



CIATEC

SISTEMA INTEGRAL DE CONTROL DINÁMICO *SICD*: Un enfoque híbrido para el cumplimiento de las especificaciones de calidad.

Tesis

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE

Doctor en Ciencia y Tecnología
en la Especialidad de
Ingeniería Industrial y de
Manufactura

PRESENTA

Roberto Baeza Serrato

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Javier Yáñez Mendiola

CO-DIRECTOR DE TESIS

Dr. José Antonio Vázquez López



CIENCIA Y TECNOLOGIA

León, Guanajuato, México. Agosto del 2012

“Sistema Integral de Control Dinámico SICD: Un enfoque híbrido para el cumplimiento de las especificaciones de calidad”

RESUMEN

Históricamente se han empleado gráficos de control (GC) para supervisar la calidad de la producción de los procesos industriales. Un concepto relacionado a los GC es el índice de la capacidad del proceso (Cp_k), el cual compara a los límites de especificación establecidos con el comportamiento del proceso. Un índice de capacidad del proceso menor que 1.33 se considera no aceptable, al tener una tasa de productos no conformes mayor a 64 ppm, debido a que el rango de los límites de especificación es inferior al producto 6σ . Normalmente esto se debe a valores grandes de σ , que pueden obtenerse paulatinamente en el tiempo o en un solo instante, constituyendo una causa especial detectable en los GC de rangos o de la desviación estándar. El uso de los GC para éste propósito tiene limitantes de operación, ya que sólo determina los momentos en el tiempo de la presencia de tales causas, pero no implica la corrección de sus efectos en la mala calidad, ni toma en cuenta el índice de la capacidad del proceso. En consecuencia, una forma alterna a los GC que permita lograr ajustes en el proceso de manufactura, durante la producción e incremente el índice de la capacidad de proceso resulta útil. En esta investigación se presenta un enfoque que posibilita esta situación, determinando **“el qué y cómo”** hacer los ajustes en el proceso en función de sus “salidas”. Se propone la integración de modelos estadísticos de regresión a un sistema integral de control dinámico de lazo cerrado (SICD). El funcionamiento del SICD se explica por el procesamiento de la “señal de error”, calculada por el propio sistema y reducida a través de un algoritmo de ajuste; este algoritmo incorpora una variable de compensación a un modelo de regresión lineal obtenido experimentalmente que representa al elemento controlador del sistema. El SICD aquí presentado fue validado por dinámica de sistemas, lo que permitió identificar las zonas de ajuste para construir el gráfico del SICD y al diseño

políticas de operación adecuadas. Esto constituye un enfoque de control de procesos novedoso para el caso de aplicación expuesto. El *SICD* consta de cuatro elementos básicos y una función de transferencia usada como indicador de eficiencia en los ajustes realizados. Los elementos del *SICD* son: *i.* elemento controlador, el cual representa una de las contribuciones principales de la investigación, proponiendo un algoritmo de ajuste e incorporando una variable de compensación, *ii.* elemento de proceso, *iii.* elemento de medición y *iv.* elemento de comparación. Los resultados de la prueba del *SICD* fueron comparados con el gráfico de control de mediciones individuales y se muestra el impacto en el restablecimiento de la capacidad de un proceso de producción textil para producir piezas conformes con las especificaciones de calidad. Como cierre de la investigación se utilizó simulación de muestras aleatorias con distribución normal, para analizar la eficiencia de los ajustes del *SICD* propuesto.

Palabras claves: Dinámica de sistemas, ingeniería de control, modelos de regresión, gráficos de control, índice de capacidad de proceso.

AGRADECIMIENTOS

Estos cuatro últimos años han sido para mí los más importantes, intensos y fascinantes de mi trayectoria profesional. En este tiempo he tenido la enorme satisfacción de ser parte de la familia CIATEC, de conocer y de trabajar con personas que me han ayudado de una forma u otra en mi formación como investigador, lo cual ha permitido presentar este documento de tesis doctoral, y a las que les estoy profundamente agradecido.

Aunque el hecho de mencionar y exponer una lista de personas siempre supone un riesgo de olvidar a alguna de ellas, quisiera hacer una especial mención de agradecimiento para las siguientes.

Primero y antes que nada, dar gracias a Dios, por estar conmigo cada día de mi vida, por ayudarme en mantener la tenacidad de ser mejor persona y ser humano, fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquéllas personas que han sido mi soporte durante todo el periodo de estudio.

Agradezco al Doctor Javier Yáñez Mendiola, director de ésta tesis su valioso tiempo, entrega, dedicación absoluta y su guía en el presente trabajo de investigación, así como su trato siempre cordial y amable.

Mi gratitud al Doctor José Antonio Vázquez López, co-director de ésta tesis, al que nunca podré corresponder como merecería su conocimiento y sabiduría empleados en mi formación doctoral. Por si no fuera suficiente la deuda de gratitud que con él tengo contraída, me honra cada día con su personal trato y afecto. Gracias, de corazón, por ser un verdadero maestro.

Agradezco al Doctor Miguel Gastón Cedillo Campos, su conocimiento, su entrega y profesionalismo en la impartición de la clase dinámica de sistemas, al grado de motivar en mí la idea de desarrollar un sistema integral de control dinámico, que permita el cumplimiento de las especificaciones de calidad.

De igual manera un agradecimiento especial al M. Antonio Quijas, coordinador del posgrado en el CIATEC, por su apoyo valioso e incondicional a cada una de las peticiones requeridas. Gracias por tu forma de ser, por tu amabilidad, por tus consejos y pláticas motivantes que tuviste para mi persona, lo cual fue parte importante en mi formación doctoral.

Agradezco a toda la plantilla docente del CIATEC por su compromiso, entrega y disposición en la impartición de cada una de las diferentes asignaturas en el posgrado.

Un agradecimiento al CONACYT, por el apoyo económico recibido al ser beneficiado como becario, lo cual permitió realizar mi formación doctoral.

Gracias a mis compañeros de generación por su apoyo y colaboración.

En el apartado personal, mi gratitud y mi amor a mi esposa Evangelina Díaz, compañera y amiga, por su inestimable apoyo, comprensión y amor para sobrellevar el abandono al que ha estado sometida, durante todas las horas que he dedicado a éste trabajo. También gracias, una y otra vez a mis hijos, Roberto Alexander Baeza y Melany Lisset Baeza, que espero con todo deseo que lleguen a entender algún día, el motivo por el que durante tantas horas no he podido dedicarles la atención que merecen, y para que les quede el recuerdo que con su ayuda, comprensión y amor alcancé el objetivo profesional idealizado.

Gracias a mi madre Esperanza Serrato por su amor y apoyo incondicional para alcanzar mí sueño profesional. De la misma manera agradezco el amor y valioso apoyo moral, a mis tías María Serrato y Angélica Serrato.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE ECUACIONES	viii
1. CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Definición del problema.....	2
1.3 Justificación	3
1.4 Objetivo General.....	4
1.5 Objetivos Específicos.....	4
1.6 Hipótesis General	5
1.7 Alcance de la investigación.....	5
1.8 Contribución original	6
1.9 Organización de la tesis.....	6
2. CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	8
2.1 Gráficos de control	8
2.2 Diseño factorial.....	8
2.3 Ingeniería de control.....	9
2.4 Superficies de respuesta.....	9
2.5 Dinámica de sistemas	10
2.6 Fundamento teórico de Dinámica de Sistemas	13
2.7 Mundo virtual.....	13
2.8 Retroalimentación	15
2.9 Diagramas causales.....	18

Sistema Integral de Control Dinámico (SICD)

2.10 Hipótesis dinámica.....	30
2.11 Variables de estado	32
2.12 Representación matemática	34
2.13 Diagrama de Forrester.....	37
3. CAPÍTULO 3: PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN.....	41
3.1 Elemento de Proceso (<i>EP</i>)	42
3.2 Elemento de comparación (<i>ECM</i>).....	42
3.3 Elemento Controlador (<i>EC</i>).....	42
3.4 Elemento de Medición (<i>EM</i>).....	47
3.5 Función de transferencia del <i>SICD</i>	47
3.6 Construcción del Formato del Gráfico de Control del <i>SICD</i>	48
4. CAPÍTULO 4: RESULTADOS.....	51
4.1 Validación dinámica para obtener las zonas de ajuste (α_i) del <i>SICD</i>	51
4.2 Resultados	53
4.3 Simulación.....	57
4.4 Método de implementación: <i>SICD</i>	61
4.5 Conclusiones.....	63
4.6 Recomendaciones.....	64
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
ANEXO 1: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL ENGINEERING	69
5. REFERENCES.....	75
ANEXO 2: DYNA INGENIERÍA E INDUSTRIA	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Modelo Estadístico $Y = f(x)$	9
--	---

Figura 2.2 Sistema de realimentación negativa	9
Figura 2.3 Comportamientos básicos en Dinámica de Sistemas. A) Crecimiento exponencial, B) Buscando metas, C) Crecimiento en forma de S, D) Oscilación, E) Crecimiento con sobredisparo y F) Sobredisparo y colapso	11
Figura 2.4 Sistema Integral de Control Dinámico	12
Figura 2.5 Mundo virtual (Sterman, 2000)	14
Figura 2.6 A) Comportamiento exponencial y B) Bucles de reforzamiento positivo.	16
Figura 2.7 A) Comportamiento Buscando metas y B) Bucles de balanceo	16
Figura 2.8. A) Diagrama modelo de regresión con retroalimentación positiva y B) Comportamiento crecimiento exponencial.....	17
Figura 2.9. A) Modelo de regresión con retroalimentación positiva y negativa, B) Comportamiento crecimiento exponencial y buscando metas	18
Figura 2.10. Diagrama causal proyectos de inversión pública. Osorio (2010)	19
Figura 2.11. Modelo conceptual de producción de conocimiento. Díaz (2010)	20
Figura 2.12. Diagrama causal inferencia difusa. Andrade (2010)	21
Figura 2.13. Diagrama causal proceso de planeación. Rubiano (2010)	22
Figura 2.14. Diagrama causal comportamiento de mercados. Buendía (2010)	23
Figura 2.15. Diagrama causal dinámicas mutuamente dependientes. Maimbil (2010)	24
Figura 2.16. Diagrama causal cadena de azúcar. Restrepo (2010)	25
Figura 2.17. Diagrama causal cadena abastecimiento baterías eléctricas. Ramírez (2010)	26
Figura 2.18. Diagrama causal tecnología energética. Ceballos (2010)	26
Figura 2.19. Diagrama causal rotación de personal. Micán (2010).	27
Figura 2.20. Diagrama causal acceso económico a los alimentos. Posada (2010).....	28
Figura 2.21. Diagrama causal rutinas de dieta alimenticia	29
Figura 2.22. Diagrama causal rutinas dietas alimenticias.....	29
Figura 2.23. Hipótesis dinámica del Sistema Integral de Control Dinámico	31
Figura 2.24. Metáfora Hidráulica	33
Figura 2.25. Elementos diagrama de Forrester	34

Figura 2.26. Modelación Matemática de la Metáfora Hidráulica (Sterman, 2000) .	36
Figura 2.27. Diagrama de Forrester Sistema Integral de Control Dinámico	38
Figura 3.1. SICD de Lazo Cerrado con Realimentación Negativa.....	41
Figura 3.2. Formato del gráfico de control del SICD	50
Figura 4.1. Diagrama de Forrester del SICD.....	52
Figura 4.2. Identificación de la zona α_1 del SICD.....	54
Figura 4.3. Identificación de las zonas α_1 y α_2 del SICD.	55
Figura 4.4. Identificación de las zonas α_1 , α_2 y α_3 del SICD.....	55
Figura 4.5. Gráfica de control de mediciones individuales	57
Figura 4.6. Gráfica de control SICD e indicador de la capacidad del proceso.	58
Figura 4.7. Gráfica del SICD y capacidad del proceso para un ajuste.....	58
Figura 4.8. Gráfica del SICD y capacidad del proceso para un ajuste.....	59
Figura 4.9. Gráfica del SICD y capacidad del proceso para un ajuste.....	59
Figura 4.10. Gráfico del SICD.....	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Comparación de conceptos	37
Tabla 3.1. Elementos del gráfico de control del SICD.....	48
Tabla 4.1 Comparación de conceptos	53
Tabla 4.2 Estabilidad del SICD.....	56
Tabla 4.3 Elementos del gráfico del SICD.....	56

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Tasa de cambio.....	34
Ecuación 2. Tasa neta de cambio	35
Ecuación 3. Factor X2	39
Ecuación 4. Factor X3	39
Ecuación 5. Factor X4	39
Ecuación 6. Ecuación Diferencial Grad acanalado.....	39
Ecuación 7. Ecuación Diferencial Econom acanalado	39

Ecuación 8. Ecuación Diferencial Econom resorte	39
Ecuación 9. Modelo de Regresión Lineal	42
Ecuación 10. Señal de error.....	42
Ecuación 11. Regresión inversa	43
Ecuación 12. Vector de compensación.....	43
Ecuación 13. Relación entre factor no dominante y dominante	45
Ecuación 14. Variable de compensación factor significativo dominante	45
Ecuación 15. Variable de compensación factores significativos no dominantes....	45
Ecuación 16. Conversión de niveles a unidades naturales	46
Ecuación 17. Factor dominante	46
Ecuación 18. Factores no dominantes.....	46
Ecuación 19. Valores ajustados	46
Ecuación 20. Función de transferencia.....	47
Ecuación 21. Sensitividad	47
Ecuación 22. Variabilidad efecto lineal	48
Ecuación 23. Modelo de regresión para validación	51
Ecuación 24. Función de transferencia final.....	57

1. CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Actualmente se dispone de formas alternas a los GC para establecer mecanismos de control en los procesos de producción. Predominan dos tendencias; la primera corresponde al uso de redes neuronales artificiales para el reconocimiento de patrones (lo que equivale en los GC a detectar causas especiales, pero con mucho mayor eficiencia). Por ejemplo Vázquez et. al (2010) propusieron un método para determinar los valores apropiados de los parámetros de control de una red Fuzzy ARTMAP en orden de incrementar su eficiencia en el reconocimiento de patrones asociados a causas especiales de variación. Guh y Shiue (2010) propusieron una red Time Delay Neural para detectar los patrones que varían a través de tiempo, que no se pueden simular con redes neuronales tradicionales como la Backpropagation. Pham y Chan (1998) describen una red neuronal auto-organizativa de reconocimiento de patrones básicos de los gráficos de control, que aprende a reconocer nuevos patrones. La segunda tendencia para controlar la calidad de los procesos en lugar de GC, es la implementación de sistemas híbridos de ajustes en el proceso durante la producción basados en las salidas del mismo. Georgieva y Feyo de Azevedo (2009), propusieron un sistema híbrido con dos alternativas de control (primero un modelo predictivo de control y segundo un control linealizado de realimentación), utilizando redes neuronales como función de transferencia del sistema de realimentación de lazo cerrado analizado. Zhao et al. (2008) propusieron un sistema híbrido de control predictivo y de diseño de programación que es aplicado en la generación de las predicciones de control para cada sistema de lazo cerrado. Black et al. (2001) consideraron el impacto de utilizar en forma conjunta control estadístico de proceso y control de ingeniería de proceso, en un sistema híbrido denominado control integral de proceso, el cual usa un controlador integral para realizar los ajustes, utilizando un modelo dinámico de primer orden ARIMA con perturbaciones. Estas investigaciones realizadas utilizando redes neuronales o proponiendo sistemas híbridos de control de lazo cerrado, dan respuesta a la pregunta “**cuándo**” se

necesita realizar un ajuste al proceso, pero no se da respuesta a las preguntas “**qué**” y “**cómo**” hacer para realizar los ajustes necesarios, vislumbrando un área de oportunidad considerada en ésta investigación para explicar el “**qué y cómo hacer**” para retornar el control del proceso y el cumplimiento de las especificaciones.

1.2 Definición del problema

Los GC son empleados como medios para conseguir la conformancia de P (Productos) con sus especificaciones en C (Características de calidad). Con éstos se logra detectar los momentos en el tiempo en que una causa especial de variación ha dado lugar a la no conformancia, mediante “anomalías observables” en las gráficas de control. Sin embargo, saber esto no es suficiente para hacer asegurar calidad; de acuerdo con Guh (2005), los GC sólo indican “**cuándo**” es necesario realizar una búsqueda de causas especiales de variación para poder hacer el ajuste requerido en el proceso, pero no muestran “**qué hacer**”, ni tampoco “**cómo hacerlo**”. Otras desventajas de los GC son los requerimientos probabilísticos de normalidad e independencia en la variable dependiente Y , lo que no siempre puede observarse fácilmente. Otro concepto relacionado con los GC es el indicador de la capacidad de proceso (CP_k), utilizado para analizar el cumplimiento o no cumplimiento de las especificaciones requeridas. Los GC utilizan límites naturales de control, calculados a partir del rendimiento del proceso a través del tiempo. Las especificaciones o tolerancias están en función de lo que el proceso está diseñado a cumplir y no necesariamente tienen una relación directa con el rendimiento actual del proceso, sin embargo hoy en día las especificaciones de los productos son menores a los límites de control naturales, situación que no toma en cuenta los GC y razón por la cual se inicia esta investigación con un enfoque integrado multimodal, utilizando múltiples herramientas de Ingeniería, tales como ingeniería de control, control estadístico de proceso, diseño experimental, superficies de respuesta y dinámica de sistemas, en

la búsqueda de un sistema que explique **“el qué y cómo hacer”** para retornar el proceso bajo control y se incremente el indicador de la capacidad del proceso.

1.3 Justificación

En todo sistema existe flujo e intercambio de material e información. La falta de comprensión del comportamiento del proceso, debida a los eventos aleatorios, fluctuaciones estadísticas, las demoras y la retroalimentación entre las variables del sistema, son factores determinantes para tener desviaciones a las especificaciones del producto.

Una sola función en un proceso no es capaz de producir un producto por sí mismo. Una empresa no puede vender el producto que no puede elaborar. No sirve de nada fabricar un producto que no puede venderse. Cuando las diversas partes de un sistema trabajan en conjunto, se obtiene un efecto sinérgico en el cual el producto del sistema es mayor que la suma de las contribuciones individuales de sus partes. El utilizar la fusión de herramientas de ingeniería industrial permite crear una sinergia y desarrollar un sistema integral de control dinámico, que pueda utilizarse en cualquier sector industrial para que se dé el cumplimiento de las especificaciones requeridas.

EL *SICD* es un sistema de control avanzado de lazo cerrado con retroalimentación negativa, formado por cuatro elementos: Elemento de proceso, elemento de medición, elemento de comparación y elemento controlador.

Para todo sector industrial el cumplimiento de las especificaciones de su producto, es una de las prioridades básicas para permanecer en el mundo globalizado en donde vivimos. Existe una amplia gama de herramientas y sistemas de control de calidad, pero actualmente no se tiene una herramienta de ingeniería industrial que específicamente explique **“qué hacer”** y **“cómo hacer”**, para que el producto cumpla las especificaciones requeridas. El Sistema Integral de Control Dinámico permite a través de un algoritmo de ajuste el cumplimiento en las especificaciones

del producto, utilizando el método científico como base en el desarrollo del sistema propuesto.

El desarrollo del sistema integral de control dinámico, permite entender el comportamiento de los ajustes a realizar en el proceso, identificando y delimitando las zonas de ajuste en el sistema, para crear políticas adecuadas para el ajuste de la característica de calidad. Se generó un algoritmo que permite el ajuste de las no conformidades, a las especificaciones del producto requeridos, a través de una adecuación a la técnica de optimización por escalamiento ascendente, incrementando el conocimiento tecnológico del proceso, y la calidad del producto.

Esta investigación se desarrolla con un enfoque integrado multimodal, utilizando múltiples herramientas de Ing. industrial, tales como ingeniería de control, control estadístico de proceso, diseño experimental, superficies de respuesta y dinámica de sistemas.

1.4 Objetivo General

- Desarrollar un sistema integral de control dinámico, que permita el cumplimiento de especificaciones de calidad en tiempo real, que sea descriptivo del “**qué**” y “**cómo**” proceder.

1.5 Objetivos Específicos

- a) Entender el comportamiento del sistema dinámico para desarrollar el *SICD*.
- b) Identificar las zonas de ajuste del sistema dinámico para realizar el número de ajustes correspondientes.
- c) Explicar la relación causal de las variables de operación y las características de calidad analizadas empleando diseño experimental.

- d) Desarrollar un Algoritmo de ajuste en tiempo real, incorporando una variable de compensación a un modelo de regresión obtenido experimentalmente, para realizar los ajustes correspondientes en el *SICD*
- e) Definir el formato del sistema integral de control dinámico para utilizarlo en aplicaciones de campo.
- f) Diseñar políticas operativas adecuadas para un eficiente control del proceso
- g) Aplicación en campo del Sistema Integral de Control Dinámico.

1.6 Hipótesis General

El sistema integral de control dinámico permite entender y manipular el comportamiento del proceso, disminuyendo las desviaciones al cumplimiento de los requerimientos de calidad e incrementa el grado de conocimiento tecnológico del proceso.

1.7 Alcance de la investigación

El proceso de investigación utilizado fue el abductivo, para detectar las desviaciones obtenidas con lo planeado de manera cíclica durante la elaboración del proyecto. El alcance de la investigación es de tipo explicativo, ya que se encuentran y explican los efectos de las relaciones de las variables en estudio, así como los ajustes requeridos para el cumplimiento de las especificaciones de calidad.

El diseño de la investigación fue experimental, ya que una vez concluido el *SICD*, se validó en estudios de campo, llevando a cabo los experimentos necesarios.

Esta propuesta de control avanzado puede ser tomada como referencia a aplicar a cualquier sector productivo. Analizando las características de calidad a controlar, las cuales deben cumplir especificaciones requeridas.

1.8 Contribución original

Con este enfoque híbrido de control de procesos se propuso efectuar el control de la calidad de la producción sin la búsqueda de causas especiales ni la detección de patrones especiales o el uso de técnicas estadísticas de estimación, por lo que el *SICD* puede considerarse como una herramienta de ingeniería industrial para realizar ajustes en los procesos de producción e incrementar el indicador de la capacidad del proceso. Esta investigación presenta tres contribuciones principales.

- a) Un sistema de control avanzado que permite ejecutar acciones de control cuando se identifican condiciones de no conformidad por comparación de mediciones individuales con las especificaciones, a través de un algoritmo de ajuste que incorpora una variable de compensación y representa el elemento controlador, el cual se explica en el Capítulo 3.
- b) Análisis del rendimiento en los ajustes del *SICD* a través de una función de transferencia de una característica dinámica, el cual se explica en el Capítulo 3.
- c) Diseño del gráfico de control y ajuste para el sistema *SICD*, el cual se explica en el Capítulo 3.

Para la validación del *SICD*, se utilizó el resultado del diseño experimental obtenido durante la presente investigación, en un sistema de producción textil, analizando productos de tejido de punto elaborados en una máquina denominada SHIMASEIKI, donde las pruebas experimentales, de simulación y de validación se llevaron a cabo sobre un lienzo acanalado, fabricado con hilo Apolo de composición lycra y polyester al 50%. La característica de calidad considerada fue la longitud del lienzo, medida en centímetros.

1.9 Organización de la tesis

Este trabajo se organizó en cuatro capítulos seguidos del resumen. La descripción general de esta tesis se explica a continuación: En el resumen se expresa un

Capítulo 1: Introducción

panorama general de la tesis. En el Capítulo 1, introducción, se informa al lector sobre la importancia del cumplimiento de las especificaciones y su relación con la teoría de los límites de control natural. Se define el tema de investigación estableciendo la hipótesis de trabajo. La justificación y los objetivos son mostrados, como consecuencia del establecimiento del tema de investigación. El Capítulo 2 trata sobre la fundamentación teórica y se introduce el tema de control estadístico de procesos, diseño experimental, ingeniería de control, superficies de respuesta, dinámica de sistemas y su relevancia al utilizarlas en forma conjunta para el desarrollo del sistema integral de control dinámico establecido en esta tesis. En este capítulo se trata la fundamentación teórica de esta investigación en el tema de referencia base: dinámica de sistemas, mostrando los conceptos básicos como las variables de estado, los flujos y la retroalimentación de los sistemas dinámicos. En el Capítulo 3 se muestra el procedimiento de investigación empleado, así como las contribuciones principales de esta investigación. Los resultados experimentales obtenidos, el método de implementación y las conclusiones son mostrados en el Capítulo 4. Los anexos del trabajo contienen las publicaciones desarrolladas.

2. CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En éste capítulo se describe en forma breve el significado y la utilización en forma conjunta de cinco herramientas de ingeniería industrial, tales como gráficos de control, diseño factorial, ingeniería de control, superficies de respuesta y dinámica de sistemas, así como el conocimiento generado al utilizarlas en forma conjunta para solucionar el cumplimiento de las especificaciones de calidad. La validación del sistema propuesto se realizó desarrollando un mundo virtual en dinámica de sistemas, explicando en forma más detallada la base teórica e investigaciones presentadas en el congreso latinoamericano y encuentro colombiano de dinámica de sistemas 2010 en diversos sectores.

2.1 Gráficos de control

Entre las metodologías más difundidas para el aseguramiento y control de la calidad, sobresale el Control Estadístico de Procesos (*CEP*), que en esencia consiste en monitorear la manufactura de los productos para mantener sus mediciones dentro de lo esperado al eliminar o reducir los efectos de variación nocivos a la calidad. Las herramientas más importantes en el *CEP*, son los gráficos de control (*GC*) (Montgomery, 2009). El sistema integral de control dinámico no sólo identifica el momento **“cuando”** se ha presentado un incumplimiento en las especificaciones, sino que propone **“qué hacer”** y **“cómo hacer”** para que se dé el cumplimiento de las especificaciones requeridas. El formato del *SICD* utiliza límites de especificación y zonas de ajustes. Las observaciones registradas son mediciones individuales, y se calcula el impacto en el indicador de capacidad del proceso, sin la necesidad que los datos presenten normalidad.

2.2 Diseño factorial

Diseño experimental que sirve para estudiar el efecto individual y de interacción de varios factores sobre una o varias respuestas (Gutiérrez y De la Vara, 2008). Esta

herramienta es utilizada en el sistema integral de control dinámico, para obtener el modelo estadístico que relaciona las variables en estudio y se utiliza como elemento de proceso. Ver Figura 2.1.

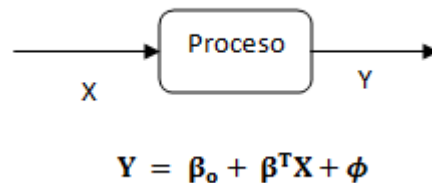


Figura 2.1 Modelo Estadístico $Y = f(x)$

2.3 Ingeniería de control

Sistemas de control dinámicos mediante el principio de la realimentación, para conseguir que las salidas de los mismos se acerquen lo más posible a un comportamiento definido (Bolton, 2001). Así el aspecto importante de un sistema de control es aquél en el que la salida del sistema se controla para tener un valor o cambiarlo, según lo determina la entrada del sistema. Esta herramienta es utilizada para desarrollar el sistema integral de control dinámico avanzado y realizar los ajustes necesarios, cuando la medición registrada no cumple las especificaciones de calidad requeridas. El *SICD* es un sistema de control dinámico de lazo cerrado con realimentación negativa. Ver Figura 2.2.

