	$X_4(t)$
Coefficiente de extinción	0,22	0,27	0,32	0,32
Dispersión	$0,402 \cdot 10^{-4}$	$0,20 \cdot 10^{-9}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	0,28

En la ecuación (4.5) la magnitud m_{ij} se obtiene mediante la solución del sistema de ecuaciones del modelo matemático respecto a todos los flujos, y está expresada en forma de función del régimen y de los índices de las propiedades de la función m_{ij} se puede determinar la efectividad económica del proceso de separación en el tiempo T, ya que ella determina los gastos específicos. Con otras palabras, la función m_{ij} se puede expresar a través de la relación existente entre los gastos de la materia prima utilizada y de energía respecto a la cantidad de producción de componente útil extraído de los licores carbonato-amoniacaes (extracción de cobalto, la cual en este caso se determina a través de la variación de la concentración del cobalto que queda en el licor que sale del reboso del sedimentador).

Si las propiedades del sistema fueron invariables en el intervalo $(t_0, t_0 + T)$ entonces fuera posible determinar tales valores de los parámetros del proceso A_i los que minimizan Γ para los valores dados de A_{jk} . Si varían los índices no regulables de A_{jk} (las perturbaciones) entonces para minimizar el criterio es necesario variar los parámetros del régimen tecnológico. Para vencer las dificultades de solución del problema de minimización del criterio no lineal y para las limitaciones creadas por el sistema de ecuaciones diferenciales no lineales es racional la descomposición del problema de dirección. Para tal descomposición, la estructura de dirección está compuesta por tres niveles:

- Nivel inferior: determinado por los lazos estabilizadores de dirección del proceso de separación de níquel y cobalto del licor carbonato-amoniaco y el gasto de reactivo Q_r , estos subsistemas reprimen las perturbaciones de alta frecuencia (estabilizan los flujos de sustancias).
- Nivel medio: compuesto por sistemas estabilizadores combinados de ecuaciones de la concentración de cobalto residual en el licor carbonato-amoniaco, la tarea de estos sistemas es de contrarrestar la acción de aquellos componentes de las perturbaciones, los que provocan variaciones (oscilaciones) de frecuencia media $[X_i(t)]$, $i = (1, \dots, 4)$. La acción reguladora de los sistemas de nivel medio está determinada por la variación de las tareas a los lazos estabilizadores de alta frecuencia del nivel inferior.
- Nivel superior: determina la variación del valor límite de la concentración de cobalto residual en el licor carbonato-amoniaco en el reboso del sedimentador; la acción reguladora de los sistemas del nivel superior está dada por la variación de la tarea del sistema estabilizador del nivel medio la cual es necesario formular teniendo en cuenta el régimen tecnológico de todo el complejo productivo.

El nivel superior demanda de un análisis de todo el complejo metalúrgico ya que el nivel de separación de cobalto del licor carbonato-amoniaco (el cual depende del proceso de separación de níquel y cobalto) influye en la efectividad de los posteriores procesos metalúrgicos. Para la síntesis del sistema de frecuencia media en los subsistemas de alta frecuencia es poco despreciable en comparación con las magnitudes T_{ϕ_i} (constantes de tiempo de los filtros formadores convertidores de ruidos (t) en perturbaciones de frecuencia media).

$$T_{\phi_i} = 1 / \lambda_{xi} \quad (4.6)$$

$$T_{\phi} (dX_i / dt) + X_i = \gamma \quad (4.7)$$

Los sistemas de alta frecuencia se consideran absolutamente exactos no inerciales.

4.2 METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE LOS SUBSISTEMAS ESTABILIZADORES DE FRECUENCIA MEDIA

El objetivo de discusión está dado por la minimización del criterio (4.1) el que posibilita llevar a cabo el proceso de separación de níquel y cobalto con el mínimo de gastos de reagentes (hidrosulfuro de amonio). El método principal de dirección será mediante la variación de la entrega del flujo de reagentes. Esto se explica porque la sedimentación de cobalto con hidrosulfato de amonio ocurre a una gran velocidad y la reacción de sedimentación de cobalto con semilla está limitada por la difusión y la superficie de división de las fases, por esto ella ocurre a una velocidad inferior. Teniendo en cuenta la síntesis del subsistema de dirección que contabiliza la concentración de cobalto en el licor que sale del reboso del sedimentador, se dificulta con las siguientes situaciones:

A) El proceso de separación de níquel y cobalto, como objeto de regulación está descrito por el sistema de ecuaciones diferenciales no lineales en derivadas. Esto prácticamente incluye la posibilidad de la utilización en forma "clásica" de la metodología de síntesis lineal óptima; basada en la síntesis acerca de lo lineal del modelo matemático, el cuadrado del criterio de la calidad de dirección. El criterio de la calidad de la dirección (medida de diferencias – criterios de calidad de regulación) puede ser tomado en forma cuadrática y las principales perturbaciones se pueden considerar procesos exponenciales estacionarios y casuales con modelos lineales dados de los filtros formadores. En este sentir se cumplen demandas clásicas de las hipótesis lineales. Sin embargo, el hecho que este modelo del proceso es no lineal, se contrapone con estas hipótesis. Se pudiera intentar con el objetivo de síntesis, de minimizar la descripción matemática del proceso, pero los coeficientes del modelo linealizado, es muy posible que resulten variables en el tiempo respecto a sus dimensiones; esto hace la metodología prácticamente inutilizable.

B) Por la síntesis del sistema de dirección del proceso, es necesario tener en cuenta las limitaciones de desigualdad apoyadas en la acción reguladora y una serie de parámetros del proceso tecnológico. Teniendo en cuenta una alta diversidad de medidas de modelo del proceso regulable, aquí es imposible utilizar aquellas simplificaciones prácticas útiles, las cuales que suponen su utilización en la síntesis de sistemas industriales de dirección de procesos tecnológicos.

C) En la creación del sistema de dirección del proceso se puede contar solo con la utilización de resultados de determinación analítica, de estos índices en las muestras relativamente escasas escogidas de determinadas sustancias (no más de una vez por hora).

Tal control discreto introduce en los lazos de elaboración de información un retardo adicional desde el momento de selección de la muestra hasta el momento de introducción de la información en el equipo regulador. Este retardo es igual a los gastos de tiempo en la transportación, elaboración e investigación analítica de la muestra. El control analítico discreto con retardo también imposibilita la utilización de dicha síntesis.

La utilización de los filtros del pronóstico para la comprobación parcial de los retardos de la información, no facilita el problema de síntesis, surgen “ruidos del pronóstico” adicionales, crece la dimensión del problema.

La utilización de métodos preventivos para la síntesis de lazos discretos, basados en la transformación discreta de Laplace o de transformaciones z , teniendo en cuenta las medidas del modelo matemático tampoco es posible llamarla constructiva.

Por las causas mencionadas para la síntesis del sistema de dirección del proceso de separación de níquel y cobalto, fue utilizada una metodología especial que incluye la utilización del principio de seudoinvariabilidad en combinación con la modelación imitacional de subsistemas separados del sistema de dirección combinados sintetizable. Fueron tomadas en cuenta las combinaciones siguientes:

4.2.1 Realización practica del sistema de dirección del proceso teniendo en cuenta las circunstancias mencionadas anteriormente

Para esto es necesaria la utilización de procedimientos algorítmicos, que incluyen el pronóstico y la compensación de las perturbaciones y la retroalimentación. Sin embargo la precisión de tal sistema (en el sentido del criterio cuadrático mencionado) es más o menos equivalente en la práctica con la precisión de la dirección del sistema combinado que incluye compensadores seudoinvariantes de las perturbaciones medibles y contornos de retroalimentación que formulan las acciones aditivas de dirección mediante los análogos discretos de los algoritmos PI sobre la base de los resultados del control analítico discreto con retardo.

La síntesis mediante la linealización del modelo matemático se determinan las funciones de transferencia $W_x(p)$ y $W_\mu(p)$ del proceso regulable por los canales de las principales perturbaciones x_i (variación de los índices de composición del licor carbonato-amoniaco y el reactivo) y la regulación de las variaciones w de la entrega de reactivo hidrosulfuro de amonio al reactor, el sistema combinado se puede analizar como un conjunto de seudosistemas (fig. 4.1) igual numéricamente a la dimensión del resto de las perturbaciones compensables.

En cada subsistema se determina la función de transferencia $F(x)$ del compensador “realizado” de las perturbaciones X_i mediante la condición de la magnitud absoluta de la invariabilidad f de la perturbación X_i :

$$F_x(p) = [W_x(p)]/[W_\mu(p)] \quad (4.8)$$

Para la compensación ideal de todas las perturbaciones, el lazo de retroalimentación no es necesario, por esto luego de la síntesis de los compensadores mediante la relación (4.8) se puede considerar que:

$$F_f(p) = 0 \quad (4.9)$$

4.2.2 Compensador ideal

El compensador ideal (fig. 4.1) no es posible ni rentable, pero su síntesis e investigación permiten establecer hasta que grado no es lineable el proceso dirigible a través de los canales de las principales perturbaciones, la necesidad de adaptación a la regulación de los algoritmos lineables y las variaciones reguladoras límites Q_p , lo que quiere decir que también determinamos la carga del lazo que actúa sobre el proceso de sedimentación de cobalto. Si ocurre que los compensadores idealizados de cada una de las principales perturbaciones garantizan casi la compensación invariable (sin la regulación del cuello con suficiente sencillez en la adaptación), entonces el sistema con tal compensación puede llamarse casi lineal en el sentido de la reacción ante la perturbación.

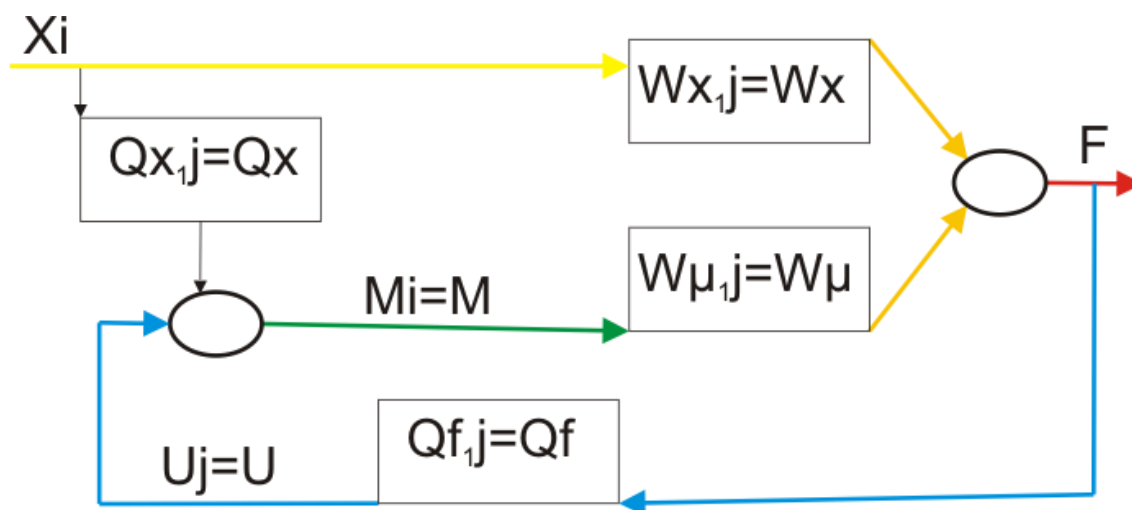
La investigación de los compensadores realizados posibilita valorar el error de modelación del proceso y el conocimiento impreciso de los parámetros de las perturbaciones en la calidad de dirección, teniendo en cuenta que la compensación ideal, a veces no puede ser realizada generalmente por las causas siguientes:

- A) Es imposible e irracional medir todas las perturbaciones.
- B) No se puede medir sin error ni un solo valor de X_j .
- C) No se puede garantizar con gran exactitud la descripción del proceso metalúrgico mediante las funciones de transferencia W_x y W_μ .

4.3 ALGORITMOS PARA LA COMPENSACIÓN DE PERTURBACIONES Y SU AUTORREGULACIÓN

La descomposición del sistema que contiene gran cantidad de lazos es posible gracias a la acción de las señales μ_i por dos canales sobre la magnitud f . Los razonamientos sencillos posibilitan establecer que la descomposición de la estructura de este sistema conlleva a la descomposición de la tarea para su síntesis óptima. Es necesario recordar que el problema real de dirección puede diferenciarse cuanto sea del compensador ideal. Estas diferencias pueden ser investigadas por separado para cada uno de los múltiples canales del compensador y tomados en cuenta en la síntesis independiente de cada lazo de retroalimentación.

Figura 4.1- Estructura del Seudosistema



Para la evaluación de diferentes variantes del sistema de dirección es necesario resolver una serie de problemas de síntesis óptima de diferentes seudosistemas. Así el proceso tecnológico regulable (ptr) se caracteriza por el índice f en la variación de este índice influyen un número "k" de perturbaciones de tipo λ , entonces será necesario investigar un número "k" de seudosistemas. Sin embargo, cada uno de ellos se puede analizar por una misma metodología, lo que simplifica considerablemente todo el problema de evaluación de este sistema y posibilita algoritmizar la solución de este problema.

Como se expresa en 4.2.1 para el análisis y la síntesis del sistema de dirección es utilizable el compensador ideal (fig. 4.2) que contrarresta las principales perturbaciones X_i (observar 4.1.) con su ayuda se puede valorar la posibilidad de alcanzar un mínimo del criterio (4.1) por cada canal de perturbaciones por separado.

En la aproximación lineal se toma que la variación Δf de la concentración de cobalto está compuesto por dos miembros:

$$\Delta f = \Delta f_x + \Delta f_\mu \quad (4.10)$$

Donde: Δf_x y Δf_μ - variaciones de la cantidad de cobalto f, originados por los canales de perturbaciones y regulaciones. Las variaciones que describen la variación Δf_x y Δf_μ se pueden tomar como ecuaciones de primer orden con retardo:

$$Tx[(d\Delta f_x)/(dt)] + \Delta f_x = Kx\Delta x(t - \tau_x) \quad (4.11)$$

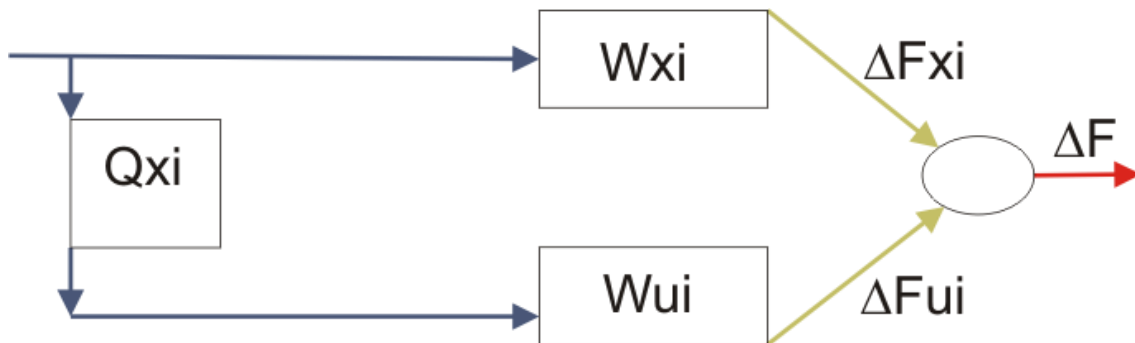
$$T\mu[(d\Delta f_\mu)/(dt)] + K\mu\Delta\mu(t - \tau_\mu) \quad (4.12)$$

Tx , $T\mu$ - constantes de tiempo por los canales de perturbaciones y dirección respectivamente.

Kx , $K\mu$ - coeficiente de amplificación por los canales de perturbación y dirección respectivamente.

τ_x, τ_μ - retardo por los canales de perturbación y dirección respectivamente.

Figura 4.2- Compensador ideal.



Para llevar a cabo la síntesis del compensador se analiza el caso en que la función de transmisión por el canal de perturbación Wx y dirección $W\mu$ son de primer orden con retardo.

$$Wx(p) = (Kxe^{-\tau p})/(Txp + 1) \quad (4.13)$$

$$W\mu(p) = (K\mu e^{-\tau p})/(T\mu p + 1) \quad (4.14)$$

Para garantizar la invariabilidad absoluta de la magnitud de las perturbaciones, es decir para que se cumpla la condición $\Delta_x W_x + \Delta_x F_x W_\mu = \Delta f = 0$, es necesario que la función de transmisión del compensador F_x fuera igual a:

$$F_x = (W_x / W_\mu) = [-K_x(T_\mu p + 1)e^{-p(t_x - t_n)}] / [K_\mu(T_x p + 1)] = [\Delta\mu(p)] / [\Delta x(p)] \quad (4.15)$$

Para utilizar la relación (4.15) para la síntesis del compensador, es necesario conocer las funciones W_x y W_μ del objeto de regulación. Estas funciones se obtienen experimentalmente en el modelo matemático. Con ayuda del modelo matemático se determinaron por separado las curvas de impulso para los principales canales de perturbación y regulación para una variación en saltos del gasto de licor carbonato-amoniaco, de reactivo de la concentración de cobalto y la relación níquel respecto al cobalto en el licor inicial.

Las curvas de impulso fueron obtenidas para los valores nominales de perturbaciones, estas se muestran en la fig. 4.3.