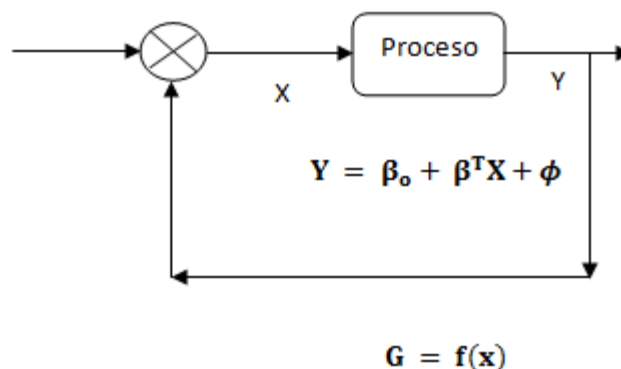


Figura 2.2 Sistema de realimentación negativa

2.4 Superficies de respuesta

Estrategia experimental y de modelación que permiten encontrar condiciones de operación óptima de un proceso. La metodología de superficie de respuesta implica tres aspectos: diseño, modelo y técnica de optimización.

La técnica de optimización por escalamiento ascendente sirve para determinar puntos (tratamientos) por experimentar que están ubicados sobre la dirección de ascenso máximo a partir del centro del diseño inicial.

- a) Se elige el tamaño del incremento o decremento en una de las variables del proceso. En general, se seleccionaría por la variable que tiene el coeficiente de regresión absoluto $|\beta_j|$ más grande.
- b) Los tamaños de incremento de las otras variables es

$$\Delta x_i = \frac{\beta_i}{\left(\frac{\beta_j}{\Delta X_j}\right)} \quad i = 1, 2, \dots, n$$

- c) Se convierten los incrementos o decrementos Δx_i de variables codificadas a variables naturales (Gutiérrez y De la Vara, 2008).

El sistema integral de control dinámico utiliza una adecuación de ésta técnica de optimización, para realizar los ajustes respectivos en la dirección requerida. Una vez calculada la señal de error en el sistema, se distribuye la señal de error en base al factor más significativo y la proporción jerárquica existente entre los demás factores del modelo estadístico.

2.5 Dinámica de sistemas

El pensamiento sistémico tiene la habilidad de ver al mundo como un sistema complejo, en el cual se puede entender que no se puede realizar solamente una cosa, y que todo está conectado a todo. Dinámica de sistemas es un método para aprender de los sistemas complejos, diseñar mejores políticas de operación y guiar cambios en el sistema. La simulación de sistemas dinámicos permite identificar las fuentes de resistencia a las políticas y diseñar más efectivas políticas (Sterman, 2000).

El comportamiento de un sistema se incrementa de su estructura. Esta estructura consiste de bucles de retroalimentación, reservorios y flujos, no linealidad creadas por la interacción de estructuras físicas e institucionales del sistema con un proceso para hacer decisiones de los agentes que intervienen en él. Ver Figura 2.3.

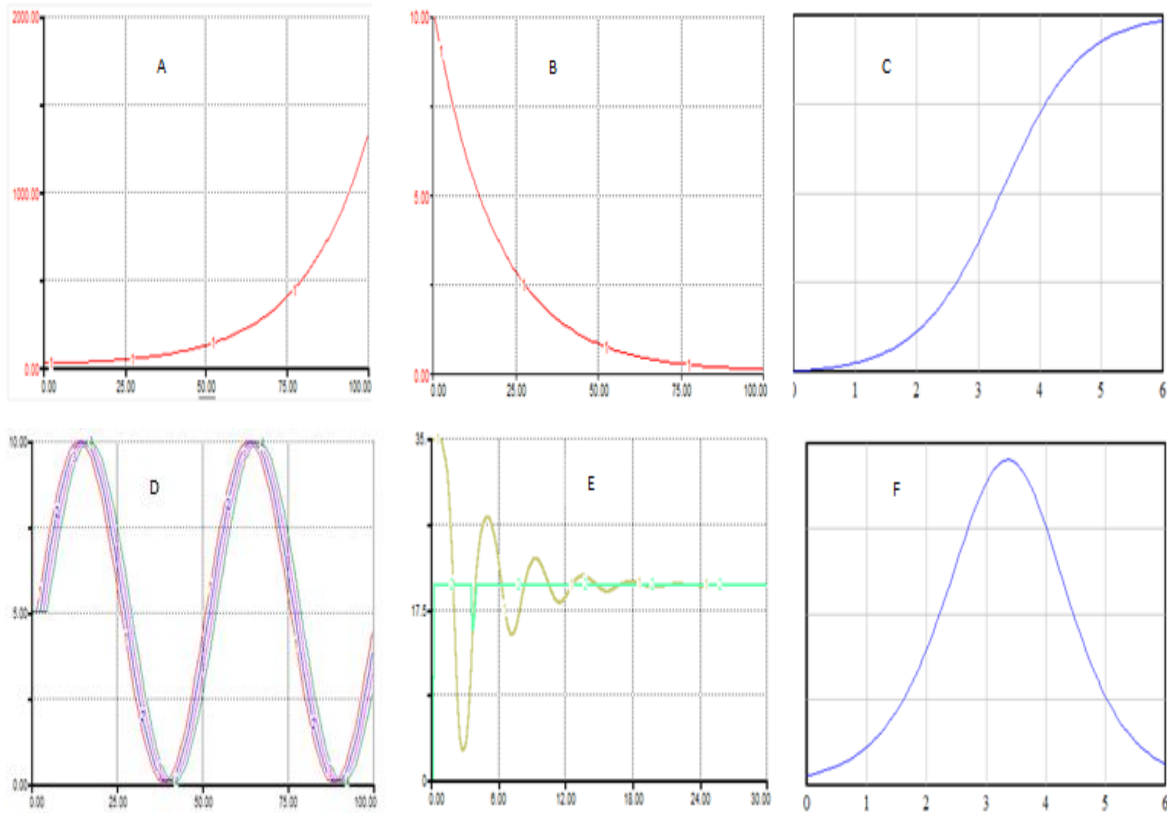


Figura 2.3 Comportamientos básicos en Dinámica de Sistemas. A) Crecimiento exponencial, B) Buscando metas, C) Crecimiento en forma de S, D) Oscilación, E) Crecimiento con sobredisparo y F) Sobredisparo y colapso

Dinámica de sistemas es utilizada para mejorar el proceso de aprendizaje a través de un mundo virtual, utilizando modelos formales, simulaciones o micromundos, en la cual los tomadores de decisiones pueden refrescar su habilidad para tomar decisiones y conducir experimentos. En esta investigación se usa el enfoque de dinámica de sistemas, para entender el comportamiento del modelo estadístico de regresión y de los ajustes realizados para minimizar la señal de error. Finalmente se diseñan políticas adecuadas para el cumplimiento de las especificaciones de calidad requeridas.

La sinergia obtenida al integrar estas herramientas, permitió desarrollar un sistema integral de lazo cerrado con realimentación negativa (*SICD*), en el que se describe la relación causal entre las variables en estudio a través de un diagrama Causal y se valida desarrollando un diagrama de Forrester, en el que los ajustes necesarios son realizados a través de un algoritmo de ajuste, que distribuye en forma jerárquica la señal de error en las variables significativas del modelo, retornando la estabilidad e incrementando la capacidad del proceso, permitiendo diseñar políticas adecuadas en el cumplimiento de las especificaciones.

En la Figura 2.4 se observan las herramientas de ingeniería industrial que dieron forma al sistema integral de control dinámico, propuesta de ésta investigación.

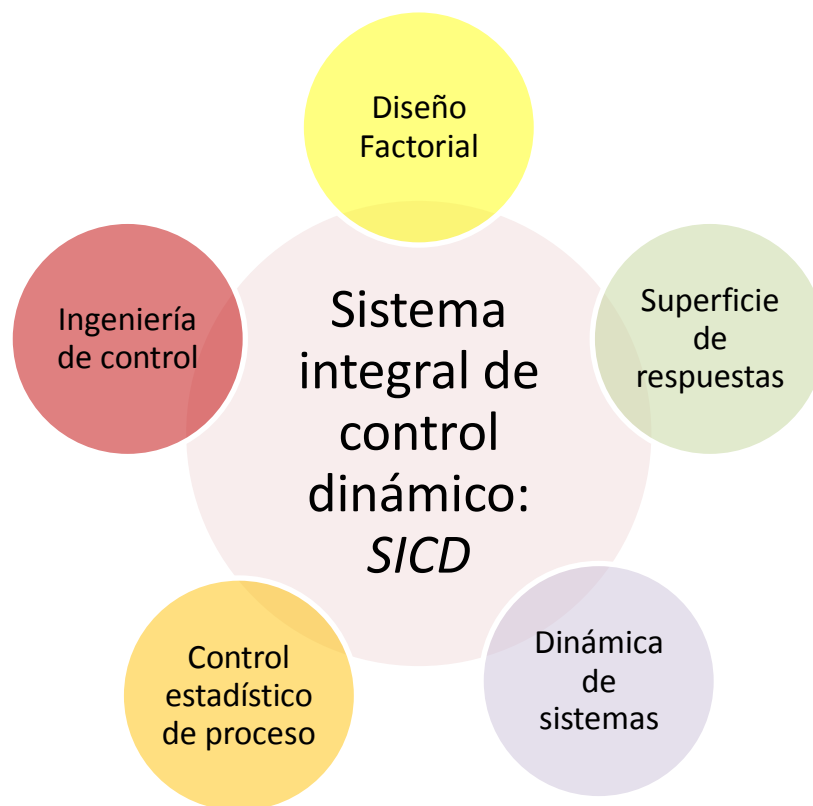


Figura 2.4 Sistema Integral de Control Dinámico

2.6 Fundamento teórico de Dinámica de Sistemas

Un enfoque novedoso en ésta investigación es la validación del *SICD* utilizando un enfoque de dinámica de sistemas. A continuación se describen los conceptos básicos de dinámica de sistemas, tales como la definición de dinámica de sistemas, la importancia de un mundo virtual, la retroalimentación del sistema, desarrollo de diagramas causales, planteamiento de la hipótesis dinámica, variables de estado, la representación matemática y desarrollo de diagramas de Forrester utilizados para el desarrollo del *SICD*.

Dinámica de sistemas es un método para aprender de los sistemas complejos, diseñar mejores políticas de operación y guiar cambios en el sistema. La simulación de sistemas dinámicos permite identificar las fuentes de resistencia a las políticas y diseñar más efectivas políticas. Dinámica de sistemas está soportada en dinámicas no lineales y control de retroalimentación, desarrollado en matemáticas, física e ingeniería.

Requisitos para aprender de un sistema dinámico complejo:

- a) Herramientas para representar modelos mentales de problemas difíciles de la naturaleza.
- b) Modelos formales y métodos de simulación para probar y mejorar los modelos mentales, diseñar nuevas políticas y practicar nuevas herramientas.
- c) Métodos de razonamiento para herramientas científicas, mejorar grupos de proceso y desarrollar rutinas defensivas para individuos y equipos.

2.7 Mundo virtual

Mejorando el proceso de aprendizaje: Virtudes de un mundo virtual

Un mundo virtual utiliza modelos formales, simulaciones o micromundos, en la cual los tomadores de decisiones pueden refrescar su habilidad para tomar decisiones, conducir experimentos y jugar. En los sistemas con complejidad

Capítulo 2. Fundamentos Teóricos

dinámica significativa, la simulación por computadora típicamente es una necesidad, porque la retroalimentación es inmediata, completa y precisa, que permite llevar a cabo una implementación perfecta, basada en una consistencia en la aplicación de reglas de decisión y donde el aprendizaje es el objetivo a alcanzar. Ver Figura 2.5.

Las variables de estado, los flujos y la retroalimentación presente entre las variables en estudio, son los fundamentos teóricos de los sistemas dinámicos.

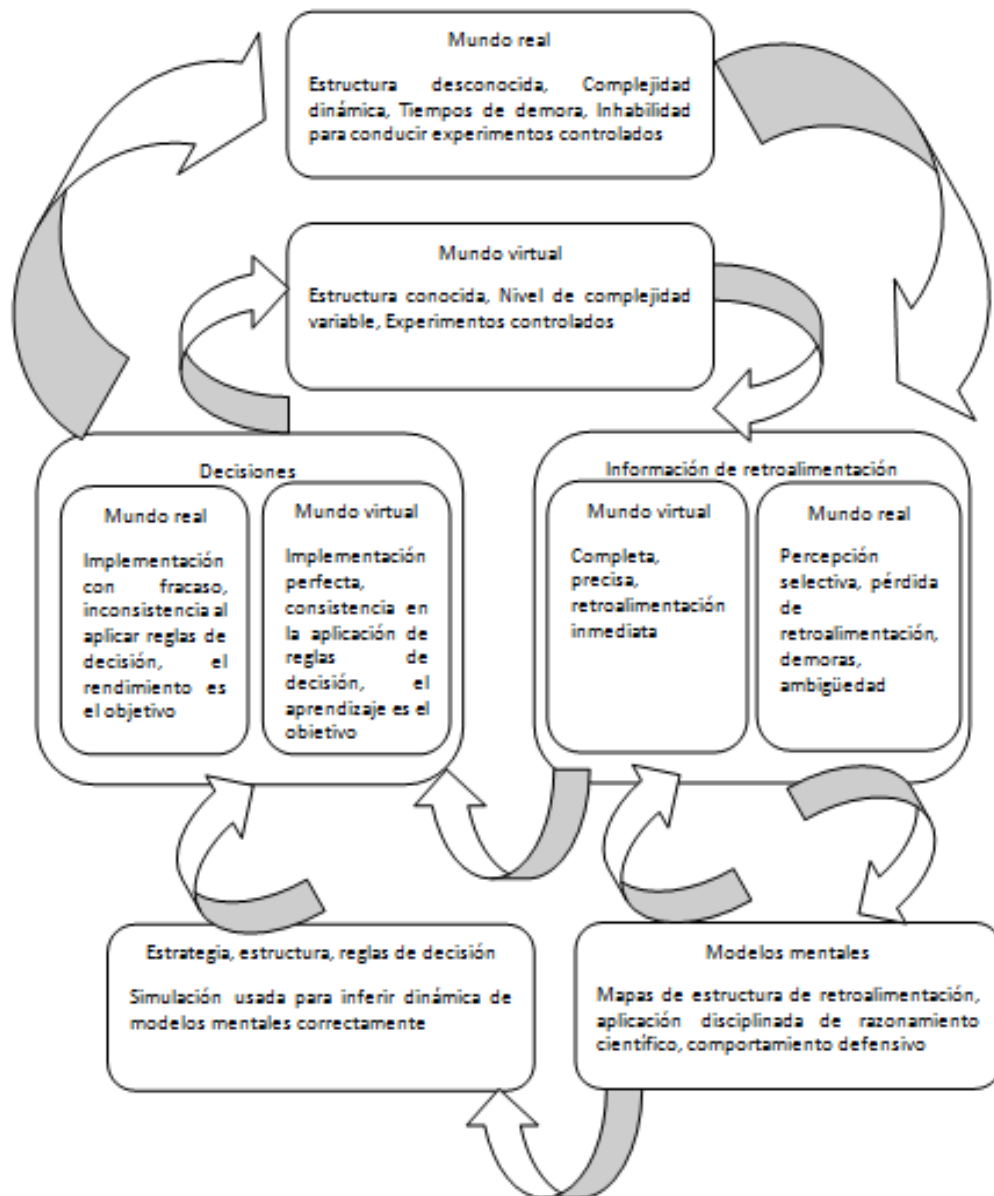


Figura 2.5 Mundo virtual (Sternan, 2000)

En la Figura 2.5 se observan los beneficios de desarrollar un mundo virtual donde el aprendizaje es el objetivo y la interacción presente con el mundo real, donde el rendimiento es el objetivo. Al analizar la interacción de la Figura 2.5 se puede concluir que el aprendizaje es la base para incrementar el rendimiento. Uno de los objetivos de esta investigación, es entender el comportamiento de los ajustes realizados para que se dé el cumplimiento de especificaciones en un mundo virtual, aumentando el rendimiento del porcentaje de calidad del producto final.

2.8 Retroalimentación

Retroalimentación: El arte del modelado de sistemas dinámicos está en descubrir y representar la retroalimentación de los procesos, con reservorios y estructuras de flujo, tiempos de retardos y no linealidades representando la dinámica del sistema. Los comportamientos más complejos usualmente se incrementan por las interacciones (Retroalimentación) de los componentes del sistema y no por la complejidad del número de componentes. La dinámica se incrementa de la interacción de dos tipos de bucles de retroalimentación; bucles positivos (Reforzamiento) y negativos (Balanceo). Los modelos pueden tener miles de bucles de estos dos tipos, en forma conjunta con no linealidades, retardos y acumulaciones. La dinámica de los sistemas se incrementa por las interacciones de las redes de retroalimentación. Cuando múltiples bucles interactúan no es fácil determinar lo que el sistema hará. Usualmente se usa la computación para simular el comportamiento de los modelos.

Bucles de reforzamiento positivo

Crecimiento exponencial. Bucles de retroalimentación positivos generan crecimiento, amplifican desviaciones y refuerza el cambio. Se genera de una retroalimentación positiva (Reforzamiento propio). Entre más grande la cantidad, más grande es el incremento neto, aumentando la cantidad y teniendo un crecimiento más rápido. Ver Figura 2.6.

¿Qué pasa con el crecimiento lineal? El crecimiento lineal actualmente es raro. Crecimiento lineal requiere que no exista retroalimentación del estado del sistema para obtener la tasa de incremento neto, porque el incremento neto proviene de los constantes cambios del estado del sistema. Cuando aparece un crecimiento que parece lineal es casi siempre crecimiento exponencial pero visto con un horizonte de tiempo muy corto para observar la aceleración.

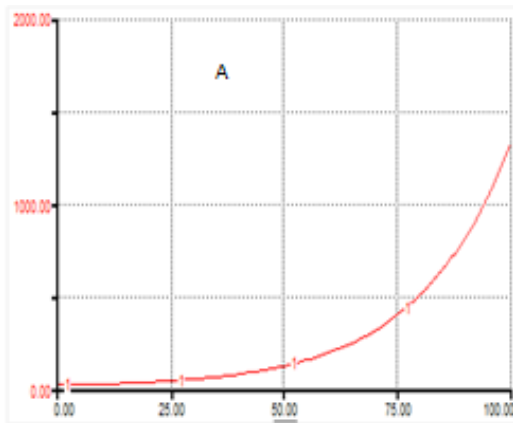


Figura 2.6 A) Comportamiento exponencial y B) Bucles de reforzamiento positivo.

Bucles de balanceo o negativos

Buscando metas. Bucles negativos buscan el balance, equilibrio y estática. Bucles de retroalimentación negativa actúan para traer el estado del sistema en una línea con la meta o estado deseado. Se cuentan las acciones y discrepancias que mueven el estado del sistema en el camino de la meta. Ver Figura 2.7.

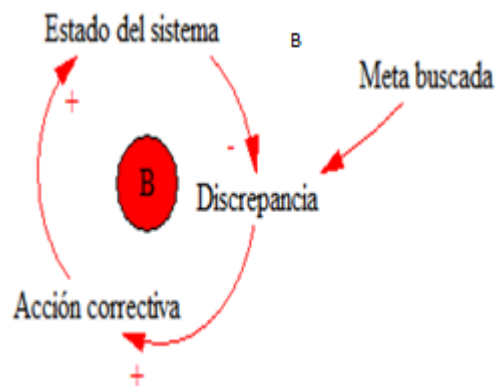
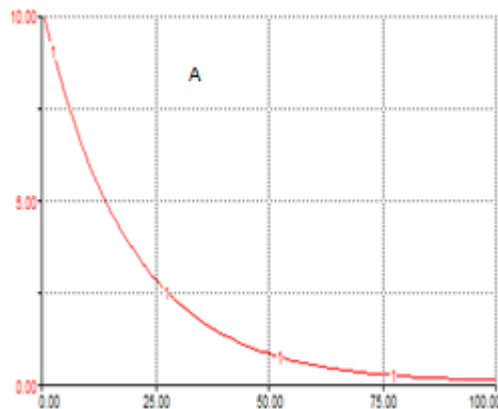


Figura 2.7 A) Comportamiento Buscando metas y B) Bucles de balanceo

Esta investigación utiliza el enfoque de dinámica de sistemas, para analizar el comportamiento de un modelo de regresión lineal. El sistema integral de control dinámico utiliza un modelo de regresión obtenido experimentalmente como elemento de proceso, que relaciona las variables independientes con la variable de respuesta. En el enfoque de dinámica de sistemas se visualiza como un sistema de control con reforzamiento positivo en cada una de sus variables independientes, estimando un comportamiento exponencial, debido al incremento acumulativo en cada una de las variables independientes y su efecto multiplicativo con una tasa de cambio establecida. Ver Figura 2.8.

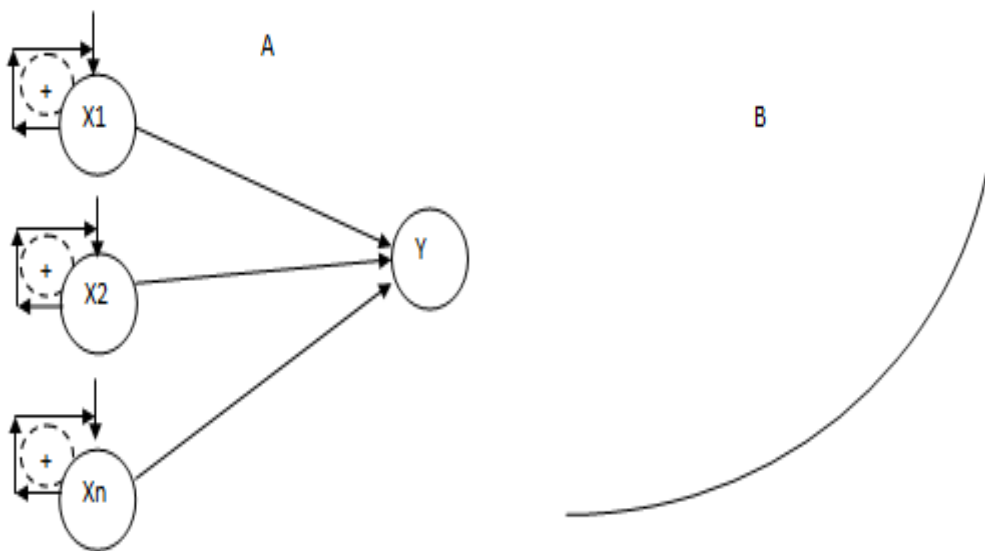


Figura 2.8. A) Diagrama modelo de regresión con retroalimentación positiva y B) Comportamiento crecimiento exponencial

El elemento de proceso está balanceado o restringido al cumplimiento de las especificaciones a través de tres bucles de balanceo, realizando funciones de un elemento de comparación. Un algoritmo de ajuste es propuesto como elemento controlador basado en la técnica de optimización de escalamiento ascendente, el cual tiene un comportamiento de buscando metas en dinámica de sistemas y permite el cumplimiento de las especificaciones por zonas de ajuste. Ver Figura 2.9.

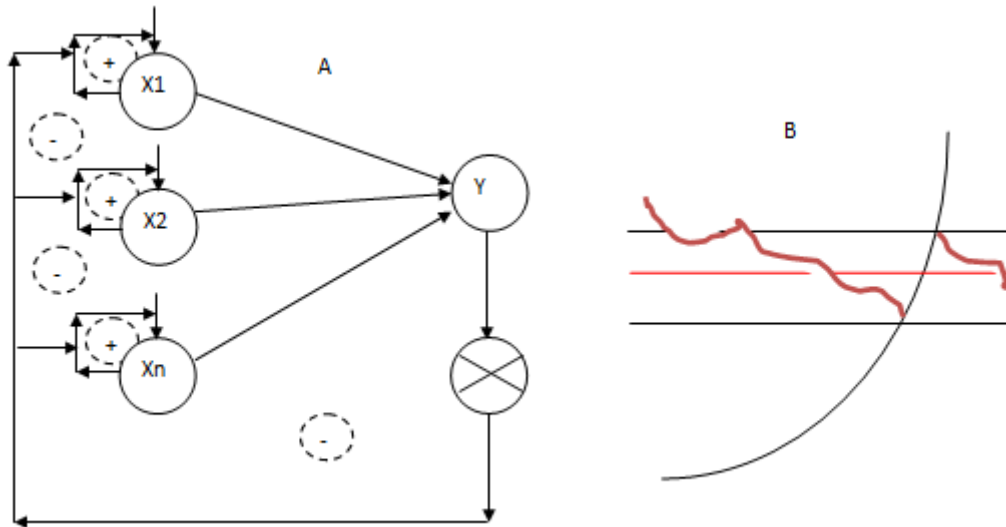


Figura 2.9. A) Modelo de regresión con retroalimentación positiva y negativa, B) Comportamiento crecimiento exponencial y buscando metas

2.9 Diagramas causales

Las atribuciones causales son la falla central de los modelos mentales. Se crean mapas de conocimiento de conexiones causales entre entidades y actores. La heurística que se usa para juzgar relaciones causales lleva a realizar sistemáticamente mapas de conocimiento que ignoran la retroalimentación, interconexiones múltiples, no linealidades, tiempos de retardo y otros elementos de la complejidad dinámica.

Los diagramas de bucles causales son una importante herramienta para representar la estructura de retroalimentación de los sistemas.

Beneficios de los diagramas de bucles causales:

1. Captura en forma rápida las hipótesis acerca de las causas de dinámicas.
2. Capturan los modelos mentales de individuos o equipos.
3. Comunica la importancia de la retroalimentación que se cree responsable para un problema.

Un diagrama causal consiste de variables conectadas por flechas denotando las influencias causales entre las variables. La importancia de los bucles de retroalimentación es identificada en el diagrama. Las variables son relacionadas por vínculos causales, mostrados por flechas. En cada vínculo causal está asignada una polaridad, positiva (+) o negativa (-) para indicar como la variable

Capítulo 2. Fundamentos Teóricos

dependiente cambia cuando hay cambios en las variables independientes. Los bucles importantes son etiquetados por un bucle identificador que muestra si el bucle es positivo (reforzamiento) o negativo (balanceo) de retroalimentación.