Las curvas obtenidas dan la base para crear la función de transferencia del objeto por cada canal de perturbaciones en forma:

$$W(p) = [X(p)] / [X_o(p)] = [K_{OBJ} / (T_{INV} + 1)] e^{-dNV} \quad (4.16)$$

Figura 4.3. X_1 --- Co

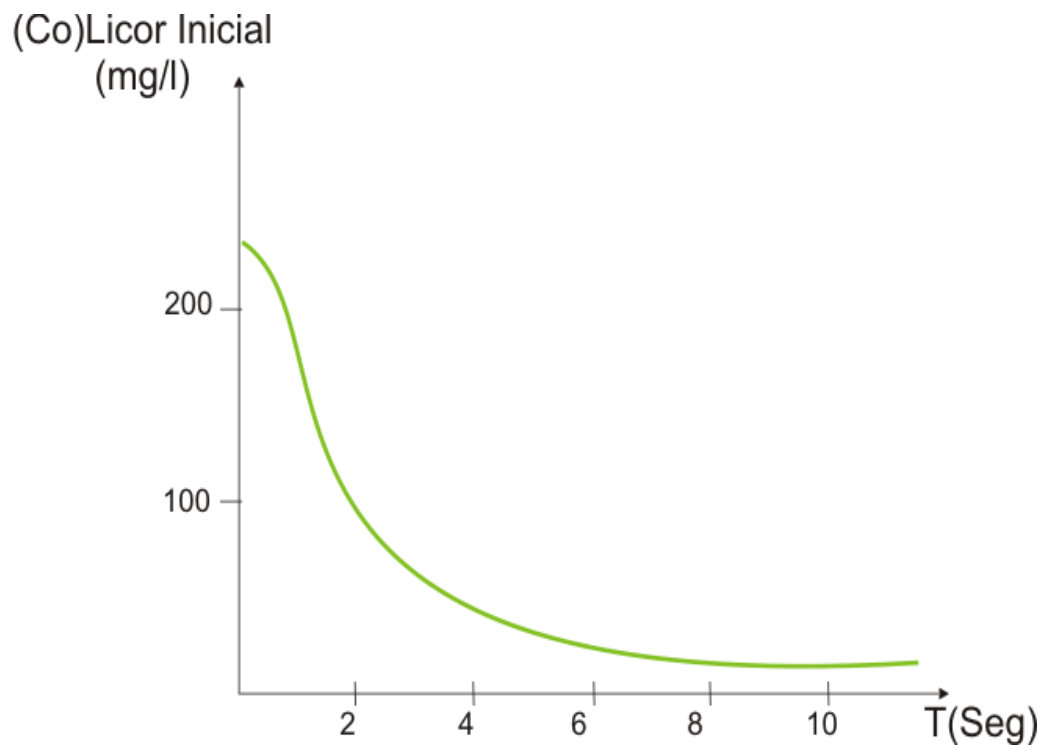


Figura 4.4. X_3 --- Co

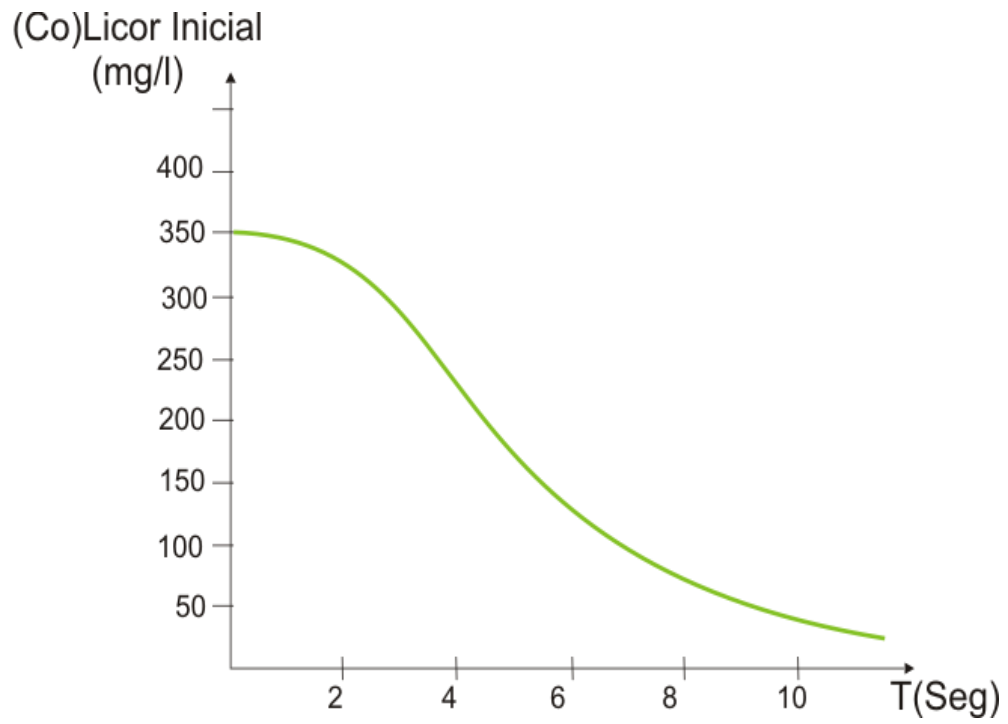


Figura 4.5. Q --- Co

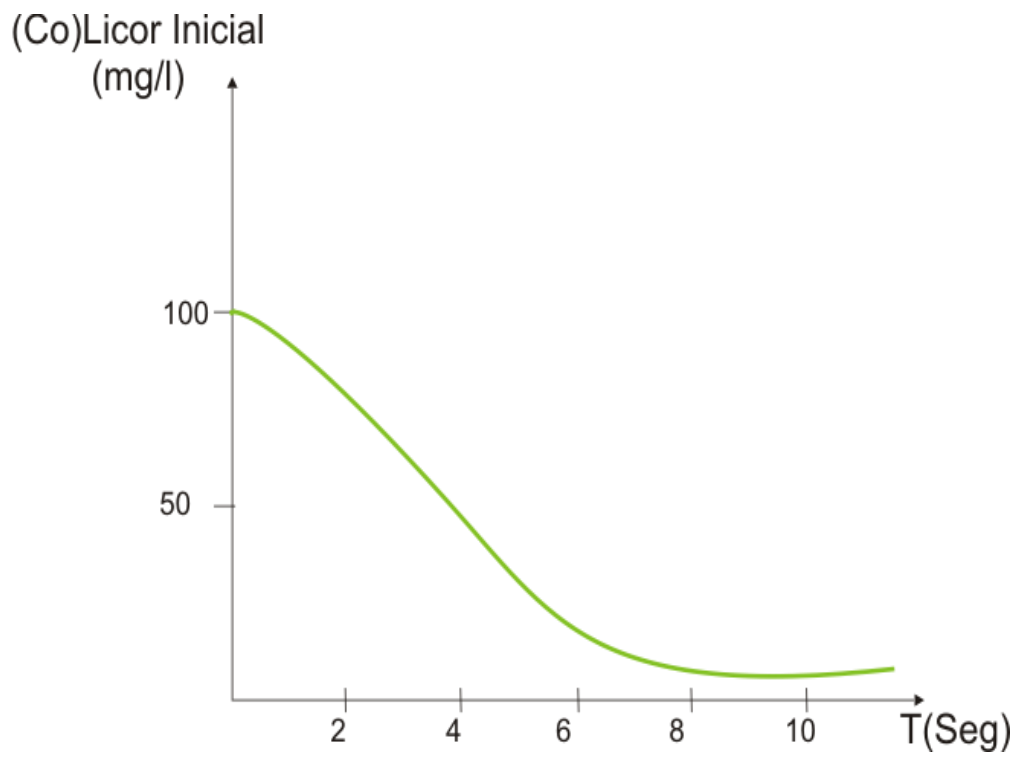


Figura 4.6. X₄ --- Co

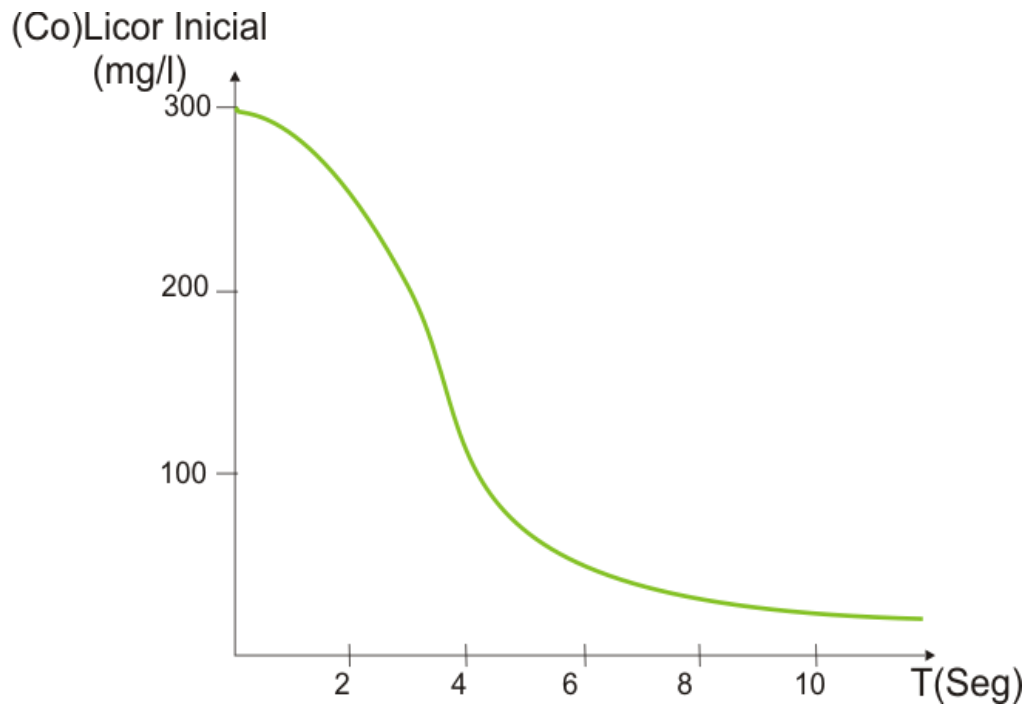
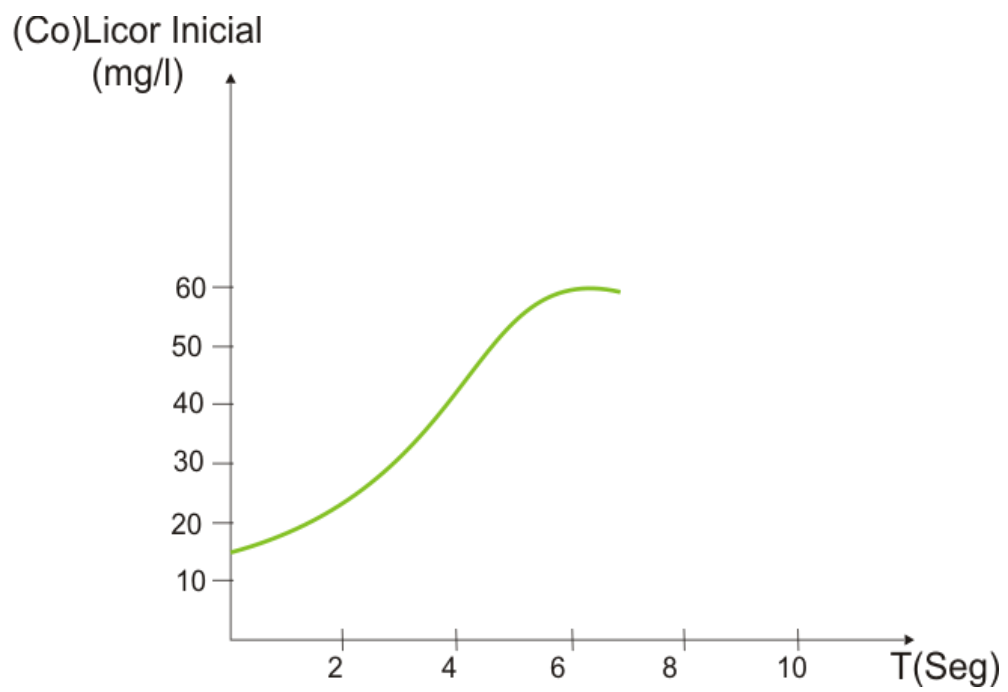


Figura 4.7. X₂ --- Co



Para una variación del diapasón de oscilación de los factores perturbadores, inevitablemente varían el coeficiente de amplificación del objeto K_{ob} , la constante de tiempo del objeto T_{ob} , el retardo del objeto t_{ob} . Por esto es necesario efectuar los experimentos para determinar la variación de estos parámetros en los diferentes regimientos posibles del proceso de separación de Ni y Co. Los parámetros K_{ob} , T_{ob} y t_{ob} , fueron obtenidos para una variación del vector X_i de hasta 30% del valor nominal. Los resultados de los experimentos se muestran en la tabla 4.2. Entonces luego de saber el valor de todos los parámetros en el miembro derecho de la función 4.16 se determina el algoritmo de trabajo de los compensadores, es decir los algoritmos de formación de la dirección $M(t)$ [34].

Tabla 4.2. Valores de los parámetros del modelo linealizado del proceso de separación de Ni y Co.

Canal	Tob(H)			t _{ob} (H)			Kob(H)		
	10%	20%	30%	10%	20%	30%	10%	20%	30%
X ₁	1,7	1,7	1,7	1,01	1,01	1,01	0,9	0,95	1
X ₂	2,1	2,1	2,2	0,75	0,72	0,76	3,8	3,2	4
X ₃	1,1	1,2	1,1	0,6	0,71	0,8	0,03	0,02	0,08
X ₄	1,4	1,3	1,5	1,1	1,02	1	0,01	0,042	0,02
ΔQ_m	1,8	0,91	1,9	0,9	0,35	0,92	0,031	0,017	0,024

De la relación operacional 4.15 obtenemos:

$$\Delta\mu(p)(Txp + 1) = [(-Kx / K\mu)(T\mu p + 1)]e^{-p(tx-t\mu)} \Delta xp \quad (4.15.1)$$

En un tiempo discreto:

$$\Delta\mu(n\Delta t) = \{1 / [(Tx / \Delta t)]\} \{ (Tx / \Delta t) \Delta\mu[(n-1)\Delta t] - (Kx / K\mu) - [(T\mu / \Delta t) + 1] - \Delta x(n\Delta t - \Delta\tau) - (T\mu / \Delta t) \Delta x[(n-1)\Delta t - \Delta\tau] \} \quad (4.15.2)$$

Donde $\Delta t = tx - t\mu$ (intervalo entre momentos discretos vecinos de formación de la ecuación $M(t)$, para facilidad de la posterior modelación imitacional es racional tomar la relación $\Delta t / \Delta\tau$ como un numero entero).

$$E_{ik} = \partial f_{xi} / \partial f'_{xi} \quad (4.17)$$

$$\partial f_{xi} = \sqrt{Df_{xi}}$$

$$\partial f'_{xi} = \sqrt{D'f_{xi}}$$

$D'f_{xi}$ – variación discreta del contenido de cobalto en el licor, bajo la acción de las perturbaciones con la presencia del compensador de estas perturbaciones.

$\sqrt{D'f_{xi}}$ - lo mismo pero sin el compensador

Para determinar la efectividad de los compensadores se necesitó generar las perturbaciones con ayuda del generador de números casuales (utilizando el carácter del proceso estacionario casual de variación de las perturbaciones) y el filtro formador 4.8. El valor de E_{ik} se cálculo para los valores nominales de los parámetros $K^h_{xi}, T^h_i, \lambda^H_{xi}$. Los resultados están plasmados en la tabla 4.3, donde se puede observar la racionalidad de la utilización de los compensadores.

Los valores de las variaciones cuadráticas medias obtenidos para los parámetros nominales de las perturbaciones hablan acerca de la capacidad de trabajo y la efectividad de utilización del compensador para la estabilización del contenido de cobalto en el licor a la salida del proceso. En la tabla 4.3 se observa que para la variación del diapasón de variación de la perturbación hasta un 30% del valor nominal ocurre una variación considerable de los coeficientes de los coeficientes de amplificación por el canal de la productividad del proceso. Esto acerca de la necesidad de autorregulación de los parámetros del compensador para este canal, con el objetivo de que no disminuya la efectividad de compensación.

Tabla 4.3. Valores (X_1, X_2, X_3 y X_4) de la variaciones cuadráticas medidas de la concentración de Co y la efectividad del compensador.

Parámetro	X_1	X_2	X_3	X_4
∂f_{xi}	$3,7 \cdot 10^{-5}$	$1,76 \cdot 10^{-4}$	$0,55 \cdot 10^{-8}$	$4,8 \cdot 10^{-2}$
$\partial f'_{xi}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$2,21 \cdot 10^{-5}$	$0,9 \cdot 10^{-8}$	$2,7 \cdot 10^{-8}$
E_{ik}	$3,5 \cdot 10^{-2}$	$1,25 \cdot 10^1$	$1,63 \cdot 10^{-1}$	$5,62 \cdot 10^2$

Para la obtención del algoritmo de autorregulación del compensador se construyeron las relaciones de variación de parámetro Kx_4 , la aproximación lineal de esta relación tiene la forma siguiente:

$$K_{X_4} = 0,21 - 0,093 X_4(t) \quad (4.18)$$

Mediante este algoritmo es necesario variar el valor de los parámetros $K_x = K_{X_4}$ de la fórmula 4.18 de compensación de la perturbación $X(t)$ y su dependencia de los valores determinados de X_4 .