Un vínculo positivo significa que si las causas incrementan, los efectos incrementan. Si la causa decrece, el efecto decrece. Un vínculo negativo significa que si las causas incrementan, los efectos decrecen. Si las causas decrecen, los efectos incrementan. Vínculos de polaridad describen la estructura del sistema. Ellos no describen el comportamiento de las variables. Esto es, ellos describen que pasaría si hubiera un cambio. No describen lo que actualmente pasa.

A continuación se muestran investigaciones presentada en el congreso latinoamericano y encuentro colombiano de dinámica de sistemas 2010 en diversos sectores industriales y de servicio, tales como gestión y política pública, educación, micromundos de aprendizaje, aplicaciones industriales, logística y productividad, economía, sociedad, salud y energía.

Osorio et al. (2010) desarrolló un modelo de simulación enfocado en evaluar proyectos de inversión pública municipal. El diagrama causal se observa en la Figura 2.10.

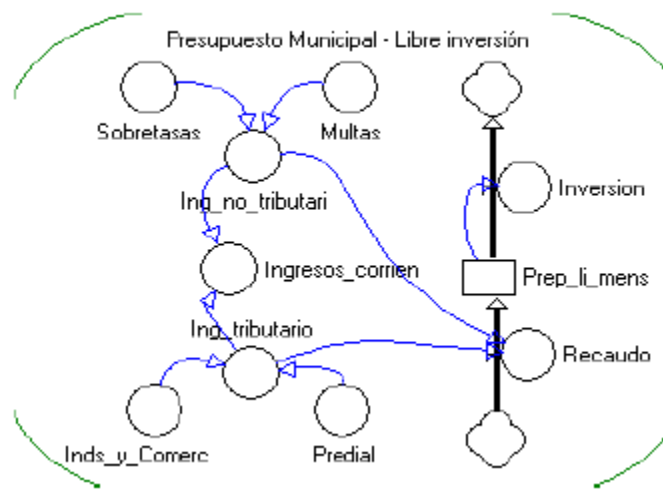


Figura 2.10. Diagrama causal proyectos de inversión pública. Osorio (2010)

Díaz (2010) presentó un modelo conceptual de la producción de conocimiento científico. El diagrama causal se observa en la Figura 2.11 y está formado por tres bucles de balanceo y dos bucles de reforzamiento.



Figura 2.11. Modelo conceptual de producción de conocimiento. Díaz (2010)

Andrade et al. (2010) expone una alternativa para expandir la funcionalidad del diagrama de influencias en Dinámica de Sistemas mediante una estrategia que haga viable la generación y aplicación de sistemas de inferencia difusa para procesar información imprecisa con propósitos de intervención cuantitativa sobre el fenómeno modelado. El diagrama causal se observa en la Figura 2.12.

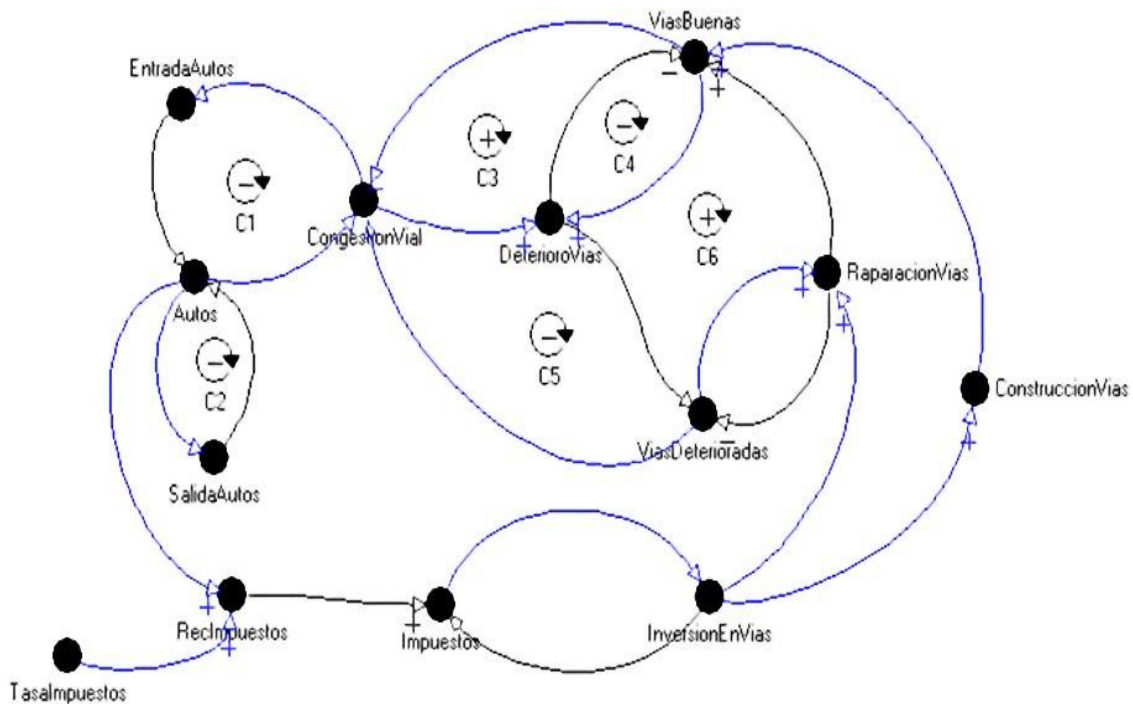


Figura 2.12. Diagrama causal inferencia difusa. Andrade (2010)

En el diagrama causal de la Figura 2.12 se muestra la retroalimentación del problema en estudio, en el cual intervienen cuatro bucles de balanceo y cuatro bucles de reforzamiento positivo.

Rubiano et al. (2010) propone una estrategia metodológica sistémica para el proceso de planeación y desarrollo de la Formación Profesional Integral, es decir, caracterizar el punto de apalancamiento para la optimización de su cadena de valor. El diagrama causal se observa en la Figura 2.13

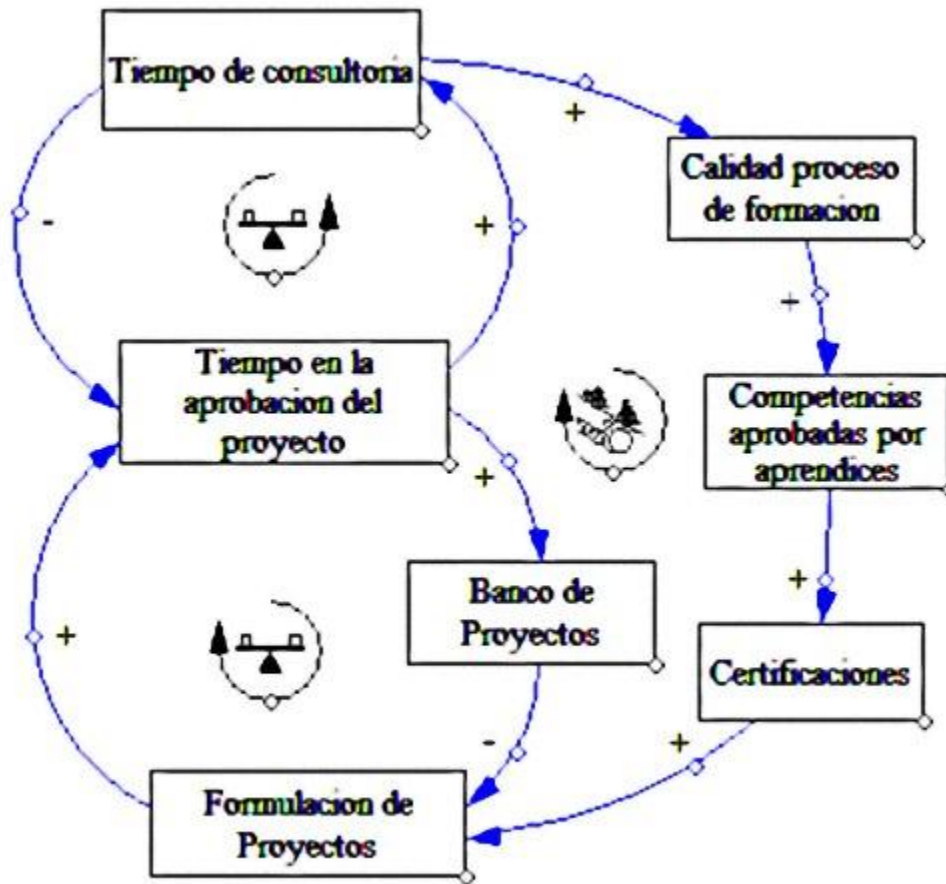


Figura 2.13. Diagrama causal proceso de planeación. Rubiano (2010)

En el diagrama causal existe la presencia de dos bucles de balanceo y un bucle de reforzamiento.

Buendía (2010) sugiere que las herramientas de Dinámica de Sistemas y teoría de urnas se pueden usar para modelar el comportamiento de los mercados auto organizativo. Ver Figura 2.14.

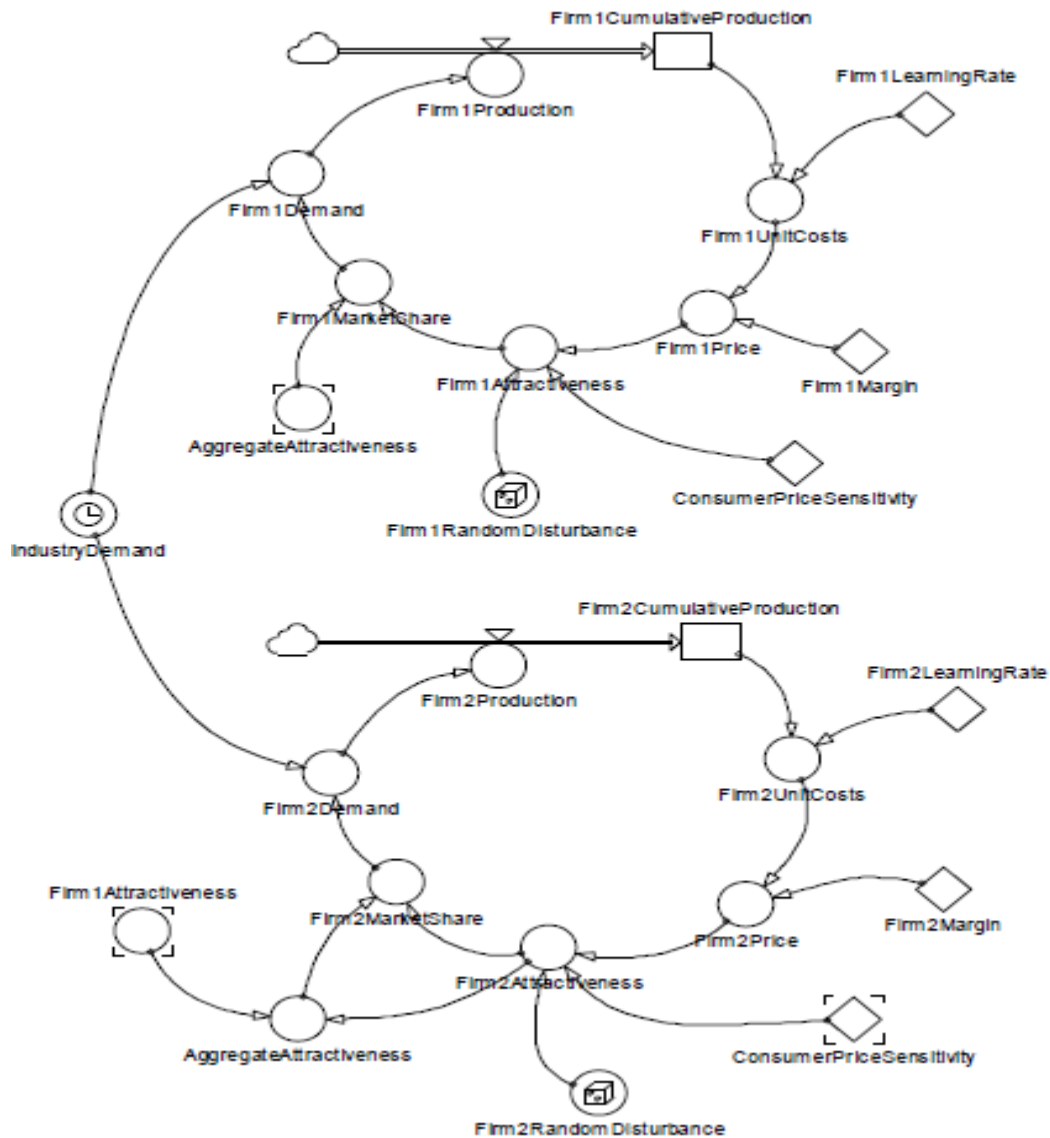


Figura 2.14. Diagrama causal comportamiento de mercados. Buendía (2010)

Capítulo 2. Fundamentos Teóricos

Maimbil et al. (2010) presenta la interrelación de dos dinámicas mutuamente dependientes: la que determina la superficie construida y la que determina la formación del precio por metro cuadrado construido. Ver Figura 2.15.