La imprecisión en la descripción del proceso de separación de Ni y Co mediante las ecuaciones del modelo matemático de este proceso pudo originar los errores de determinación de los parámetros K_{ob} y T_{ob} , de las funciones de transmisión del modelo linealizado del proceso a través de los canales de perturbaciones y regulación. Además, en la evaluación de la calidad en la dirección pudieron influir las impresiones de los valores de las características de las perturbaciones obtenidos experimentalmente. Los valores de los parámetros del objeto, plasmados en la tabla 4.2 fueron obtenidos para variaciones considerables de las perturbaciones. Por esto, se puede considerar que los errores en las evaluaciones de las perturbaciones discretas no pudieron influir considerablemente en los resultados de los experimentos, al tiempo que la influencia de la imprecisión en la determinación del parámetro T_f del filtro formador se somete a una prueba especial [34].

Por las causas mencionadas, los experimentos necesarios para determinar el índice E_{ik} de la efectividad en la compensación de las perturbaciones, fueron efectuadas para variaciones de los valores K_{ob} , T_{ob} a 10% y 20% en comparación con los valores que fueron tomados en las síntesis del compensador.

4.4 CARGA INFORMATIVA DE LA DIRECCIÓN DE ACCIÓN SOBRE LA VARIACIÓN DEL RÉGIMEN DE SEDIMENTACIÓN

Los valores plasmados en la tabla 4.4 indican que los errores posibles de modelación prácticamente no influyen en la efectividad de compensación de las perturbaciones. Esto afirma indirectamente la hipótesis ...Véase el numeral 4.2.2... acerca de la pseudolinealidad del modelo del sistema con compensadores.

Tabla 4.4. Variación de la efectividad (E_{ik}) del compensador para variaciones de los valores iniciales de los parámetros del modelo matemático del objeto de regulación y del filtro de perturbaciones.

Canal	E_{ik}					
	10% K_{ob}	20% K_{ob}	10% T_{ob}	20% T_{ob}	10% T_f	20% T_f

1	$2,32 \cdot 10^{-2}$	$1,90 \cdot 10^{-2}$	$7,14 \cdot 10^{-3}$	$5,11 \cdot 10^{-3}$	$1,75 \cdot 10^{-2}$	$1,32 \cdot 10^{-2}$
2	$3,5 \cdot 10^{-1}$	$3,61 \cdot 10^1$	$6,1 \cdot 10^2$	$7,0 \cdot 10^{-2}$	$2,35 \cdot 10^{-1}$	$2,7 \cdot 10^{-1}$
3	$6,71 \cdot 10^{-1}$	$7,17 \cdot 10^{-1}$	$3,41 \cdot 10^{-1}$	$3,97 \cdot 10^{-1}$	$1,8 \cdot 10^2$	$1,97 \cdot 10^{-2}$
4	$5,10 \cdot 10^2$	$6,5 \cdot 10^{-2}$	$8,52 \cdot 10^{-2}$	$9,64 \cdot 10^{-2}$	$4,57 \cdot 10^{-1}$	$5,75 \cdot 10^{-1}$

Las condiciones de invariabilidad absoluta no pueden ser realizadas por esto es necesario tener en cuenta las siguientes fuentes de compensación incompleta en condiciones reales:

- El control discreto con retardo de la composición del licor carbonato-amoniaco (de la concentración de cobalto en el licor entrante y saliente del sedimentador).
- La determinación imprecisa, ... Véase tabla 4.3....

Cada una de las fuentes mencionadas dan su error de indescomposición con densidades espectrales.

$$S_{fx} = \{S_{F1Fr}(w), S_{F1Sp}(w), \dots, S_{FiXi}(w), S_{Fii}(w)\} \quad (4.19)$$

Se puede considerar que estos errores son correlacionados débilmente o no correlacionados, por esto la densidad espectral de compensación incompleta S es igual:

$$S_{FNK}(w) = S_{fi}(w) \quad (4.20)$$

Lo que concuerda con la carga informativa máxima sobre el subsistema que actúa sobre el régimen del proceso.

El cálculo de densidad espectral varía el contenido de cobalto a la salida del proceso en relación con la variación de la concentración de cobalto a la entrada $S_{F1Fr}(w)$, y las relaciones entre el níquel y cobalto en el licor $S_{F1Fp}(w)$ como función del período T_N y el retardo τ_n del control analítico discreto no necesita de experimentos en el modelo, si se toma en cuenta la pseudolinealidad del sistema.

$$S_{F1Fp}(w) = 2S_{Fp}(w) \{1 - [\text{sen}(T_N + \tau_n) - \text{sen} \tau_n] / (T_N w)\} / W(jw) \quad (4.21)$$

De la misma forma se puede determinar $S_{F1Fp}(w)$.

La dispersión del contenido de cobalto a la salida del proceso a consecuencia de la variación de la concentración y la relación Ni/Co en el licor carbonato-amoniaco

teniendo en cuenta $T_N + \tau_n$, se puede obtener ignorando la densidad espectral $S_{F1Fp}(w)$ y $S_{F1Fp}(w)$ de la formula 4.21.

Al mismo tiempo, se puede obtener el criterio de racionalidad de efectuar los análisis del licor y de los periodos permisibles y el retardo del control.

El cálculo de la función de densidad espectral de variación del contenido de cobalto residual en el licor proveniente del reboso del sedimentador en relación con la determinación imprecisa del coeficiente de amplificación sf, $k_i(w)$ de la constante de tiempo sf y del retardo sf. Tampoco necesita de experimentación en el modelo. Basta con utilizar las fórmulas correspondientes, teniendo en cuenta la seudolineabilidad del sistema, donde S es la densidad espectral de las variaciones f provocadas por la determinación incorrecta de fx.

De los resultados del trabajo se desprende que la imprecisión en la determinación de txi, txi, originada por la imprecisión en la modulación, influyen sobre df en mucho menor grado que la variación de kxi. De esto se desprende que es necesario determinar sf con ayuda de los experimentos en el modelo, los que imitan la imprecisión de la modelación por medio de las variaciones kxi en un determinado diapasón (para esto es necesario variar en el modelo los parámetros fundamentales, de los que dependen los errores en la modelación, las constantes de velocidad, y coeficiente de difusión longitudinal) y determinar el valor del coeficiente kxi para un nuevo régimen estacionario, obtenido después de la variación de los parámetros del modelo [34].

Luego se determina el valor de kxi como diferencia entre el valor de kxi para los valores nominales y no nominales de los parámetros del modelo.

Comprobación de la efectividad del lazo de estabilización de la composición del licor y su influencia sobre la variación del régimen del proceso de separación de níquel y cobalto.

La carga informativa sobre el lazo bajo la acción de la carga mencionada necesita efectuar los experimentos imitados en el modelo matemático. Para efectuar el experimento con la transformación estructural equivalente, el seudosistema mostrado en la figura 4.1 fue transformado mediante la formula 4.7.

El bloque kb de compensación de las perturbaciones x generan una señal equivalente de compensaciones incompleta fx, conectado a la salida del objeto de regulación en el lazo de retroalimentación (bloque oc). La densidad espectral de la señal fx, correspondiente a la carga informativa máxima posible del lazo de retroalimentación, obtenida en 4.4.

Resultó posible aproximar la densidad espectral Sf mediante la expresión:

$$Sf_x(w) = Df_x \lambda f_x / \Pi(\lambda f_x + w^2) \quad (4.22)$$

Donde: $df = 1,32.10$ – dispersión de la señal estacionaria de la función, se calcula mediante la integración de la función obtenida en la sección 4.6 y el parámetro $\lambda = 2,8$ horas⁻¹ determinado mediante la relación:

$$\lambda f_x = Df_x / \Pi S f_x(0) \quad (4.23)$$

La cual se desprende de la fórmula 4.22 para $w=0$. El valor de $Sf_x(0)$ se determina también por los resultados obtenidos en la sección 4.4.

La calidad de aproximación de densidad espectral Sf_x de la función 4.22 demuestra para 4.8, donde con líneas discontinuas está mostrada la función de densidad espectral de la compensación incompleta máxima posible, obtenida en 4.4 y con línea continua, la aproximación 4.22.

Con la función 4.22 describe la densidad espectral del proceso exponencial correlacionado estacionario, el cual se forma fácilmente en los experimentos imitadores con ayuda del generador de valores casuales y el filtro formador de tipo 4.8.

Donde:

$$T\varphi = 1 / \lambda f_x \quad (4.24)$$

De esta forma, en el transcurso de la prueba de la efectividad del lazo de retroalimentación con la variación del suministro de semillas se imitó sólo la acción del bloque oc para la señal perturbadora de entrada. Así en cada uno de los experimentos [34] se generaron cuatro señales no correlacionadas entre sí (x) imitadores de las perturbaciones mencionadas anteriormente y solo una señal f_x con densidad espectral 4.22.

Los experimentos imitadores [34] fueron efectuados para diferentes combinaciones del período de selección de las muestras t_n y el retardo n de los resultados del análisis de las muestras, es decir para diferentes valores del período de cierre de la llave k_{1-1} (fig. 4.6) y diferentes valores del parámetro n del lazo de retardo en el lazo de retroalimentación del bloque oc. En todos los experimentos se calculó la dispersión de la estabilización de la concentración f en el licor proveniente del rebose del sedimentador para la regulación combinada.

El regulador f_p que origina la tarea para la variación del gasto de semilla, en todos los experimentos actuó mediante el análogo p_4 de algoritmo, al cual corresponde la función de transmisión siguiente:

$$W(p) = k(1 + 1/Tnp) = 0.072(1 + 1/105p) \quad (4.25)$$

Los parámetros de regulación de este regulador se determinaron por los parámetros de la característica transitoria del modelo imitador, plasmado en fig. 4.9.

Los resultados de los experimentos, efectuados para varios valores de t_n en un diapason desde 0,25 hasta 1,5 horas, posibilitan valorar la magnitud límite (máxima posible) dfo en las condiciones más difíciles y establecer el carácter de la función siguiente:

$$Dfo = \Psi(Tn, tn) \quad (4.26)$$

Luego de la aproximación de esta función mediante los resultados de los experimentos imitadores se obtuvo la expresión:

$$Df = 0,73 \cdot 10^{-6} + (0,36Tn + 0,34tn) \cdot 10^{-6} \quad (4.27)$$

La cual posibilita determinar en la proyección del sistema, de control tecnológico, la frecuencia de selección de las muestras y el tiempo máximo de análisis del licor en la formación de la señal de retroalimentación.

Para un período de selección de las muestras mayor de 1,5 horas, la acción del lazo de retroalimentación es inefectivo, la dispersión df es igual a la dispersión de la perturbación impuesta f_x (línea discontinua en la fig. 4.10).

Los experimentos en el modelo mostraron que para el lazo retroalimentador, el valor máximo posible de retardo n es igual a 0,5 horas.

Por esto es fácil determinar el valor de df dependencia de dos valores de n , (0,25 0,5)

$$0,35 \cdot 10^{-6} Tn + 0,09 \cdot 10^{-6} \quad \text{para } t_n = 0,25 \text{ seg}$$

$Df =$

$$0,36 \cdot 10^{-6} Tn + 0,15 \cdot 10^{-6} \quad \text{para } tn=0,5 \text{ seg}$$

De esta forma está investigada la efectividad de la retroalimentación que actúa sobre la variación de las tareas del regulador.

Figura 4.8- Densidad espectral de la compensación incompleta.

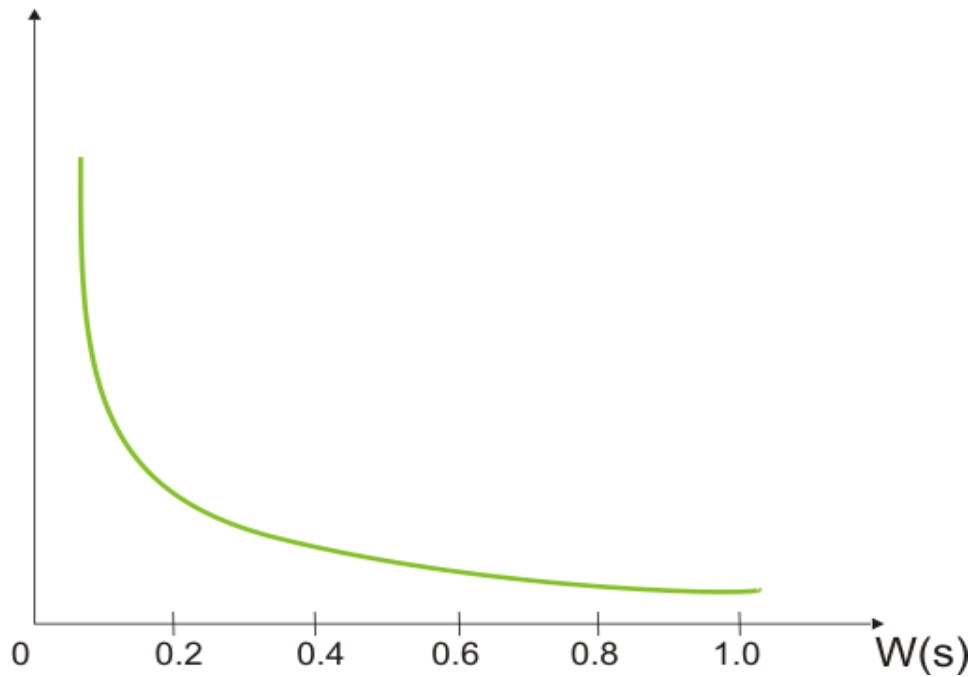


Figura 4.9 – Características transitorias del modelo imitador, la perturbación en forma de saltos en el momento $t=0$ para el gasto dado de semillas entregado al reactor.

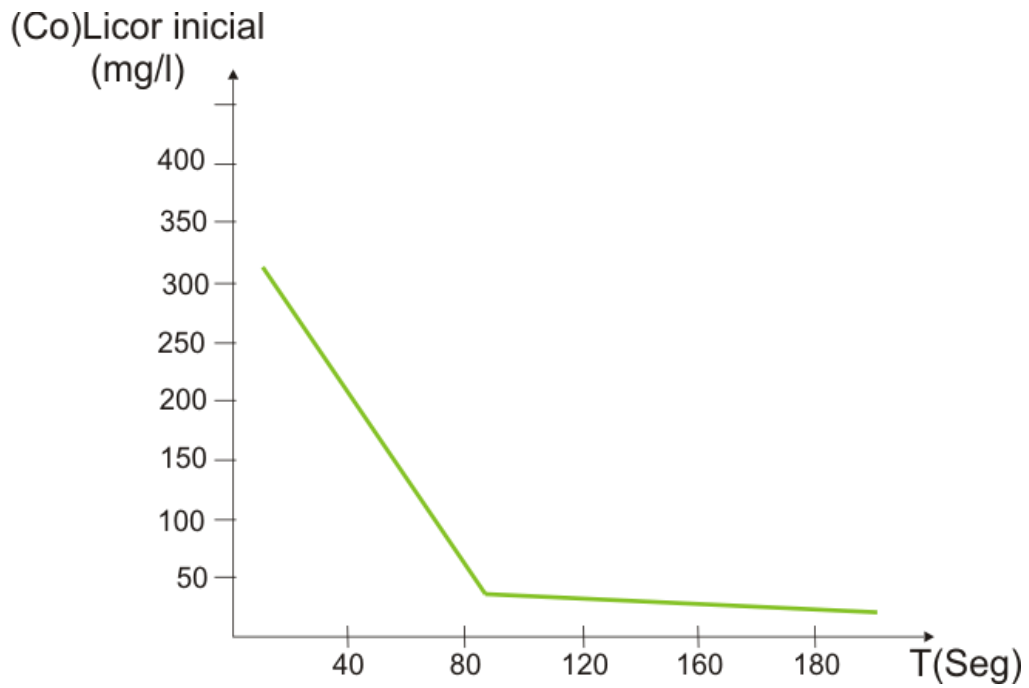
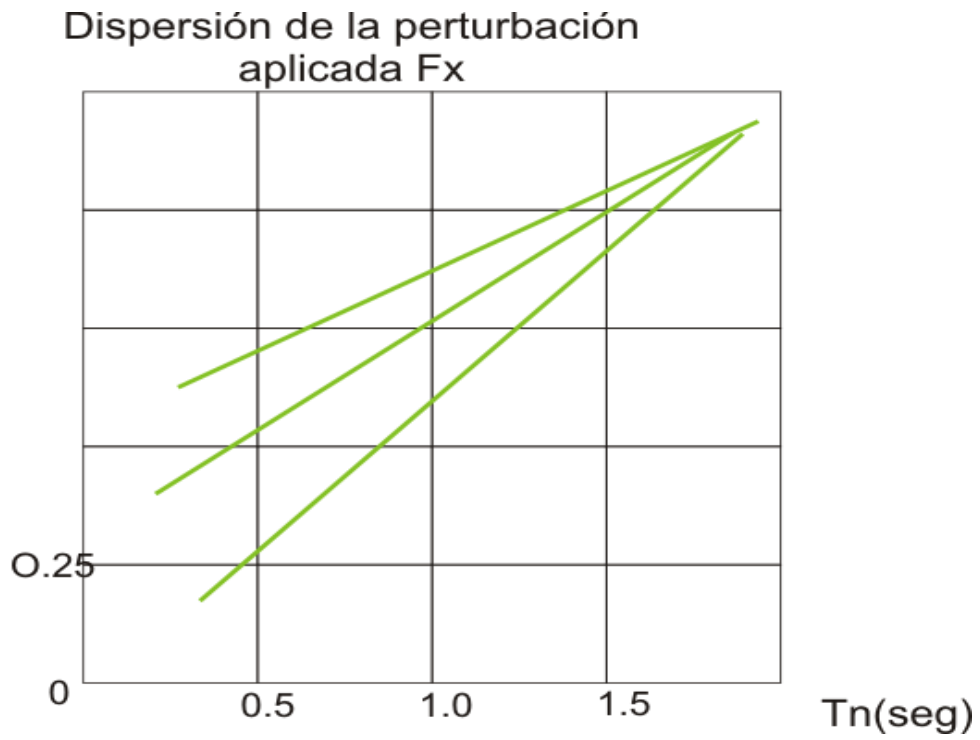


Figura 4.10- Relación entre la dispersión de la variación del contenido de Co en el reboso del sedimentador Dfo y los valores Tn y tn en el lazo de retroalimentación.