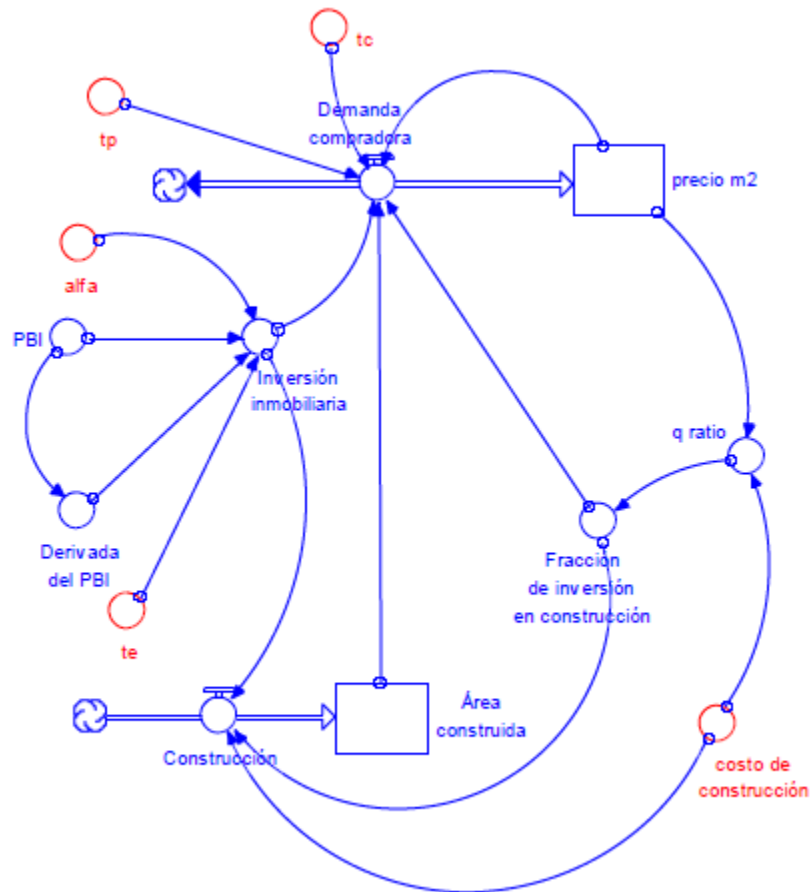


Figura 2.15. Diagrama causal dinámicas mutuamente dependientes. Maimbil (2010)

Restrepo et al. (2010) analiza el impacto en la cadena de azúcar en Colombia con la introducción al mercado del etanol generado a partir de la caña de azúcar. Ver Figura 2.16.

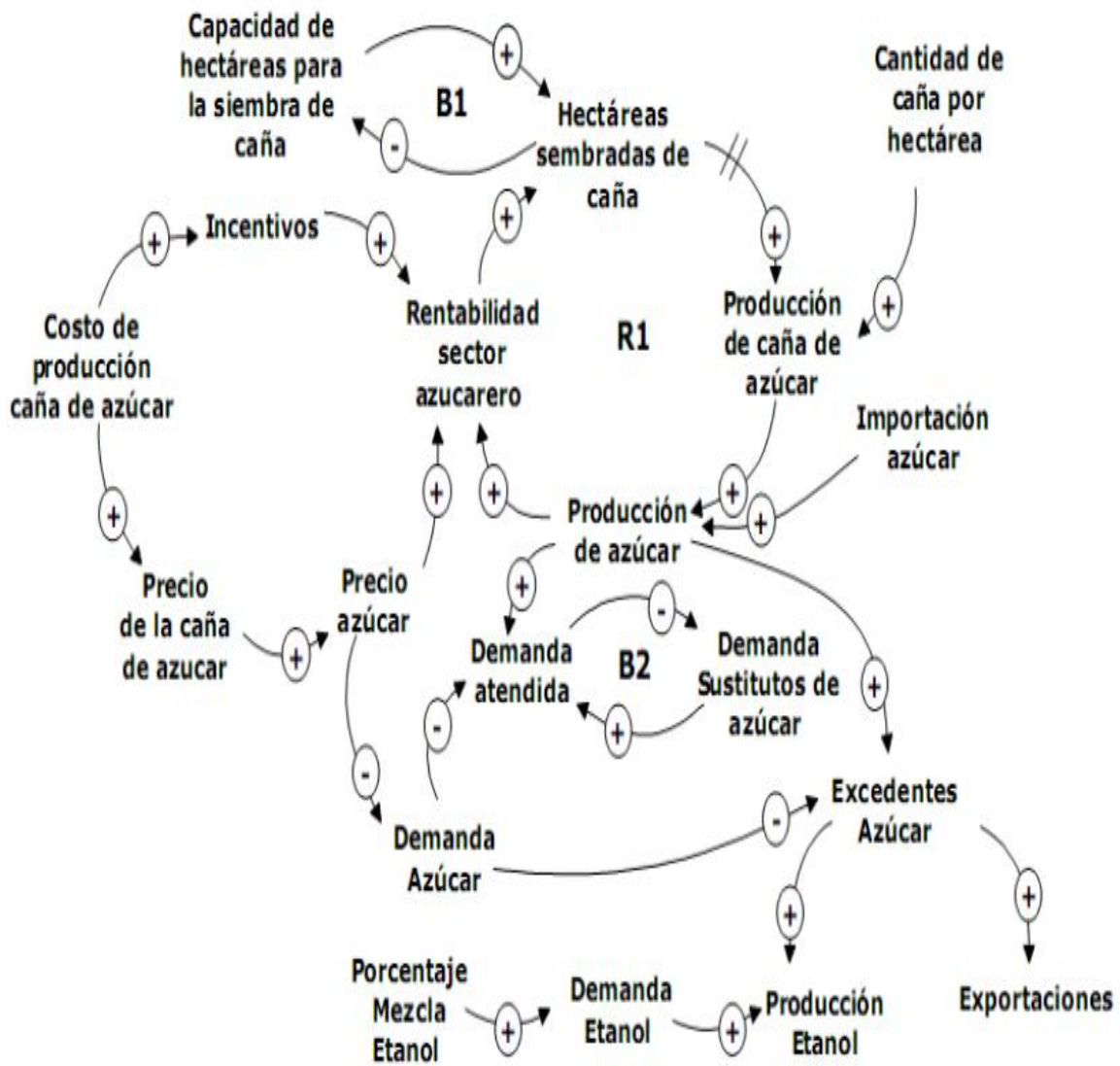


Figura 2.16. Diagrama causal cadena de azúcar. Restrepo (2010)

En el diagrama causal de la Figura 2.16 se observa la presencia de dos bucles de balanceo y un bucle de reforzamiento, interaccionando con variables auxiliares.

Ramírez et al. (2010) presenta un modelo de simulación de la cadena de abastecimiento de baterías eléctricas de la empresa Tronex S.A. en presencia de bucles de balanceo. Ver Figura 2.17.

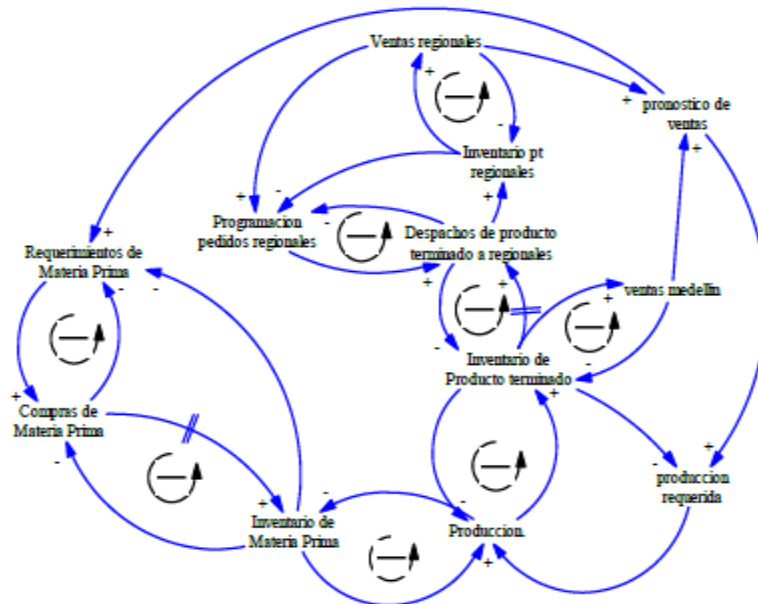


Figura 2.17. Diagrama causal cadena abastecimiento baterías eléctricas. Ramírez (2010)

Ceballos et al. (2010) muestra la falta de análisis holístico que involucra a la zona en la que la tecnología energética debe ser aplicada y propone un acercamiento metodológico a la manera como deben analizarse dichos problemas, utilizando un bucle de reforzamiento positivo. Ver Figura 2.18



Figura 2.18. Diagrama causal tecnología energética. Ceballos (2010)

Capítulo 2. Fundamentos Teóricos

Posada et al. (2010) explora las causas de la problemática desde el componente del acceso económico a los alimentos; estudiando, evaluando y proponiendo, desde un enfoque sistémico y por medio del uso de la Dinámica de Sistemas. En la Figura 2.20 se observa la presencia de cuatro bucles de reforzamiento positivo y dos bucles de balanceo.

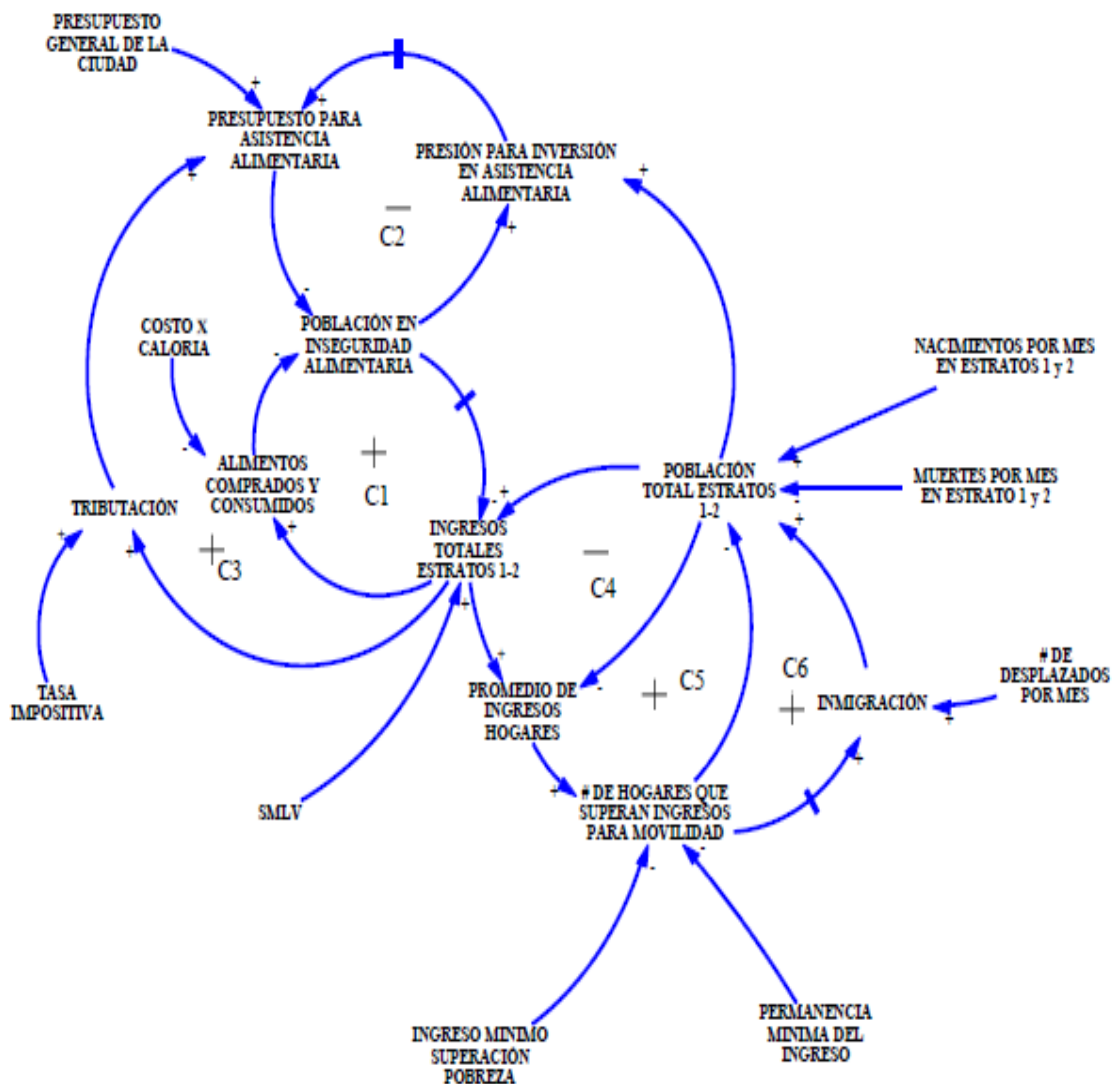


Figura 2.20. Diagrama causal acceso económico a los alimentos. Posada (2010)

Capítulo 2. Fundamentos Teóricos

Becerra et al. (2010) describe, analiza y compara el uso de la Dinámica de Sistemas como metodología para la solución de problemas de configuración de rutinas de dieta alimenticia y desarrollo de ejercicio físico monitoreado. Ver Figura 2.21.