En este capítulo se explica el caso de estudio referenciado de la investigación hecha por el Director del trabajo, ya que aporta las bases y conocimientos suficientes, para ser aplicado al nuevo paradigma que se esta desarrollando.

Los algoritmos y sistema de control fueron desarrollados a través de métodos avanzados de diseño por una metodología novedosa de descomposición frecuencial de la estrategia de control y evaluado experimentalmente con una data industrial, esto permitió disponer de toda la información necesaria para demostrar. Son experimentales mostrar la viabilidad de la metodología de clonación artificial por cuanto se pudo demostrarse que la replica obtenida, cumple con todos los requerimientos de los sistemas de control avanzados objeto de clonación, en sus características dinámicas, estabilidad parámetros de calidad del control, etc.

5. METODOLOGÍA APLICADA DE CLONACIÓN ARTIFICIAL DE CONTROLADORES

A fin de probar la clonación artificial propuesta se plantea una metodología ...Véase el numeral 2.5..., que será aplicada a la Fábrica “Ernesto Che Guevara” en Moa – Cuba, como caso de estudio, cuyo objetivo es encontrar las replicas de las funciones del sistema de control en el proceso de separación de níquel y cobalto de la tecnología caron [34], [42] y [18].

5.1 SELECCIÓN DEL SISTEMA (CASO DE ESTUDIO)

En la selección del sistema de control a clonar se ha tenido en cuenta los métodos que se emplearon en la modelación matemática y de identificación de los procesos en condiciones estacionarios y no estacionarios; métodos de síntesis lineal del sistema de dirección y métodos en los cuales se aplica la teoría de invariabilidad de estos sistemas; aplicación de la teoría de procesos (eventos) casuales y programación no-lineal con optimización en los parámetros de los sistemas; métodos de planificación de experimentos para la obtención y procesamiento de los resultados de las investigaciones aplicando la simulación.

La descomposición frecuencial del problema de dirección de los procesos de separación de níquel y cobalto, posibilita sintetizar el sistema de dirección con estructura de tres niveles de jerarquía:

- a. Nivel inferior de jerarquía: contornos de alta frecuencia de estabilización de los flujos del licor carbonato – amoniacal, del reactivo y de la semilla entregados al reactor.
- b. Nivel medio de jerarquía: sistema combinado de dirección del contenido de cobalto en el licor carbonato – amoniacal al final del proceso. Este sistema incluye los lazos de compensación de las perturbaciones fundamentales y el lazo de retroalimentación que influye en el régimen de precipitación de sulfuros de níquel y cobalto.

Este sistema jerárquico medio condiciona una dirección en forma de variación de tareas a los lazos estabilizadores de alta frecuencia del nivel inferior de jerarquía de dirección.

- c. Nivel superior de jerarquía: nivel de baja frecuencia, se comporta como subsistema optimizador que resuelve los problemas de distribución entre las líneas de precipitación de sulfuros de níquel y cobalto y la coordinación de la

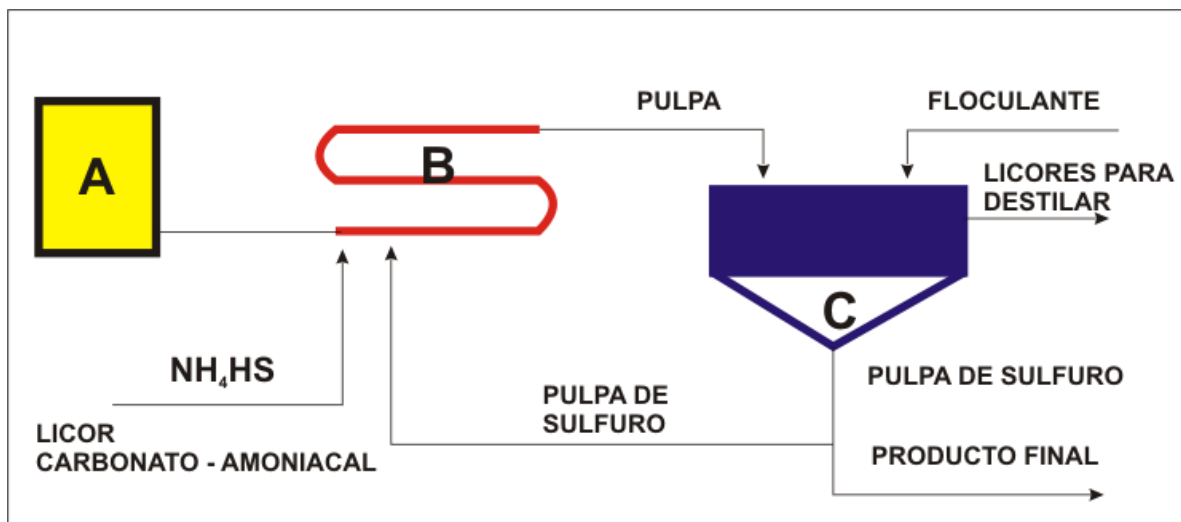
productividad del departamento de cobalto y los derivados hidro-metalúrgicos mediante la variación de las tareas para la productividad de cada línea de sedimentación y la regulación del sistema combinado de frecuencia media.

El método de dirección realizable en el nivel de jerarquía de frecuencia media debe estar fundamentado en la compensación seudo invariante de las principales perturbaciones – variación del flujo y de los índices de composición química del licor carbonato – amoniacal entregado al reactor y las variaciones del contenido del reactivo. La dirección principal – variación del flujo de reactivo entregado al reactor (hidrosulfuro de amonio).

La calidad de la estabilización del contenido de cobalto en el licor depende de la periodicidad de la selección de las muestras del licor de salida y del licor carbonato – amoniacal entregado al reactor y de la duración del análisis de las muestras.

Esta dependencia establecida por los resultados de las investigaciones del modelo de simulación sirve de base para la proyección del esquema de clonación de controladores del proceso de separación de sulfuros de níquel y cobalto (Figura 5.1).

Figura 5.1. Esquema tecnológico del proceso de separación de níquel y cobalto en la fábrica “Rene Ramos Latour” de Nicaro – Cuba.



Fuente: Tesis doctoral [34]

Donde:

A: Tanque del licor

B: Reactor tubular,

C: Sedimentador,

Del esquema anterior se determinan la relación entre los gastos de licor y reactivos. El reactivo se encuentra en un envase especial y es enviado al dosificador, del cual se entrega la muestra del licor y reactivo al reactor tubular, el cual esta dotado de tomadores para la obtención de muestras.

De la salida del reactor la pulpa pasa a la entrada del sedimentador que gira a una velocidad de una revolución cada dieciocho minutos. Una parte de la pulpa de sulfuros originada de la descarga del sedimentador es entregada por la bomba dosificadora en calidad de semilla y la otra parte representa el producto final.

Para ser posible la transposición de los resultados de las investigaciones realizadas en el objeto económico hacia la instalación experimental se tomaron en cuenta las demandas de la Teoría de la Semejanza. [34].

Tomando los planteamientos que se hacen en los capítulos III y IV del presente trabajo, se define como variables la propiedad que puede variar y cuya variación es susceptible de medirse; resulta de vital importancia la definición del tipo de relaciones que se establecen entre las variables, puesto que la verificación depende del grado en que se puedan demostrar esas relaciones. Esto exige mucha precisión en el uso de los términos lógicos que enlazan a las variables, ya que una expresión mal utilizada puede desvirtuar completamente el sentido de la formulación.

A partir de estos elementos estudiados, se procede a la selección o definición de variables, las cuales están divididas en:

VARIABLES DE ENTRADA

- a. Licor: Esta compuesto por carbonato – amoniacal de lixiviación que contiene 11.5 g/l de níquel, 0.22 g/l de cobalto, 72.8 g/l de amoniaco, 48.5 g/l de carbonato.
- b. Reactivo: hidrosulfuro de amonio NH_4HS , como activo precipitador.
- c. Semilla: sulfuros de níquel y cobalto.

VARIABLES DE SALIDA

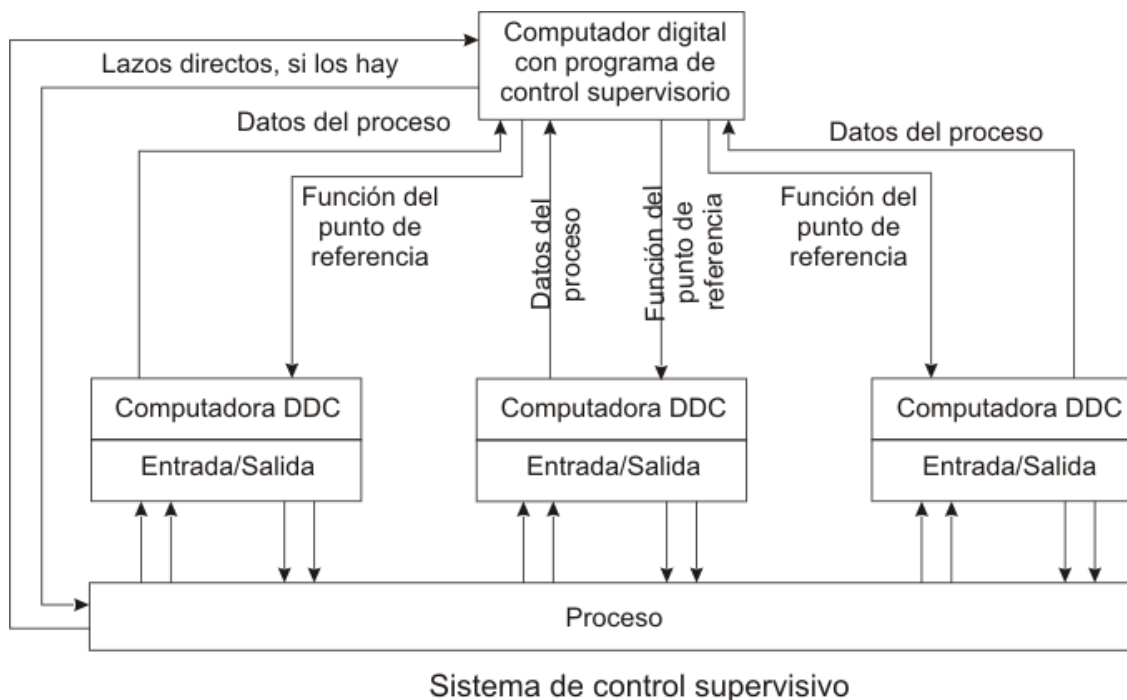
- a. Cobalto: parte del producto final por lo que su composición tiene límites determinados en relación con la especificación de la calidad del producto.
- b. Licor: licor carbonato - amoniacal descobaltizado.

5.1.1 Control de supervisión

Dentro del control por supervisión se engloban un conjunto de métodos de simulación, planificación y ayuda a la toma de decisiones, soportados por sistemas informáticos de ayuda al operador en la teleoperación (Sheridan, 1989). Dentro de estas funciones cabe distinguir entre las siguientes [51]:

- Funciones fuera de la línea: Simulación interactiva en tiempo real del teleoperador con realimentación de esfuerzos y realimentación visual. Estas tareas son normalmente complejas y requieren importantes recursos computacionales.
- Funciones de simulación en línea: se emplean para previsión de maniobras y asignación a control manual o autónomo.
- Funciones de simulación en línea para compensación de retardos temporales: Se trata de que el operador pueda prever el efecto de los retardos para compensarlos de forma oportuna.
- Funciones de medida, estimación y visualización de estado: Entre estas funciones se encuentran las dedicadas a ofrecer una visualización más comprensible para el operador del estado de la operación. Se emplean también métodos para combinar de forma apropiada medidas de diversos sensores, información de estados precedentes y utilización de bases de datos con medidas y parámetros de teleoperación.
- Funciones de procesamiento de órdenes del operador. Combinación de entradas analógicas y simbólicas según lenguajes específicos de control supervisado.
- Funciones de ajuste del sistema de control: Entre estas funciones se encuentran los ajustes de ganancias y otros parámetros del sistema de control automático, tales como relaciones de fuerzas. Otras funciones que pueden incluirse en este grupo son las de guiado de realimentación sensorial, tales como la orientación de cámara, ajuste del zoom, etc. que se consideran en un apartado posterior.
- Ayudas para detección de fallos, identificación y respuestas de emergencia: se involucran funciones de prevención, detección de comienzo de fallo, identificación de fallos, respuestas automáticas de emergencia y recomendaciones para restauración de condiciones normales de operación.
- Motorización de rendimiento: se trata de obtener medidas de rendimiento, velocidad, precisión, resolución, tamaño, etc. Así mismo, es interesante establecer procedimientos de comparación de rendimiento manual y automático. Estas medidas son de interés en sistemas de aprendizaje motorizado, que pueden emplearse como transición a modos de control automático.

Figura 5.2. Sistema de control supervisito [50].



5.2 VOLUMEN DE LA MUESTRA

Para efectuar las investigaciones experimentales de la tecnología de separación de níquel y cobalto fue creada una instalación experimental en la cual fueron tomadas en cuenta las expresiones de demanda de la *Teoría de Semejanza* con el objetivo de compatibilizar los resultados experimentales, arrojando los resultados de los procesos descritos en el capítulo 3.

En la instalación experimental fue alcanzada en primer lugar la semejanza geométrica, la cual supone el riguroso empleo de los criterios de proporcionalidad al escalar todas las magnitudes geométricas de un tipo de modelo o naturaleza.

Ya que el objeto del conglomerado es agrupar objetos similares, se necesita alguna medida para evaluar las diferencias y similitudes entre objetos. El concepto de semejanza es fundamental en el Análisis Cluster. La semejanza (similitud) es una medida de correspondencia entre los objetos que van a ser agrupados. La estrategia más común consiste en medir la equivalencia en términos de la distancia entre los pares de objetos. Los objetos con distancias reducidas entre ellos son más parecidos entre sí que aquellos que tienen distancias mayores y se agruparán, por tanto, dentro

del mismo cluster. De esta manera, cualquier objeto puede compararse con cualquier otro objeto a través de la medida de semejanza.

El volumen de la muestra en el caso de estudio esta determinado por el número de conjunto borrosos (cinco) como base, elevado por el número de variables del sistema de control. En el volumen de la muestra obtenido por la teoría de semejanza y cluster para el experimento, es representado en la figura 5.11, referenciado los individuos de la población.

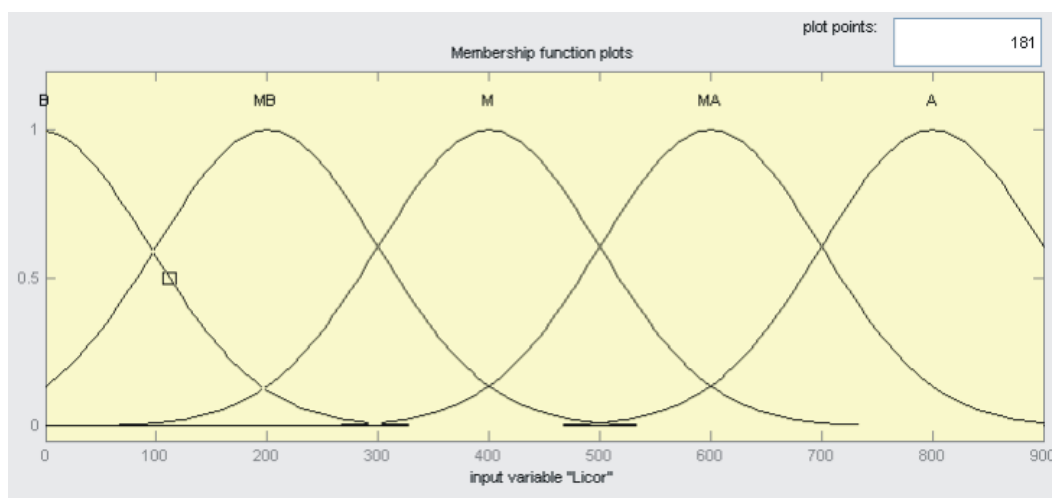
5.3 AGRUPAMIENTO DIFUSO

La modelización difusa, es decir, la descripción mediante modelos difusos de sistemas del mundo real, se convierte por tanto en una técnica fundamental, tanto para aplicaciones científicas como de ingeniería. Una de las técnicas es el agrupamiento difuso o clustering.

Un gran problema en todas las técnicas de agrupamiento es cómo seleccionar el número de grupos (clusters). Para el caso del análisis cluster jerárquico, las distancias existentes entre los clusters reflejadas en las distintas etapas del proceso de agrupamiento pueden servir de guía útil, el analista podría así establecer un tope para detener el proceso a su conveniencia. Por ejemplo, podría hacerlo cuando la distancia entre los grupos exceda un valor específico o cuando las distancias sucesivas entre los pasos marquen un repentino salto. Sin embargo, la opción más utilizada es calcular distintas soluciones de agrupamiento (dos, tres, cuatro grupos, por ejemplo) para después decidir entre las soluciones alternativas con ayuda de un criterio prefijado de antemano, del sentido común, o de fundamentos teóricos.

La Fuzzyficación [45] consiste en determinar los valores de membresía de las entradas del controlador en los conjuntos difusos previamente definidos junto con las reglas de implicación que describen el proceso de control. El universo de cada una de las entradas (variables descritas en 5.1) se subdivide en valores lingüísticos del tipo: “bajo (B)”, “medio bajo (MB)”, “medio (M)”, “medio alto (MA)”, “alto (A)”; su cantidad puede cambiar en el proceso de ajuste del controlador (junto con la cantidad de reglas de implicación). Cada valor lingüístico se considera un conjunto difuso y se le define la función de membresía correspondiente; también estas pueden sufrir cambios en el proceso de ajuste. Para este caso se aplicó membresía gaussiana en las entradas y las salidas [46], figura 5.3.

Figura 5.3. Representación función de membresía gaussina.



El modelo difuso utilizado en esta etapa es el basado en reglas, es decir, se toma como modelo el sistema difuso de Mandani [45], [48]; este modelo lingüístico maneja reglas donde el antecedente y el consecuente son proposiciones difusas, de la forma:

R_i : Si x_1 es A_{i1} y ... y x_n es A_{in} entonces y es B_i

Donde:

$i = 1, \dots, M$

$x = [x_1, \dots, x_n]^T$ es el vector de entrada

A_{ij} son los conjuntos difusos definidos en el espacio de los antecedentes por las funciones de pertenencia $\mu_{A_{ij}} : X_j \rightarrow [0,1]$, para $j = 1, \dots, n$

X_j es el dominio de la variable de entrada x_j , para $j = 1, \dots, n$

B_j son los conjuntos difusos definidos en el espacio de los consecuentes con funciones de pertenencia $\mu_{B_j} : Y \rightarrow [0,1]$

Y es el dominio de la variable de salida y .

El proceso que plantea esta dividido en tres niveles:

- Nivel uno: se toman las variables de entrada al reactor (licor inicial y reactivo), por las variables de salida del reactor (licor). Estas variables fueron evaluadas del proceso de separación de níquel y cobalto. Aplicando el proceso de fuzzyficación, se define el tipo de función de membresía para cada variable. Después de varias pruebas con los tipos triangular, singleton y gaussiana, y de verificar en la literatura, se determinó que el mejor tipo de función de membresía es la gaussiana.

Se procede a realizar todo el proceso del nivel en el Fuzzy Logic de MatLab® [31]; describiendo los pasos, se comienza por pasar cada variable en función de membresía gaussiana (ver figura 5.4), con los rangos de cada variable y los rangos de los conjuntos difusos. Luego se crean las reglas, hay que aplicar la fórmula: número de conjuntos borrosos elevado al número de variables de entrada y de salida. Para este nivel el número total de reglas fue de 625, en primera instancia; evaluado las reglas que daba una mejor representación quedaron 55 reglas (ver figura 5.5).

Por último se genera el sourface (ver figura 5.6), donde se puede apreciar los valores de membresía de cada una de las variables y el conjunto total. Esta parte es importante porque muestra la población inicial que se tomará para crear la población inicial que el AG utilizará.

Figura 5.4. Modelo del Nivel 1 en Fuzzy Inference System.

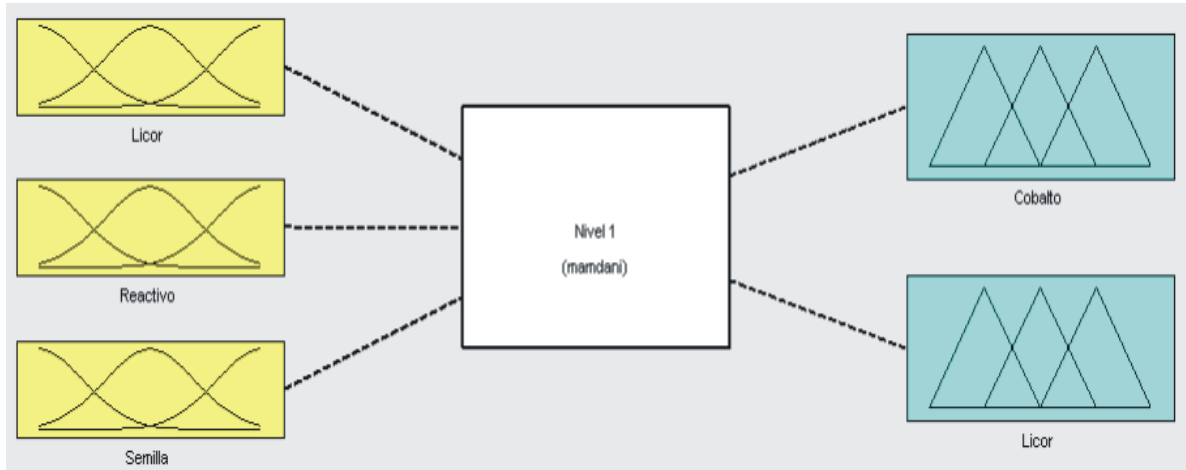


Figura 5.5. Conjunto de variables del Nivel 1, Rule Viewer.

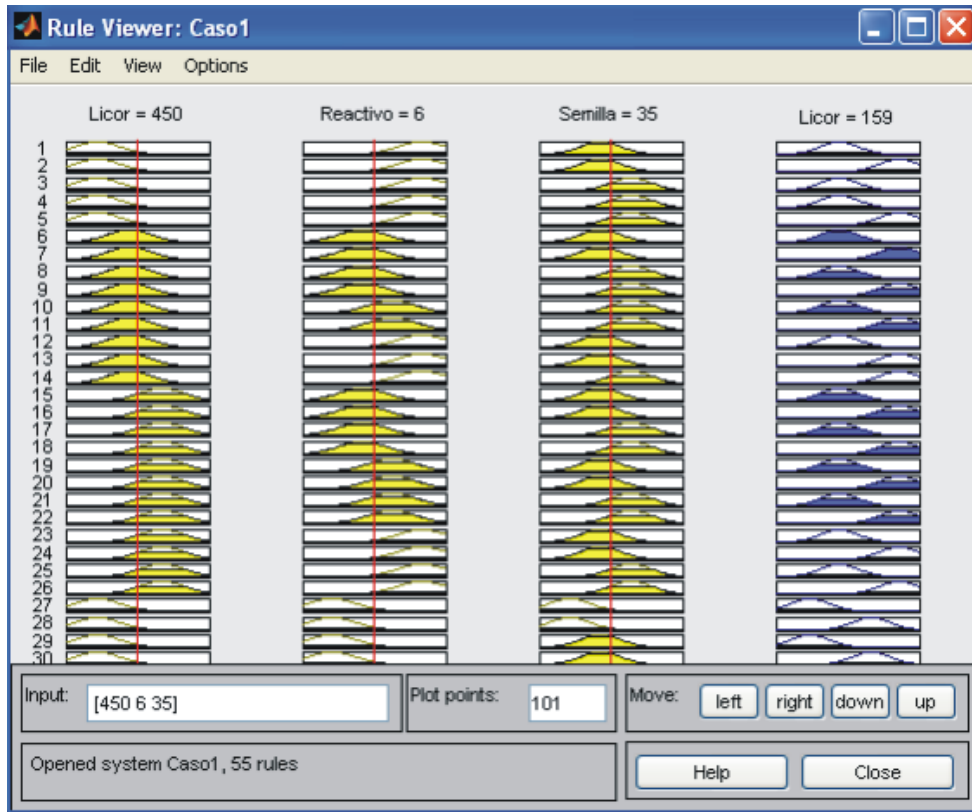
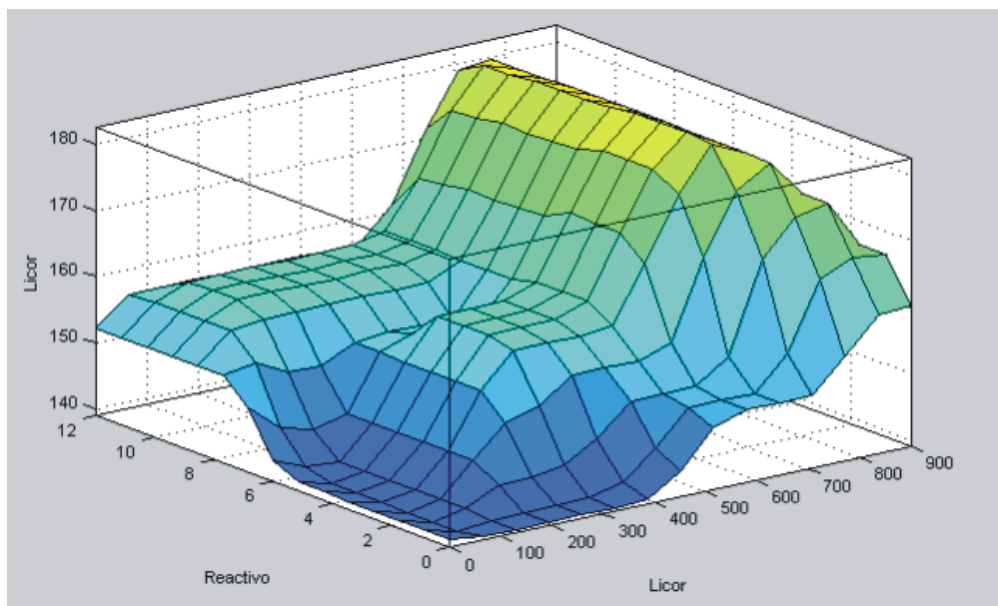


Figura 5.6. Sourface Nivel 1.



- Nivel dos: este nivel describe el proceso que se presente cuando entra el licor y el reactivo al sedimentador, para que este después de un tiempo entregue por un lado el cobalto y por otro licor descobaltizado (ver figura 5.7).

Como se explicó el proceso que se debe realizar; en este nivel el número de reglas inicial fue de 625. Después de evaluar quedaron 45 (ver figura 5.8), para generar el surface (ver figura 5.9).

Figura 5.7. Modelo del Nivel 2 en Fuzzy Inference System.

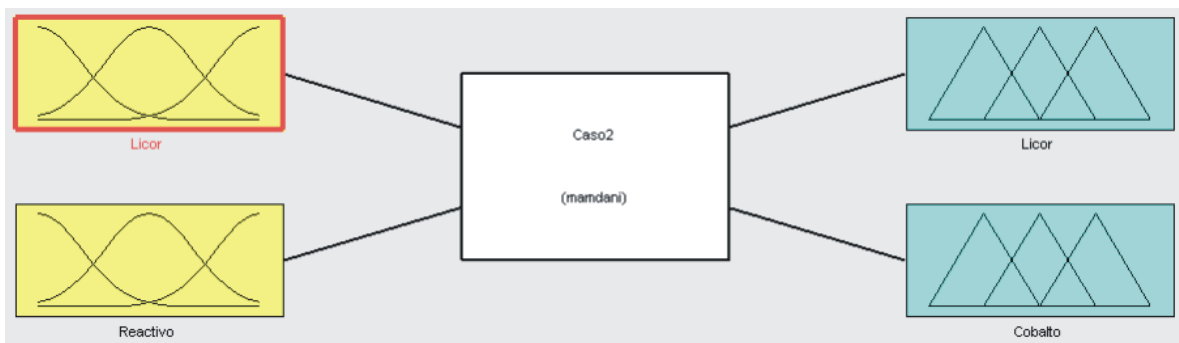


Figura 5.8. Conjunto de variables del Nivel 2, Rule Viewer.

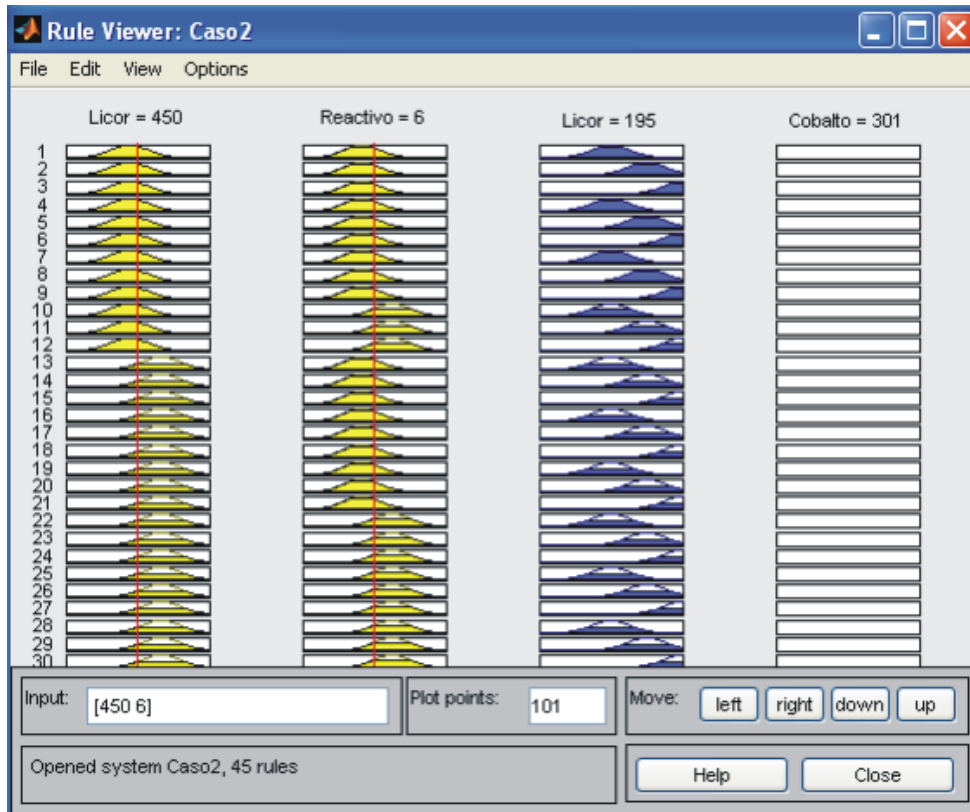
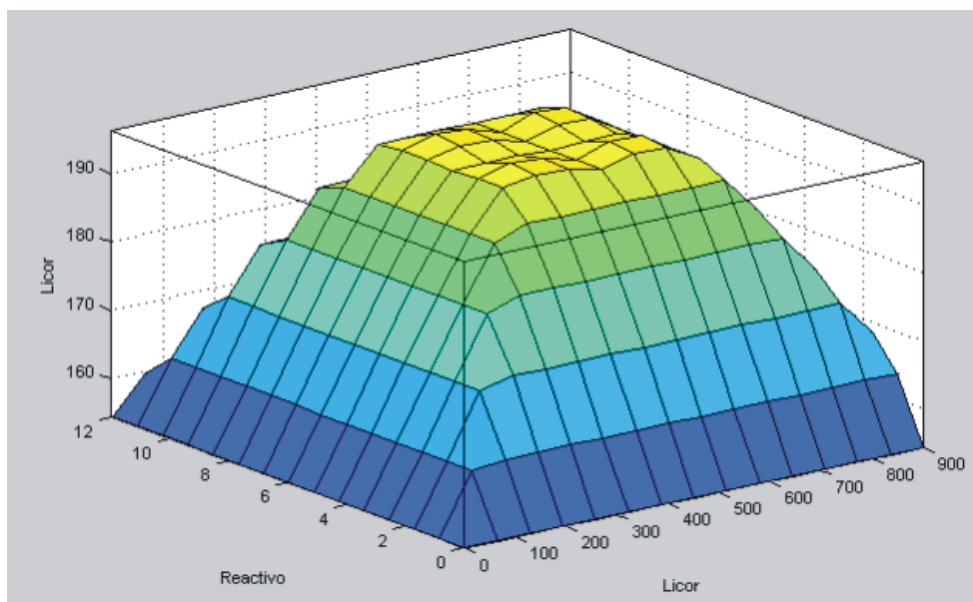
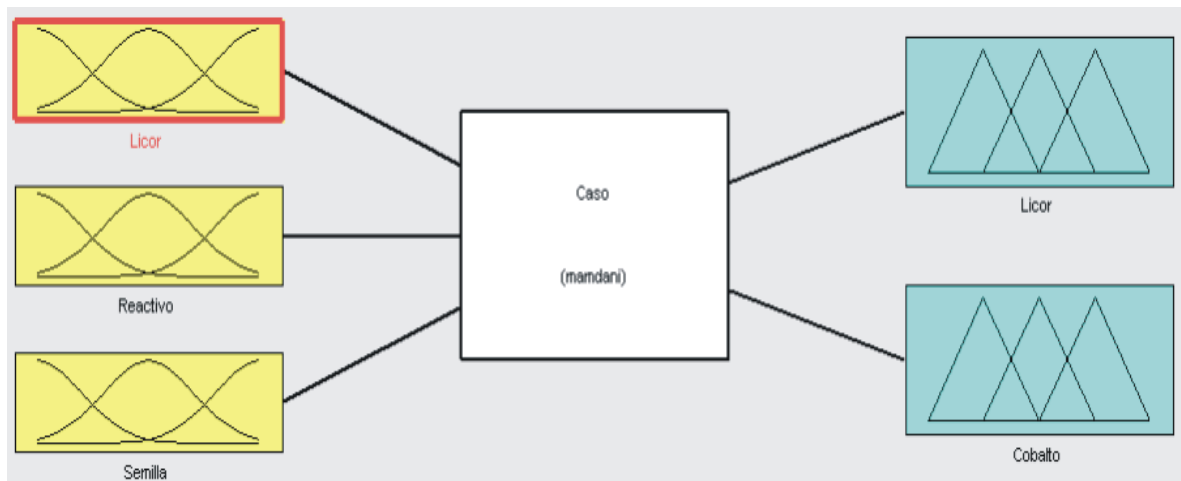


Figura 5.9. Surface Nivel 2.