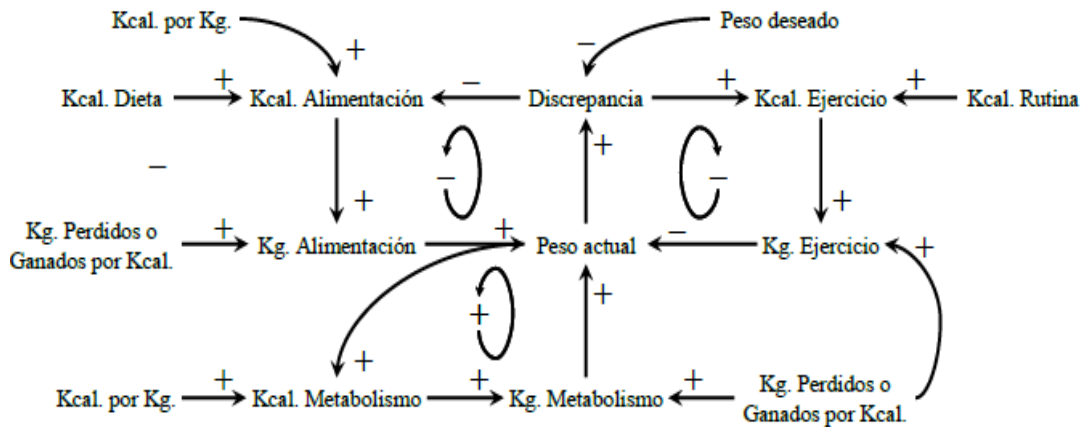


Figura 2.21. Diagrama causal rutinas de dieta alimenticia

Cárdenas et al. (2010) estudia el mercado de carbono de la Unión Europea y sus implicaciones sobre el sector energético a través del modelo en Dinámica de Sistemas. Ver Figura 2.22.

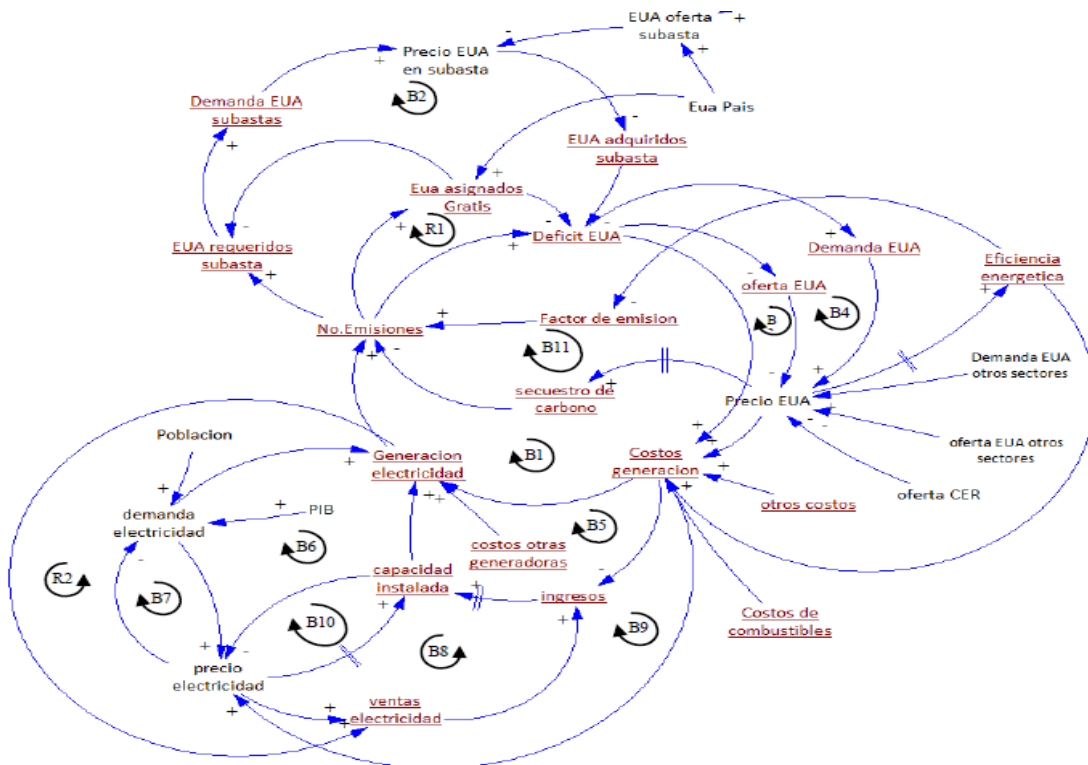


Figura 2.22. Diagrama causal rutinas dietas alimenticias

En ésta investigación se utiliza el enfoque de dinámica de sistemas como un novedoso proceso de control, demostrando la relación existente entre las variables de un modelo de regresión lineal, con la construcción de un diagrama causal dando origen a la hipótesis dinámica y validación del sistema propuesto en un diagrama de Forrester.

2.10 Hipótesis dinámica

Hipótesis dinámica es la descripción completa de la estructura de retroalimentación del modelo.

La hipótesis dinámica explica y demuestra la causalidad y el comportamiento entre las variables en estudio del sistema integral de control dinámico. En el diagrama causal propuesto en esta investigación (Figura 2.23), se observa que las variables independientes del elemento de proceso actúan de manera positiva en la variable dependiente, es decir si el valor asignado en las variables independientes aumenta, el valor obtenido en la variable dependiente aumenta, de manera contraria, si los valores en las variables independientes disminuyen, el valor predicho en la variable dependiente disminuye. Para realizar la simulación del modelo, los cambios en cada una de las variables independientes es desarrollado a través de bucles de reforzamiento positivo, utilizando variables de flujo para cada una y variables auxiliares denominadas tasas de cambio. Las tasas de cambio alteran el comportamiento del modelo de regresión. Existe la presencia de tres bucles de reforzamiento positivo

Cada una de las mediciones simuladas se registra en el elemento de medición y son evaluadas en el elemento de comparación, con un valor nominal establecido y en caso de no cumplir con las especificaciones, se hace el ajuste respectivo, a través de un algoritmo de ajuste que funge como elemento controlador en bucles de balanceo o negativos. Para lograr esto se calcula la señal de error. Existe un bucle de balanceo para cada ajuste y se determina la fase para cada uno. En total existen tres bucles de balanceo. El diagrama causal de la Figura 2.23 muestra la

interacción entre los bucles de reforzamiento positivos y los bucles de balanceo, permitiendo encontrar un comportamiento dinámico exponencial, que sigue una distribución exponencial, para la variable de respuesta y un comportamiento básico de buscando metas por fases, para la curva de transición en el cumplimiento de las especificaciones. La estructura de la retroalimentación presente a través de bucles de reforzamiento positivos y bucles de balanceo, permite identificar un comportamiento no lineal, que difiere del comportamiento lineal asumido de los modelos de regresión lineal.

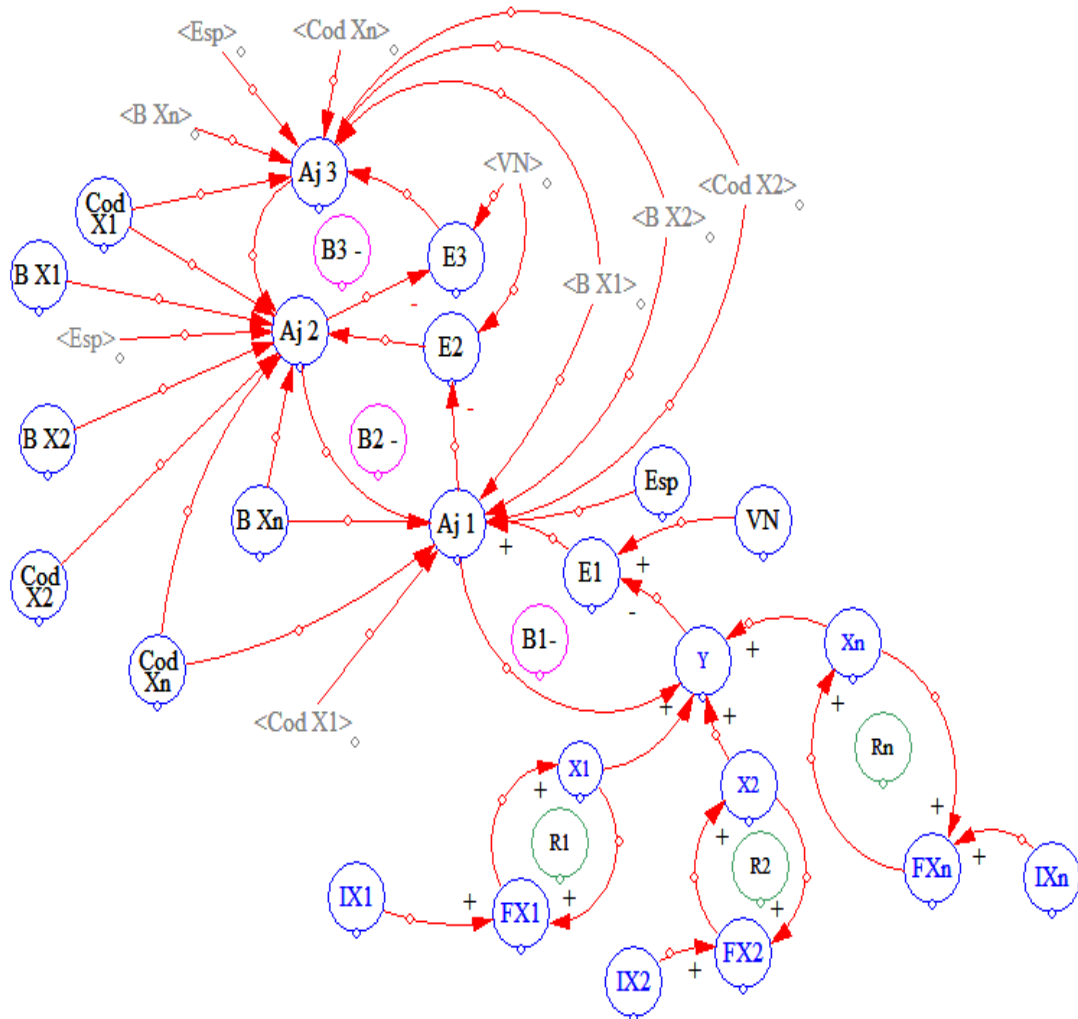


Figura 2.23. Hipótesis dinámica del Sistema Integral de Control Dinámico

Los elementos del diagrama causal son:

- i. Variables independientes (Factores significativos): **X**
- ii. Variables de flujo: Fx_i
- iii. Tasas de cambio: Ix_i
- iv. Variable de respuesta: **Y**
- v. Señal de error: **E**
- vi. Valor nominal: VN
- vii. Ajuste 1: $Aj\ 1$
- viii. Ajuste 2: $Aj\ 2$
- ix. Ajuste 3: $Aj\ 3$
- x. Especificaciones: Esp
- xi. Coeficiente X1: $B\ X1$
- xii. Coeficiente X2: $B\ X2$
- xiii. Coeficiente Xn: $B\ Xn$
- xiv. Codificación X1: $Cod\ X1$
- xv. Codificación X2: $Cod\ X2$
- xvi. Codificación X3: $Cod\ X3$

Con el diagrama causal de la Figura 2.23 planteado como hipótesis dinámica y la interacción existente entre tres bucles de reforzamiento positivo y tres bucles de balanceo, es necesaria la realización de un diagrama de Forrester para entender el comportamiento del sistema en estudio.

2.11 Variables de estado

Las variables de estado o reservorios y los flujos, están basados en la metáfora hidráulica del flujo de agua que entra y sale del reservorio. Ver Figura 2.24.

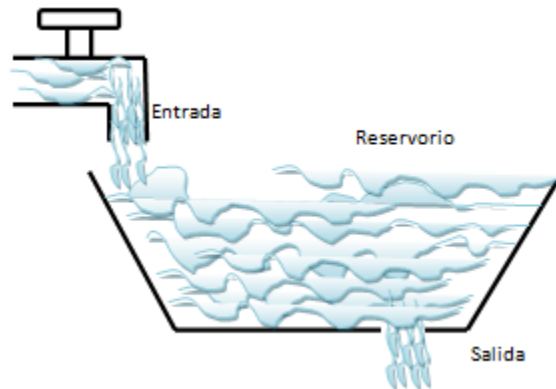


Figura 2.24. Metáfora Hidráulica

Los reservorios son acumulaciones. Ellos caracterizan el estado del sistema y generan la información en las cuales las decisiones y acciones son basadas. Los reservorios dan al sistema inercia y proveen a ellos con memoria. Los reservorios crean retardos por acumular la diferencia entre la entrada del flujo a un proceso y la salida de flujo. Para desagregar las tasas de flujos y almacenes son la fuente de desequilibrio en dinámica de sistemas.

Notación para diagramación de flujos y almacenes. Ver Figura 2.25.

1. Almacenes, reservorios o niveles son representados por rectángulos.
2. Flujos de entrada son representados por válvulas con un punto dentro del almacén.
3. Flujos de salida son representados por válvulas con un punto fuera del almacén.
4. Las válvulas son representadas por triángulos que controlan los flujos.
5. Las nubes representan las fuentes para los flujos. Una fuente representa el almacén del cual se origina el flujo fuera de los límites de donde nace el modelo. Una fuente representa el almacén en el cual el flujo se va drenando de los límites del modelo.