- Nivel tres: se toma todo el proceso de separación de níquel y cobalto para este nivel (ver figura 5.10). En los dos niveles anteriores, se parcializó el proceso para analizar los comportamientos de las variables y, en sí, para poder llegar a tomar las mejores variables (con sus datos), también para conocer más detalladamente el proceso.

Figura 5.10. Modelo del Nivel 3 en Fuzzy Inference System.



En este nivel el total de reglas fue 3125; aplicando los mismos análisis y depurando las reglas al final quedaron 46 (ver figura 5.11), de formato de implicación *IF – THEN*, se presentan a continuación:

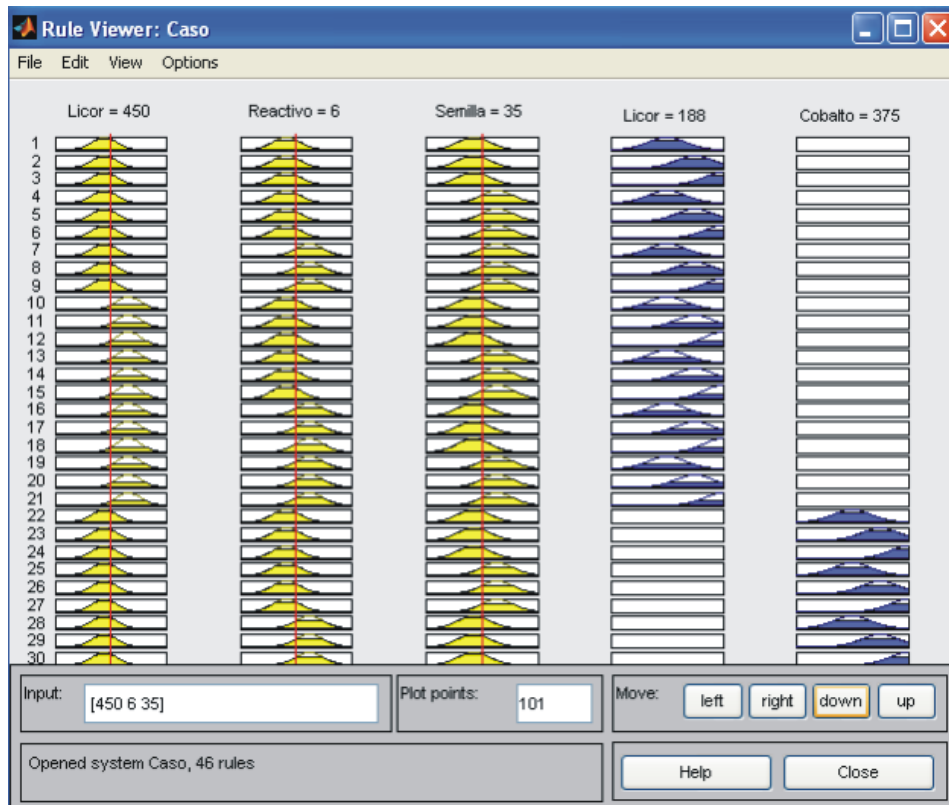
1. If (Licor is M) and (Reactivo is M) and (Semilla is M) then (Licor is M) (1)
2. If (Licor is M) and (Reactivo is M) and (Semilla is M) then (Licor is MA) (1)
3. If (Licor is M) and (Reactivo is M) and (Semilla is M) then (Licor is A) (1)
4. If (Licor is M) and (Reactivo is M) and (Semilla is MA) then (Licor is M) (1)
5. If (Licor is M) and (Reactivo is M) and (Semilla is MA) then (Licor is MA) (1)
6. If (Licor is M) and (Reactivo is M) and (Semilla is MA) then (Licor is A) (1)
7. If (Licor is M) and (Reactivo is MA) and (Semilla is MA) then (Licor is M) (1)

8. If (Licor is M) and (Reactivo is MA) and (Semilla is MA) then (Licor is MA) (1)
9. If (Licor is M) and (Reactivo is MA) and (Semilla is MA) then (Licor is A) (1)
10. If (Licor is MA) and (Reactivo is M) and (Semilla is M) then (Licor is M) (1)
11. If (Licor is MA) and (Reactivo is M) and (Semilla is M) then (Licor is MA) (1)
12. If (Licor is MA) and (Reactivo is M) and (Semilla is M) then (Licor is A) (1)
13. If (Licor is MA) and (Reactivo is M) and (Semilla is MA) then (Licor is M) (1)
14. If (Licor is MA) and (Reactivo is M) and (Semilla is MA) then (Licor is MA) (1)
15. If (Licor is MA) and (Reactivo is M) and (Semilla is MA) then (Licor is A) (1)
16. If (Licor is MA) and (Reactivo is MA) and (Semilla is M) then (Licor is M) (1)
17. If (Licor is MA) and (Reactivo is MA) and (Semilla is M) then (Licor is MA) (1)
18. If (Licor is MA) and (Reactivo is MA) and (Semilla is M) then (Licor is A) (1)
19. If (Licor is MA) and (Reactivo is MA) and (Semilla is MA) then (Licor is M) (1)
20. If (Licor is MA) and (Reactivo is MA) and (Semilla is MA) then (Licor is MA) (1)
21. If (Licor is MA) and (Reactivo is MA) and (Semilla is MA) then (Licor is A) (1)
22. If (Licor is M) and (Reactivo is M) and (Semilla is M) then (Cobalto is M) (1)
23. If (Licor is M) and (Reactivo is M) and (Semilla is M) then (Cobalto is MA) (1)
24. If (Licor is M) and (Reactivo is M) and (Semilla is M) then (Cobalto is A) (1)
25. If (Licor is M) and (Reactivo is M) and (Semilla is MA) then (Cobalto is M) (1)
26. If (Licor is M) and (Reactivo is M) and (Semilla is MA) then (Cobalto is MA) (1)
27. If (Licor is M) and (Reactivo is M) and (Semilla is MA) then (Cobalto is A) (1)
28. If (Licor is M) and (Reactivo is MA) and (Semilla is M) then (Cobalto is M) (1)

29. If (Licor is M) and (Reactivo is MA) and (Semilla is M) then (Cobalto is MA) (1)

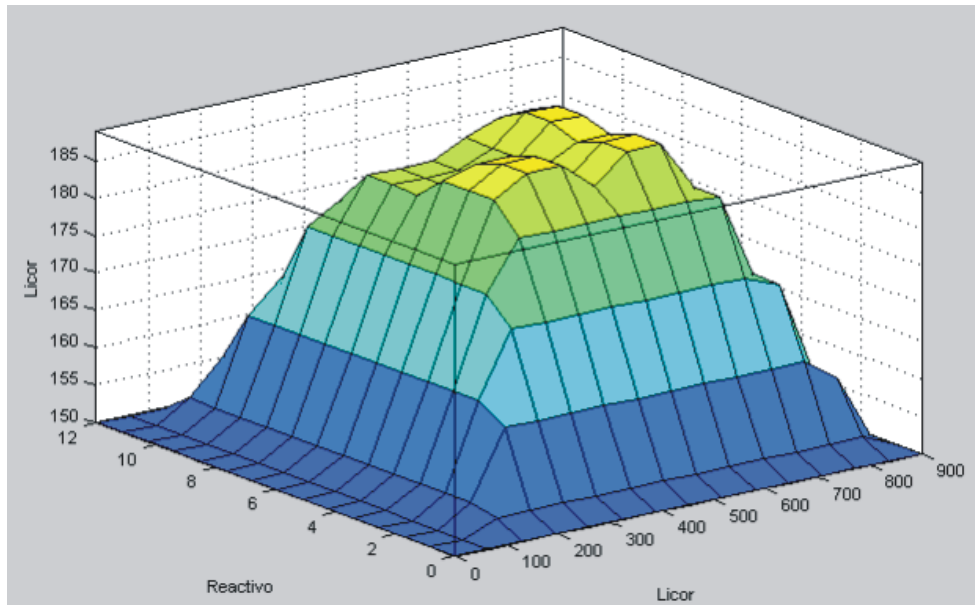
30. If (Licor is M) and (Reactivo is MA) and (Semilla is M) then (Cobalto is A) (1)

Figura 5.11. Conjunto de variables del Nivel 1, Rule Viewer.



Para concluir con esta etapa queda el sourface (ver figura 5.12); este será utilizado en el siguiente paso para generar los cromosomas.

Figura 5.12. Sourface Nivel 3.



En este trabajo el Volumen de la Muestra, se obtuvo utilizando el método de Sourface (Fuzzy Logic); el resultado de la muestra se determinó por medio de los pasos anteriores de la metodología clustering (Capítulo 2).

5.4 INFENRENCIA DEL ALGORITMO GENÉTICO

Este Trabajo tiene como finalidad disponer un procedimiento de clonación en base en algoritmos genéticos, que permita una mejor convergencia en términos de replicar las funciones con un número de individuos utilizados. Esto se traduce en menor costo y uso de tecnologías alternas.

El punto de partida del algoritmo genético es modificarlo con el objetivo de clonar las funciones de la planta de calcinación, obteniendo de esta manera un nuevo algoritmo; las modificaciones que se realizan fueron tomadas de varias pruebas que al probar con los datos obtenidos del sourface.

Se programó en Visual Studio .NET, versión 2005; por las facilidades que presta este lenguaje de programación para poder realizar diferentes pruebas. Como los datos iniciales se obtuvieron trabajando en el Fuzzy Logic, se aplica otra herramienta de MatLab®, para llevar estos datos a Microsoft Excel®, y que el lenguaje de programación los pueda leer.

5.4.1 Creación de los Cromosomas

La estructura básica que se utilizó en el proceso, fue la propuesta por [12], donde en el cromosoma se plantean los antecedentes, seguidos de los consecuentes; partiendo del caso de estudio, los antecedentes son: Licor, Semilla y Reactivo; los consecuentes son: Licor de salida y Cobalto.

Los datos correspondientes a estas variables se trataron con dos técnicas: Fuzzy Logic, para llevarlas de un estado normal a conjunto borrosos y grados de membresía, esta técnica se utilizó porque no se tenían datos numéricos, sino, gráficas que representan las entradas y salidas reales del proceso de separación de níquel y cobalto (capítulo 3); Dynamic Data Exchange [31], para convertir el source en datos numéricos, y obtener una sola gráfica de salida y poder llevarla al lenguaje de programación.

5.4.2 Codificación de los cromosomas

En esta tesis no se utilizó ningún método de codificación; los datos obtenidos fueron llevados de un archivo en Microsoft Excel al lenguaje de programación, el cual los toma en formato decimal y de esa manera son aplicados a los diferentes pasos del algoritmo genético.

5.4.3 Operadores Genéticos

Los operadores genéticos utilizados fueron: cruce y mutación. Después de varias corridas se determinó que se debe aplicar primero el cruce, el cual cumple con la teoría, que de dos padres se aplique el cruce y se obtienen dos hijos a los que se evalúa su fitness para determinar cuáles cromosomas se tomarán para generar la siguiente población, y después la mutación, éste proceso que se lleva hasta la mitad de las generaciones, tiempo en el cual se supone, que ya se ha hecho toda una exploración en el espacio de búsqueda de las soluciones, para obtener la convergencia, esto aumenta el costo computacional y demora encontrar la solución.

5.4.4 Identificación de valores de salida

El algoritmo que se desarrolló para este trabajo, fue evaluado con diferentes generaciones; hay que aclarar que el costo computacional aumenta a medida que se aumente el número de generaciones. También fue probado en diferentes computadores de diferentes configuraciones, arrojando resultados en un menor tiempo en un servidor Power Edge 2800, con un procesador Xeon de 3.0 Ghz y un Gb en RAM.

Las pruebas realizadas con diferentes números de generaciones, también fueron evaluadas y analizadas, según las gráficas que se generaban, aquí se tuvo en cuenta el error generado en cada generación; las gráficas del caso de estudio y los resultados generados por el programa se analizaron por separado y en conjunto.

5.5 RESULTADOS

Después de realizar diferentes ejecuciones al algoritmo genético, con diferentes números de generaciones y de realizar ajustes al algoritmo como al programa, se obtuvieron las siguientes gráficas, la línea azul representa el sistema real y la línea roja representa el sistema clonado.

Figura 5.13. Sistema de clonación con una población de 500 individuos.

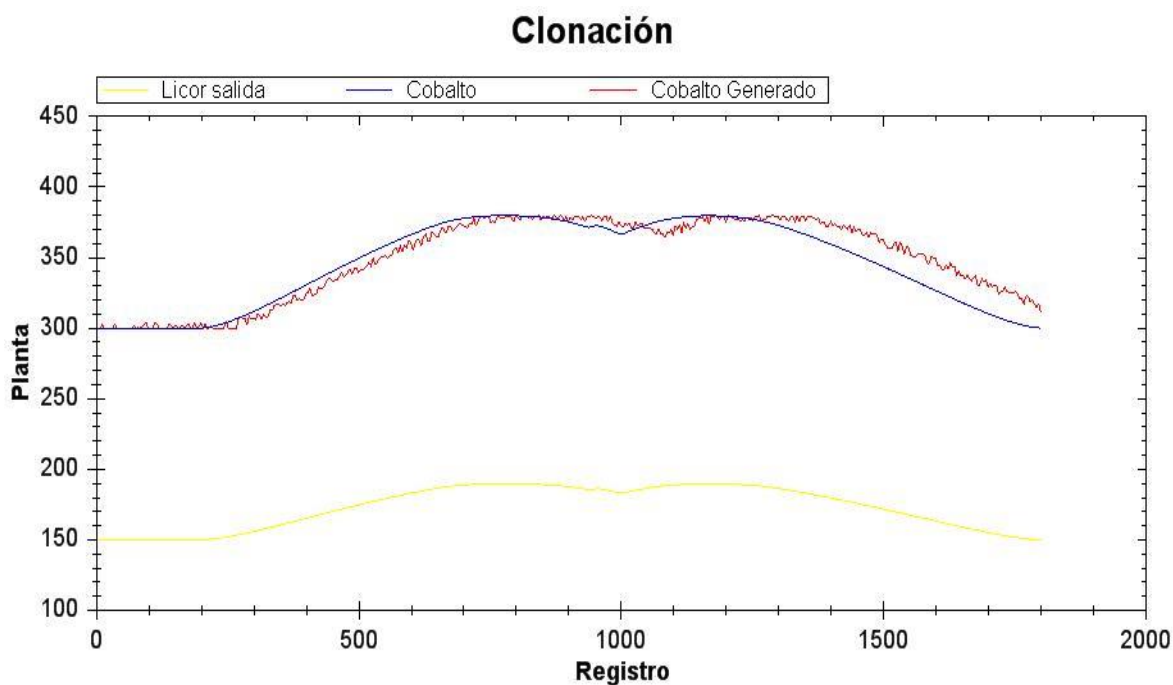


Figura 5.14. Sistema de clonación con una población de 500 individuos, aplicando cruce y mutación.

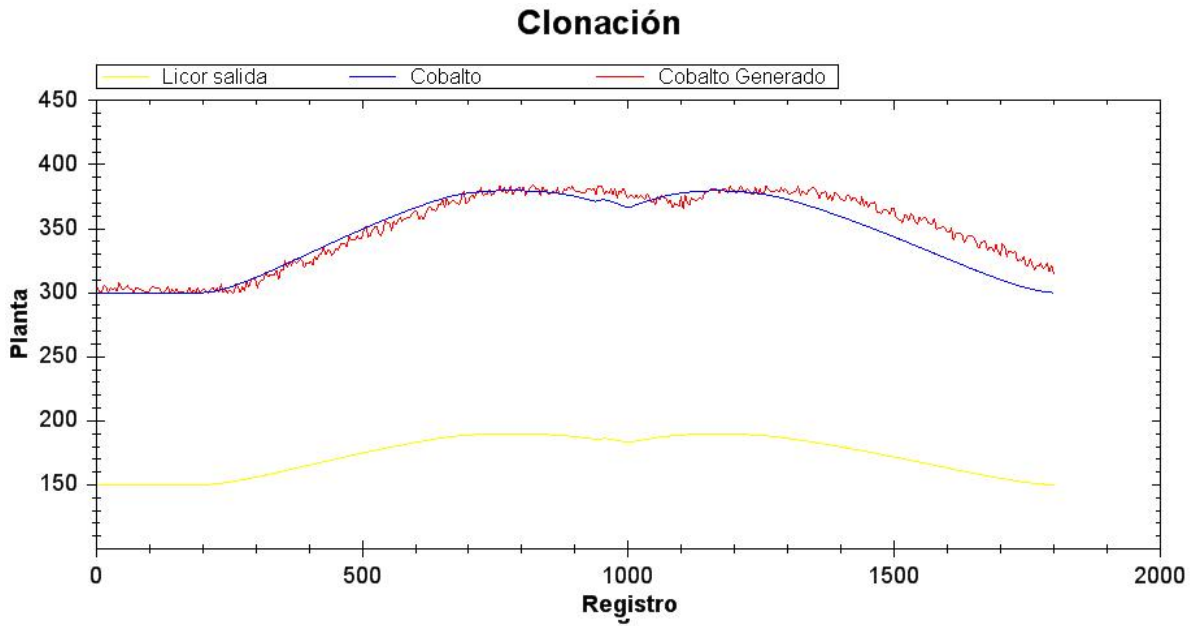


Figura 5.15. Sistema de clonación con una población de 1000 individuos.

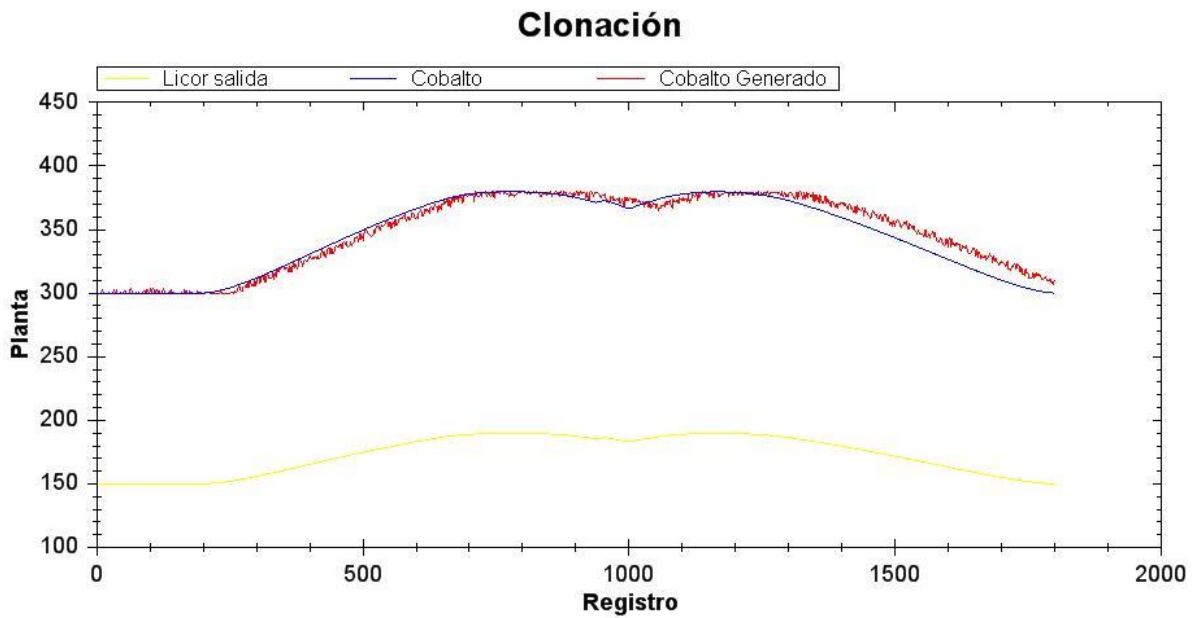


Figura 5.16. Sistema de clonación con una población de 1000 individuos, aplicando cruce y mutación.

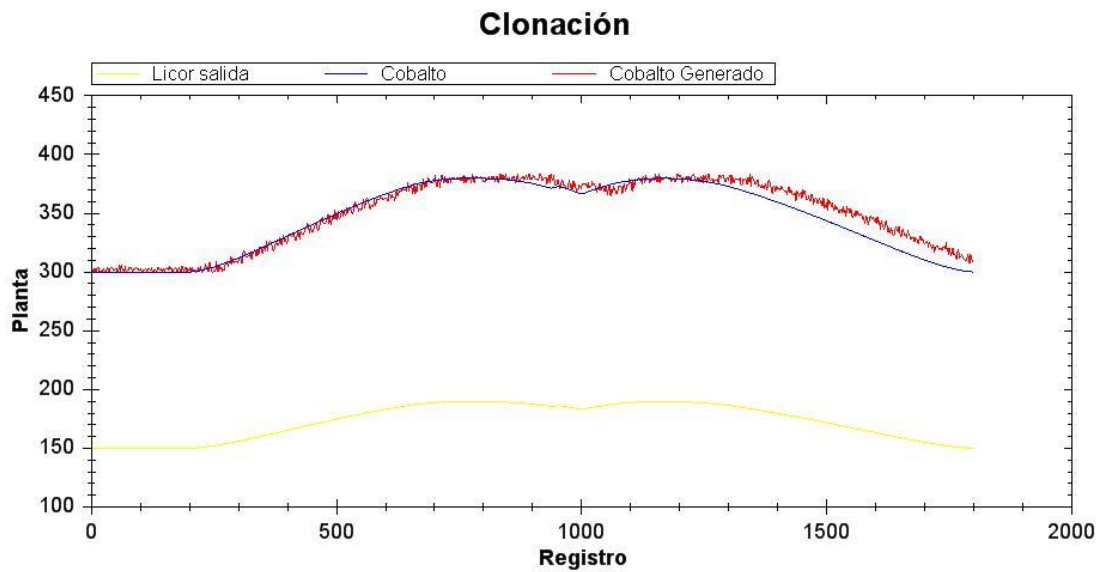


Figura 5.17. Sistema de clonación con una población de 1800 individuos.

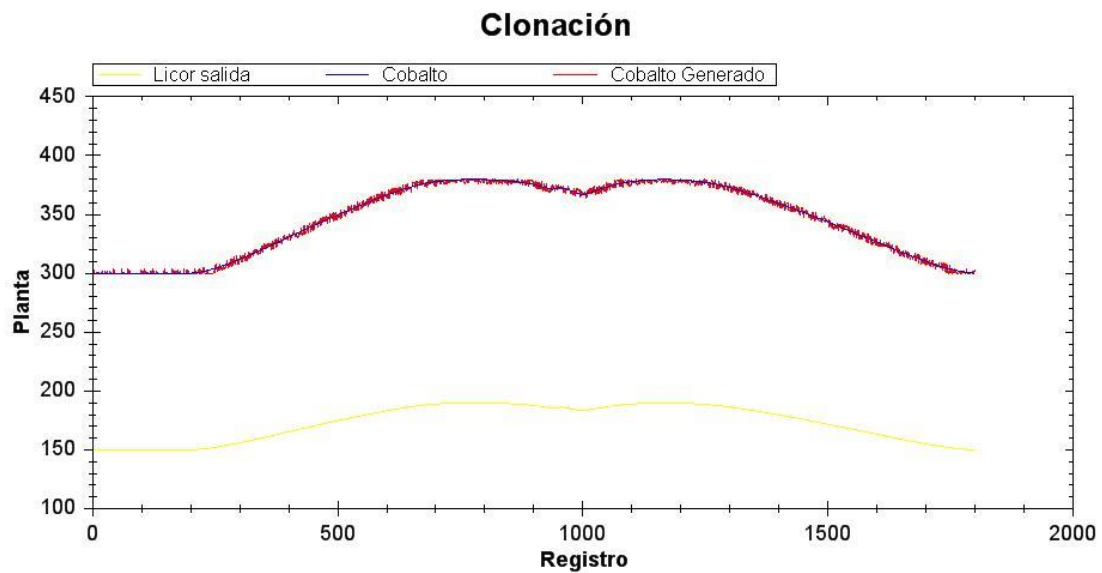
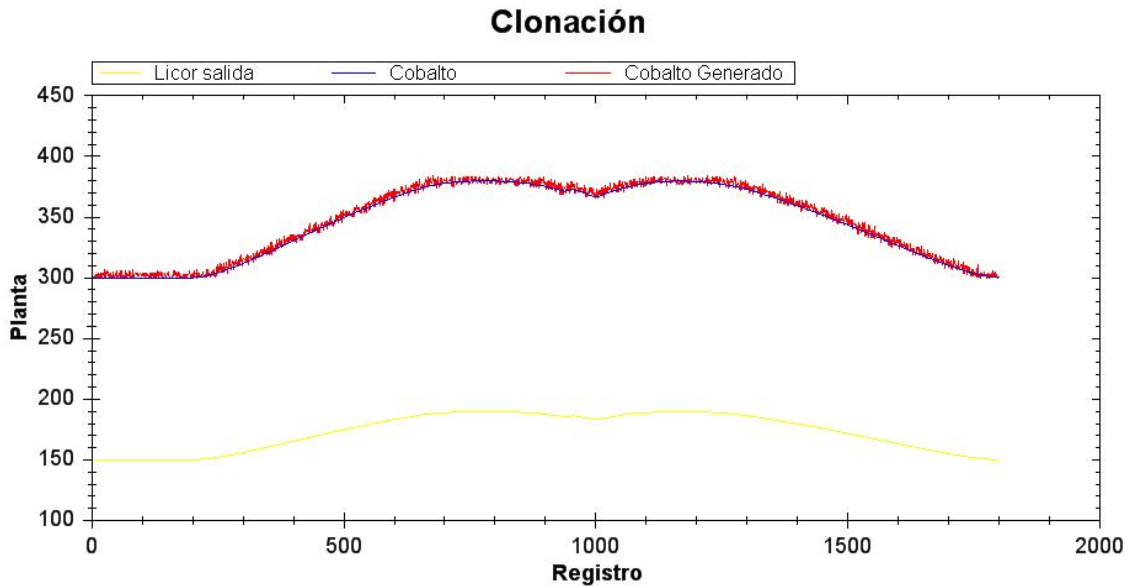


Figura 5.18. Sistema de clonación con una población de 1800 individuos, aplicando cruce y mutación.



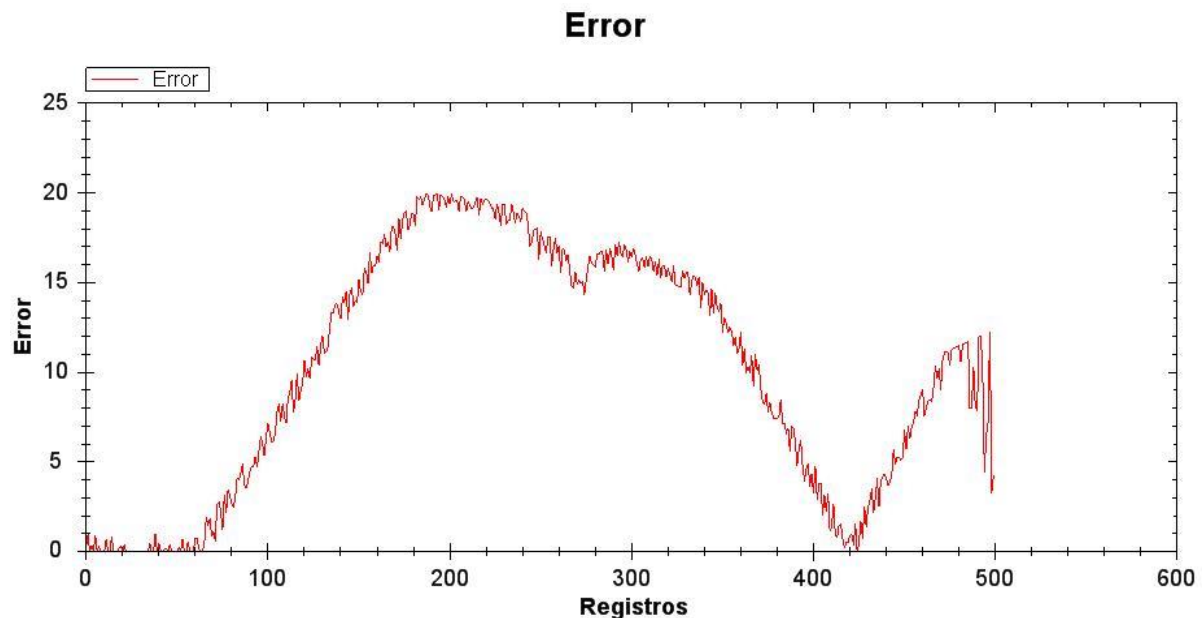
Estas gráficas como se menciona antes, fueron analizadas y evaluadas por separado y en conjunto, y con los datos que se tiene de [34], se procede a describir los resultados:

1. La primera versión del algoritmo propuesto, se trabajó en Matlab© por ser un lenguaje que permite el manejo de algoritmos genéticos. Mientras que la última versión, se utilizó Microsoft Visual Studio .NET 2005, por facilidad de manejo en los ajustes que se debían realizar. El segundo caso, presenta un tiempo de ejecución aceptable con 1800 generaciones, esto permitió probar diversos casos; al tratar de aumentar el número de generaciones el costo computacional aumentó y generaba problemas con el tiempo de ejecución y con requerimientos de máquina.
2. Las principales diferencias que se encuentran, es que el algoritmo genético simple [16], ha sido utilizado en optimización y búsqueda, pero no en proceso de replica de funciones; esto fue un inconveniente para poder evaluar los resultados obtenidos con otros estudios.

3. La primera de las adecuaciones que se realizaron en el proceso fue la evaluación de las reglas que se generaron en el Fuzzy Logic, esto permitió que los individuos desechados no se consideraran nuevamente en generaciones subsecuentes. Logrando un número aceptable de reglas para el proceso.
4. Para entender las gráficas es necesario considerar que a mayor número de padres se produce una mayor descendencia, por lo tanto se elimina un mayor número de individuos y la probabilidad de que un nuevo individuo se encuentre en el universo de los elementos eliminados es mayor. Esto da como resultado que el número de individuos evaluados y considerados en la contabilización total de individuos es menor conforme el número de padres aumenta. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que un número excesivo de padres podría ocasionar resultados contrarios a los esperados.

Al ejecutar la clonación con una población de 500 individuos sin cruce y mutación se genera un error alto que se aprecia en la figura 5.19.

Figura 5.19. Error del sistema de clonación, para una población de 500 individuos.



El comportamiento que presenta la clonación con una población de 500 individuos y al aplicar los operadores genéticos de cruce y mutación se obtiene un error aun mayor.

El programa de clonación al ser ejecutado con una población de 1800 individuos con los operadores de cruce y mutación presenta un error más alto que si sólo se ejecuta con el

operador macro de selección, este comportamiento se puede observar en las figuras 5.20 y 5.21, alcanzando un error aceptable de 0,7 por ciento.

Figura 5.20. Error del sistema de clonación con una población de 1800 individuos.

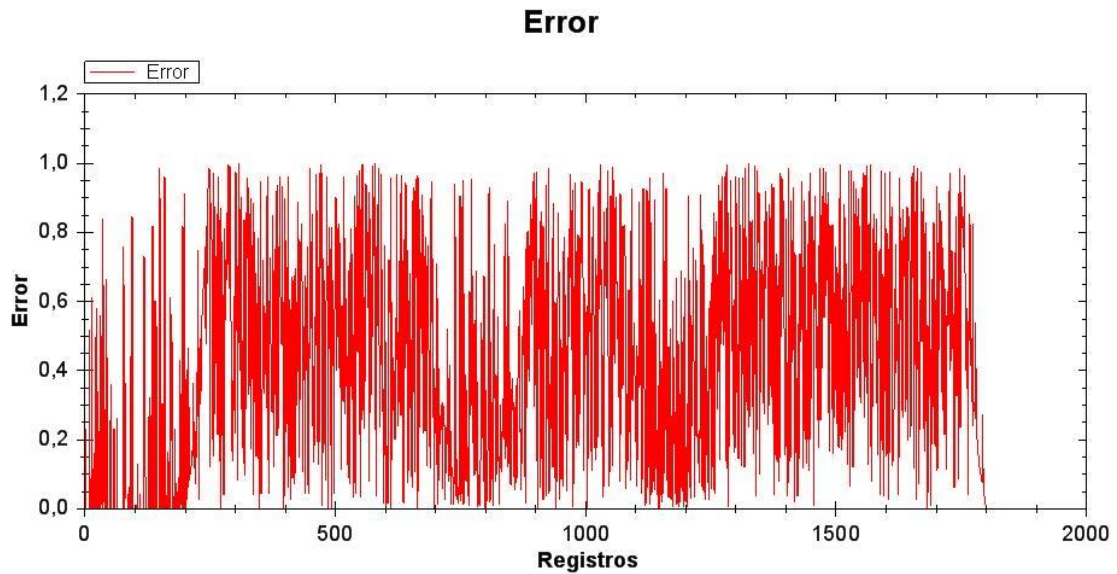
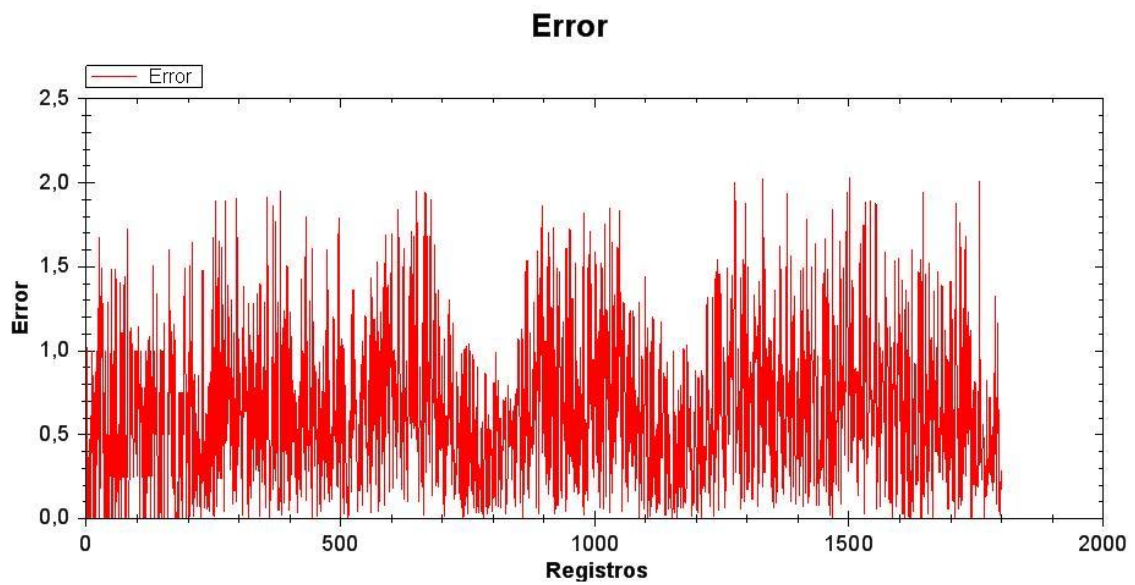


Figura 5.21. Error del sistema de clonación con una población de 1800 individuos, aplicando los operadores de cruce y selección.



6. CONCLUSIONES

Este trabajo presenta y desarrolla la Metodología de Clonación para Controladores, basada en principios de los Algoritmos Genéticos, con tres variables de entrada y dos de salida, para el caso de estudio. Se demuestra que mediante la clonación, se constituye una estrategia eficiente que permite hacer replicas de las funciones de un dispositivo de control desconocido en su integridad.

Con los resultados del proceso evolutivo se presenta un error aceptable entre el dispositivo real y el clonado, donde, para satisfacer los requerimientos el número de la población debe ser alto contra el total de la misma en este caso aproximado a 1800 generaciones, así el resultado se acerca más al óptimo esperado. Además al utilizar cruce y mutación se observa que también en estos se encuentran individuos que pertenecen a la solución. Para el caso de estudio que se abordó, el efecto de considerar la probabilidad de cruce y mutación diferente de cero es relevante, ya que sin cruce y mutación, la clonación difiere de la real.

Al realizar las pruebas de la metodología en el desarrollo de la aplicación, se encontró que el costo computacional es alto y exigente. Cada vez que se aumenta la población y se incluye las operaciones de cruce y mutación la demora es notoria para hallar la solución.

La metodología presentada es flexible permitiendo no solo la solución del caso de estudio, sino de otros problemas, aumentando el número de variables que se puede manejar de entrada y salida. La clonación permite emular tecnologías utilizadas para control en este caso, ofreciendo costos inferiores para la industria.

7. TRABAJOS FUTUROS

Abordar el problema de Clonación Artificial, usando técnicas de Inteligencia Artificial, como Algoritmos Genéticos, Lógica Difusa para replicar las funciones de un controlador industrial, se puede afrontar de forma más general de la que se desarrollo en este trabajo de grado, ya que hasta ahora los Algoritmos Genéticos se han utilizado en problemas de optimización y búsqueda. Para ello se utilizó el algoritmo genético propuesto por Holland, y se le incorporo nuevos pasos para que la formulación de este problema sea lo más general y normalizada posible.

Partiendo de este enunciado, se puede plantear dos líneas futuras de investigación, así: la primera para mejorar el algoritmo o proponer nuevos algoritmos, que sirvan para procesos clonación artificial; y la segunda, para que los algoritmos existentes, como los nuevos, sirvan para trabajar con el conocimiento y no solo con datos numéricos, esto porque al trabajar con datos numéricos los resultados no son muy exactos y la aproximación a la solución óptima tiene un error grande.

Uno de los aportes que en este trabajo se intenta demostrar es el planteamiento de la metodología de clonación artificial, usando las técnicas de inteligencia artificial, para trabajos futuros y como una línea de investigación, el perfeccionamiento de la metodología planteada, introduciendo otro tipo de consecuente que permita usar un método menos consumidor de tiempo así como incluir varias variables de entrada y salida servirá para ampliar el concepto de clonación, y adicional, no solo para trabajar en la replica de funciones de controladores, sino para incorporar nuevas características y ampliar la teoría de control.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] BALLESTEROS RICAURTE, Javier A. y GUEVARA PÉREZ, Alonso. Clonación artificial de controladores basados en técnicas de inteligencia artificial. En: *Cultura Científica*. No. 2, Octubre - 2004. p. 73-77.
- [2] COELLO COELLO, Carlos A. "An Empirical Study of Evolutionary Techniques for Multiobjective Optimization in Engineering Design", PhD thesis, Department of Computer Science, Tulane University, New Orleans, Louisiana, USA, April 1996.
- [3] COELLO COELLO, Carlos A. *Introducción a la Computación Evolutiva*. México, Enero 2004. CINVESTAV-IPN, Departamento de Ingeniería Eléctrica.
- [4] COELLO COELLO, Carlos A. Una Breve Historia de la Computación en el Mundo, in Giovanni Pérez Ortega, John William Branch Bedoya, Diego Carmona Duque y Oscar Ortega Lobo (editors), *Encuentro de Investigación sobre Tecnologías de Información Aplicadas a la Solución de Problemas (EITI 2004)*, pp. 1--8, Centro de Publicaciones Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Colombia, agosto de 2004, ISBN 958-9352-86-3 (invited paper).
- [5] COELLO COELLO, Carlos A., CHRISTIANSEN, Alan D. and Hernández Aguirre, Arturo. Automated Design of Combinational Logic Circuits using Genetic Algorithms. In D. G. Smith, N. C. Steele, and R. F. Albrecht, editors, *Proceedings of the International Conference on Artificial Neural Nets and Genetic Algorithms ICANNGA' 97*, pages 335–338, Norwich, England, April 1997. University of East Anglia, Springer-Verlag.
- [6] COELLO COELLO, Carlos A., SANTOS HERNÁNDEZ, Filiberto and Farrera, Francisco Alonso. Optimal Design of Reinforced Concrete Beams using Genetic Algorithms. *Expert Systems with Applications: An International Journal*, 12(1):101–108, January 1997.
- [7] COELLO COELLO, Carlos A. Treating Constraints as Objectives for Single-Objective Evolutionary Optimization. *Engineering Optimization*, 32(3):275–308, 2000.
- [8] DARWIN, Charles Robert. *The Variation of Animals and Plants under Domestication*. Murray, London, second edition, 1882.
- [9] DARWIN, Charles Robert. *On the Origin of Species by Means of Natural Selection Or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, sixth edition, 1964. Originally published in 1859.

- [10] DE JONG, Kenneth A. Genetic Algorithms are NOT Function Optimizers. In L. Darrell Whitley, editor, Foundations of Genetic Algorithms 2, pages 5–17. Morgan Kaufmann Publishers, San Mateo, California, 1993.
- [11] DEL BRIO, Bonifacio Martín y SANZ MOLINA, Alfredo. Redes Neuronales y Sistemas Difusos. 2 ed. Colombia: Alfaomega, 2002. p. 244-338.
- [12] DELGADO, Alberto. Inteligencia Artificial y Minirobots. 1998. 1 ed. Ecoe ediciones. 309 p.
- [13] FOGEL, David B. and STAYTON, L. C. On the Effectiveness of Crossover in Simulated Evolutionary Optimization. BioSystems, 32:171–182, 1994.
- [14] GARRIDO, Santiago. Identificación, Estimación y Control de sistemas No-Lineales mediante RGO. Leganés 1999, p. 187. Trabajo de grado (Ph.D. Sistemas), Universidad Carlos III, Madrid España. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática.
- [15] GARRIDO RODRIGUEZ, Miguel, FERNÁNDEZ MAREMA, Eulicer, LOBAINA ODUARDO, Omar y CAPOTE FLORES, Neicis. Precitaciones de los sulfuros de níquel y cobalto a partir de soluciones carbonato-amoniacaes sintéticas. Revista Minería y Geología. Vol. 18, No. 3-4. 2001. p. 113-117.
- [16] GOLDBERG, David E.. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machina Learning. Addison-Wesley Publishing Co., Reading, Massachusetts, 1989.
- [17] GÜNTER Rudolph. Convergence Analysis of Canonical Genetic Algorithms. IEEE Transactions on Neural Networks, 5:96–101, January 1994.
- [18] GUZMAN DEL RIO, Daniel, RODRÍGUEZ BORROT, Miguel, COLUMBIÉ NAVARRO, Ángel y MISA LLORCA, Roger. Proceso de lixiviación carbonato-amoniacaal: control multivariable a través del arreglo inverso de NYQUIST para el mezclado de mineral y licor. Revista Minería y Geología. Vol. 18, No. 2, 2001. p. 1-6.
- [19] HERREROS LÓPEZ, Alberto. Diseño de controladores robustos multiobjetivo por medio de algoritmos genéticos. Valladolid 2000, p. 275. Trabajo de grado (Doctor en Ingeniería), Universidad de Valladolid. España. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales.
- [20] HIRSCH, M. and S. Smale. Differential Equations, Linear Algebra and Dynamical Systems. Academic Press, Orlando, 1974.

- [21] HOLLAND, John H. Adaptation in Natural and Artificial Systems. University of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan, 1975.
- [22] HURTADO GONZÁLEZ, Claudia; IZQUIERDO RIVERA, Beatriz; LÓPEZ AGUADO, Marcela; CRUZ, Armando Nicolás y GÓMEZ RAMÍREZ, Eduardo. Mejoras de un algoritmo genético simple, aplicando conceptos de Computación Evolutiva. En: Revista Centro de Investigaciones. Vol. 6, No. 21, Jul.-Dic. 2003; p. 11-24.
- [23] KALMAN, R. E., P. L. Falb y M. A. Arbib. "Topics in Mathematical Systems Theory". McGraw-Hill, New York, 1969.
- [24] KHALIL, H. Sistemas No-Lineales. Notas de clase. Automatización y Control. 2001. 2 ed. Prentice Hall.
- [25] KUEHL, Robert O. Diseños de Experimentos. Principios estadísticos de diseño y análisis de investigación. 2 ed. 2001. Thomson. 660 p.
- [26] KUO, B.C "Automatic Control Systems" Quinta edición, editorial Prentice-Hall Englewood Cliffs, New York 1961.
- [27] LAGUNAS JÍMENEZ, José Rubén Felipe. Sintonización de controladores PID mediante un algoritmo genético multiobjetivo (NSGA-II). México 2004, p. 171. Trabajo de grado (Doctor en Ciencias). Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional. Unidad Zacatenco, control automático.
- [28] LAHOZ-BELTRÁ, Rafael. Bioinformática Simulación, vida artificial e inteligencia artificial. España, Ediciones Díaz de Santos. 2004. 561 p.
- [29] LEIVA GÓMEZ, Miguel Ángel. Localización óptima de condensadores en un sistema de distribución eléctrico vía algoritmos genéticos. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Santiago de Chile, 2001, 175 p. Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica.
- [30] LEWIS, F. "Applied Optimal Control and Estimation", Chapter 1: Introduction to Modern Control Theory, Prentice Hall, 1992
- [31] MATLAB. Control System Toolbox. The MathWorks, Version 6.5.0.180913a, Release 13.
- [32] McCULLAGH, P. and NELDER, J. A. Generalized Linear Models. Chapman and Hall, New York, 1989.

- [33] MUÑOZ MONER, Antonio Faustino y PARDO GARCÍA, Aldo. Algoritmos y sistemas de control borroso aplicados en la planta de calcinación de la industria de producción de níquel. En: Tecnologías de Avanzada. Vol. 2. No. 4. 2004. p. 25-32.
- [34] MUÑOZ MONER, Antonio, Tecnología de Control con Análisis Instrumental ONLINE. Moa – Cuba 1985, 160 p. Trabajo de grado (Ph.D. Ciencias Técnicas), Universidad de Acero y Aleaciones, Moscú Rusia. Facultad Metalurgia y Electromecánica, Programa- Doctorado en Control y Automatización Industrial.
- [35] MUÑOZ MONER, Antonio Faustino y PARDO GARCÍA, Aldo. Nuevos Diseños de Controladores por Lógica Fuzzy. En: Revista Colombiana de Computación. Vol. 2, No. 1, Junio-2001. p. 35-42.
- [36] PABA ARGOTE, Harry José y NUÑEZ COSSIO, Eudilson. Implementación de Sensores Inteligentes Utilizando Redes Neuronales Aplicados en Procesos de Refinación del Petróleo. Bucaramanga 2000. p. 116. Trabajo de Grado (Maestría en Ciencias Computacionales). Universidad Autónoma de Bucaramanga - Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (México).
- [37] QUINTERO LÓPEZ, Diego Fernando y VILLA RAMIREZ, José Luís. Desarrollo de unos polvos de control difuso para MatLab y diseño e implementación de un controlador difuso adaptativo. Manizales 1998. p. 93. Trabajo de grado (Ingeniero Electrónico). Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Ingeniería Electrónica.
- [38] RAIMÚNDEZ ÁLVAREZ, José Cesáreo. Estrategias evolutivas y su aplicación en la síntesis de controladores. Vigo, 1997, 263 p. Tesis doctoral. Universidad de Vigo. Departamento de Ingeniería de Sistemas.
- [39] RECHENBERG, Ingo. Evolutionsstrategie: Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution. Frommann–Holzboog, Stuttgart, Alemania, 1973.
- [40] REYES SIERRA, María Margarita. Estudio de algunos aspectos teóricos de los algoritmos genéticos. México 2002, p. 110. Trabajo de grado (Maestría en Inteligencia Artificial), Universidad Veracruzana.
- [41] REYES SIERRA, M.M. y COELLO COELLO, C.A. Un Algoritmo Coevolutivo para Optimización Multiobjetivo Basado en Clustering, en Felipe Padilla, Carlos Coello, Katya Rodríguez y Francisco Álvarez (editores), Memorias del Segundo Congreso de Computación Evolutiva (COMCEV'05), pp. 63--71, Universidad Autónoma de Aguascalientes, Aguascalientes, México, Mayo de 2005, ISBN 970-728-024-7.

- [42] ROMERO RAMÍREZ, María, LLOPIZ YURELL, Julio y JEREZ MENDEZ, Antonio. Individualización cinética de reacciones simultaneas por espectrometría de masa: descomposición térmica de los carbonatos básicos de níquel y cobalto. *Revista Minería y Geología*. Vol. 18, No. 3-4, 2001. p. 95-100.
- [43] SANCHEZ CARPENA, Gracia. Diseño y evaluación de algoritmos evolutivos multiobjetivo en optimización y modelización difusa. Murcia 2002, p. 356. Trabajo de grado (Doctor en Informática). Universidad de Murcia, Facultad de Informática, Departamento de Ingeniería de la Información y las Comunicaciones.
- [44] SCHMITT-Braess, G., (1999) —Frequency domain evaluation of Circle Criterion, Popov Criterior and Off-Axis Criterion in the MIMO case“. *International Journal of Control*, 72(13) pp. 1299-1309.
- [45] TAKAGI, T., SUGENO, M. (1985). Fuzzy identification of system and its application to modeling and control. *IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics*, 15:116-132.
- [46] The MathWorks, Inc. MatLab. [CD ROM: versión 5.3 y 7.0.1.24704 (R14) Service Pack 1, September 13, 2004]
- [47] OGATA, Katsuhiko. *Sistemas de Control en Tiempo Discreto*. Pearson Educación. México, 1996.
- [48] ZADEH, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8:338-353.
- [49] ZHANG, L. y B. Zhang, "A Geometrical Representation of McCulloch-Pitts Neural Model and Its Applications", *IEEE Transactions on Neural Networks*, 10, (4), 925-929, (1999).
- [50] UMEZ-ERONINI, Eronini. *Dinámica de Sistemas y Control*. Thomson Editores. México, 2001.
- [51] OLLERO, Aníbal. *Robótica, Manipuladores y Robots móviles*. Marcombo S.A. España, 2001.
- [52] LÓBEZ DE PHOENIX, Rafael. *Historia de la Ingeniería de Control* [online]. [Zaragoza, España]: mayo. 2006 [cited 17 mayo, 2006]. Capítulo VI. Disponible en [www: <http://automata.cps.unizar.es/Historia/Webs/teoria_moderna_de_control.htm>](http://automata.cps.unizar.es/Historia/Webs/teoria_moderna_de_control.htm)