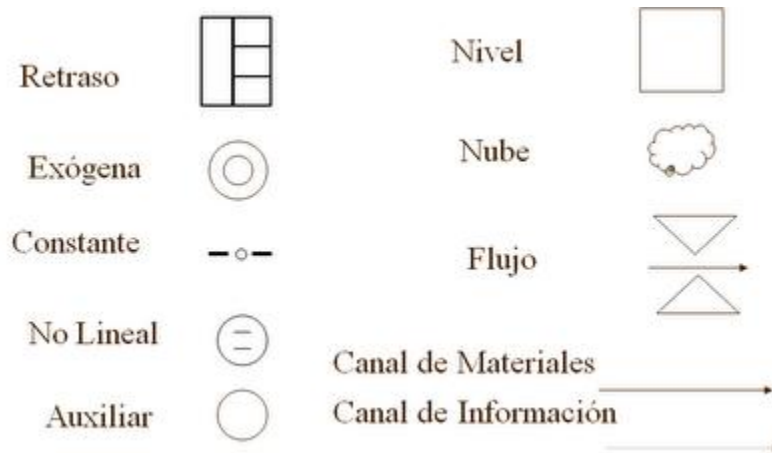


Figura 2.25. Elementos diagrama de Forrester

2.12 Representación matemática

Representación matemática de flujos y almacenes. Las convenciones para el diagrama de almacenes y flujos fueron basadas en la metáfora hidráulica del flujo de agua dentro y fuera de reservaciones. Es de mucha ayuda pensar a los almacenes como una bañera de agua. La cantidad de agua de la llave menos el flujo de agua por el drenaje. (Asumiendo no exista evaporación ni derrames). Exactamente en el mismo camino, la cantidad de material en cualquiera de los almacenes es la acumulación de los flujos de material dentro menos el flujo de material fuera. Los almacenes acumulan o integran sus flujos, el flujo neto dentro del almacén es la tasa de cambio en el almacén. La estructura representada en la Figura 2.24 corresponde exactamente con la ecuación integral 1.

La representación matemática de cada reservorio es a través de ecuaciones integrales. Las variables de estado acumulan o integran sus flujos. El flujo neto dentro de la variable de estado es la tasa de cambio de la variable de estado. Ver Ecuación 1 y Ecuación 2. (Sterman, 2000)

$$\psi(t) = \int_{t_0}^t [\phi_e(s) - \phi_s(s)] ds + \psi(t_0) \quad (1)$$

Ecuación 1. Tasa de cambio

Donde:

$\phi_e = \text{Flujo de entrada}$

$\phi_s = \text{Flujo de salida}$

$\psi = \text{Reservorio}$

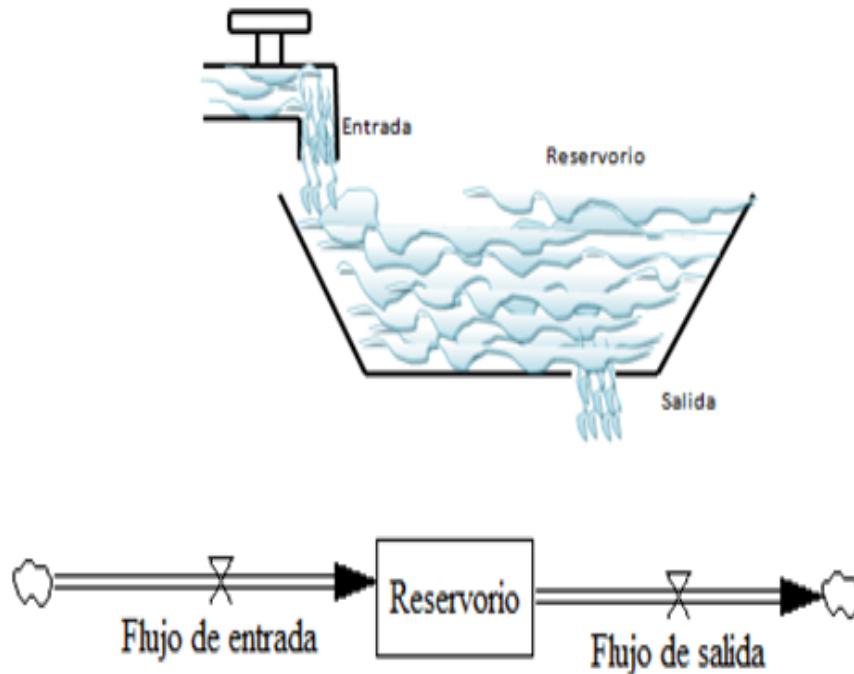
$\phi_e (s)$ representa el valor del flujo de entrada en cualquier tiempo s entre el tiempo inicial t_0 y el tiempo presente t . Equivalentemente la tasa neta de cambio de cualquier reservorio es su derivada, es el flujo de entrada menos el flujo de salida, definida por la Ecuación 2. (Sterman, 2000)

$$d(\psi)/dt = \phi_e (t) - \phi_s(t) \quad (2)$$

Ecuación 2. Tasa neta de cambio

En general los flujos son funciones de los reservorios y otras variables de estado o parámetros.

Los reservorios acumulan los cambios pasados realizados en cada variable independiente y representan fuentes de demora. Las acciones correctivas o los incrementos en las variables independientes sufren una demora para poder realizarse, ya que los ajustes no pueden ser en forma instantánea y requiere de un tiempo para llevarse a cabo. Las acumulaciones y las demoras crean el desequilibrio dinámico, que permite realizar la transformación del modelo de regresión lineal predictivo a un modelo de regresión no lineal explicativo. Ver Figura 2.26.



Ecuación integral

$$\text{Reservorio}(t) = \int_{t_0}^t [\text{Flujo de entrada}(s) - \text{Flujo de salida}(s)] ds + \text{Reservorio}(t_0)$$

Ecuación diferencial

$$\frac{d(\text{Reservorio})}{dt} = \text{Cambio neto en reservorio} = \text{Flujo de entrada}(t) - \text{Flujo de salida}(t)$$

Figura 2.26. Modelación Matemática de la Metáfora Hidráulica (Sterman, 2000)

Las unidades utilizadas en los reservorios son las mismas a utilizar en los flujos de entrada y de salida, solo que por cierto periodo de tiempo.

La comparación de conceptos entre la regresión lineal y el enfoque dinámico se observan en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Comparación de conceptos

Modelo de regresión lineal	Simbología	=	Dinámica de sistemas	Simbología
Factores significativos	X	=	Variables de estado	X
Variable de respuesta	Y	=	Variable auxiliar de respuesta	Y
Coefficientes de los factores significativos	β	=	Variable auxiliar coeficientes de los factores	β
Ordenada al origen del plano de regresión	β_0	=	Ordenada al origen del plano de regresión	β_0
			Variables de flujo	Fx_i
			Tasas de cambio en las variables de flujo	Ix_i
			Señal de error	E
			Valor nominal	VM

2.13 Diagrama de Forrester

Una vez planteada la hipótesis dinámica en un diagrama causal, se hace la construcción del diagrama de Forrester para realizar las simulaciones dinámicas. Cada una de las variables independientes del modelo de regresión lineal, corresponde a una variable de estado o reservorio en un diagrama de Forrester. Ver Figura 2.27.

En ellas se acumula el crecimiento a realizar en cada una de las variables, lo cual genera el desequilibrio dinámico del sistema, transformando el comportamiento lineal del modelo de regresión, a un modelo no lineal con crecimiento exponencial. Los flujos están determinados por la tasa de cambio establecida para cada variable independiente y la acción correctiva a realizar por el elemento controlador para obtener las especificaciones de calidad requeridas.

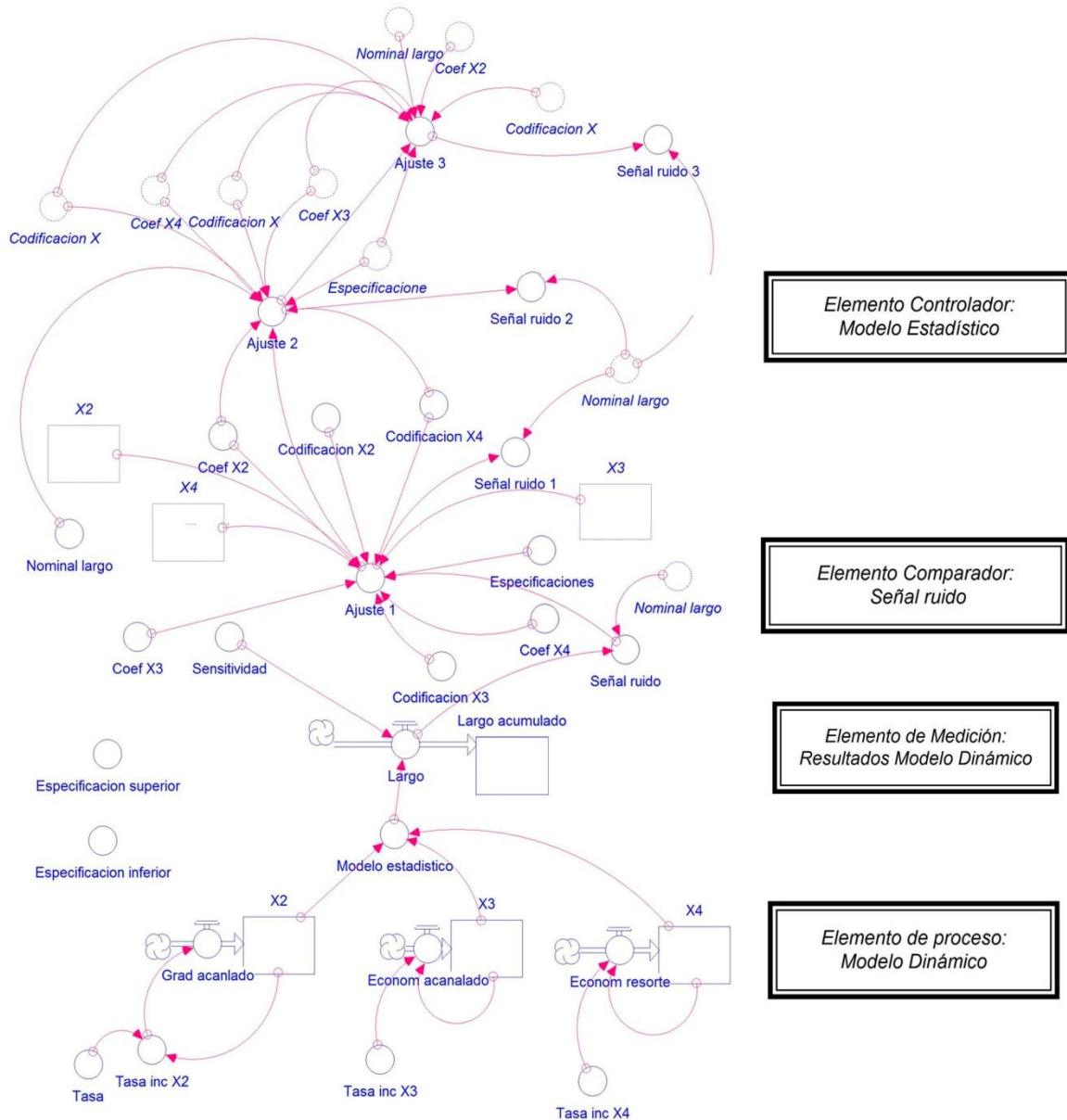


Figura 2.27. Diagrama de Forrester Sistema Integral de Control Dinámico

El comportamiento de la transformación de la variable de respuesta, a la curva que cumple las especificaciones es realizada a través de bucles de balanceo, utilizando un algoritmo de ajuste, que distribuye en forma jerárquica la señal de error, en las variables de estado del sistema y obteniendo un comportamiento no básico de dinámica de sistemas.

A continuación se muestra el desarrollo dinámico del modelo de regresión lineal Y_2 , obtenido experimentalmente. De la misma manera se puede desarrollar el sistema integral de control dinámico para cualquier modelo estadístico. Las variables de estado están formuladas a través de la Ecuación 3, Ecuación 4 y Ecuación 5.

$$\mathbf{X}_2(t) = \int_{t_0}^t [\text{Grad acanalado}(s) - X_2(s)] ds + X_2(t_0) \quad (3)$$

Ecuación 3. Factor X2

$$\mathbf{X}_3(t) = \int_{t_0}^t [\text{Econom acanalado}(s) - X_3(s)] ds + X_3(t_0) \quad (4)$$

Ecuación 4. Factor X3

$$\mathbf{X}_4(t) = \int_{t_0}^t [\text{Econom resorte}(s) - X_4(s)] ds + X_4(t_0) \quad (5)$$

Ecuación 5. Factor X4

Donde los flujos de los Factores \mathbf{X}_2 , \mathbf{X}_3 y \mathbf{X}_4 se calculan a través de la Ecuación 6, Ecuación 7 y Ecuación 8.

$$\text{Grad acanalado} = \frac{d(X_2)}{d_t} = \omega_2 \left(\frac{dX_2}{X_2} \right) \quad (6)$$

Ecuación 6. Ecuación Diferencial Grad acanalado

$$\text{Econom acanalado} = \frac{d(X_3)}{d_t} = \omega_3 \left(\frac{dX_3}{X_3} \right) \quad (7)$$

Ecuación 7. Ecuación Diferencial Econom acanalado

$$\text{Econom resorte} = \frac{d(X_4)}{d_t} = \omega_4 \left(\frac{dX_4}{X_4} \right) \quad (8)$$

Ecuación 8. Ecuación Diferencial Econom resorte

Donde:

Capítulo 2. Fundamentos Teóricos

$\omega_2 = \text{Tasa inc } X_2$

$\omega_3 = \text{Tasa inc } X_3$

$\omega_4 = \text{Tasa inc } X_4$

$dX_2 = \text{Discrepancia } X_2$

$dX_3 = \text{Discrepancia } X_3$

$dX_4 = \text{Discrepancia } X_4$

3. CAPÍTULO 3: PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN

En este capítulo se explica el procedimiento de investigación y se detalla ampliamente el algoritmo de ajuste desarrollado en esta investigación, basado en la técnica de optimización por escalonamiento ascendente y se muestra el sistema de lazo cerrado con realimentación negativa propuesto para que se dé el cumplimiento de las especificaciones de calidad.

El *SICD* propuesto en esta investigación, permite realizar el control de la calidad de la producción durante el proceso, entendiendo la relación existente entre las variables independientes X y la variable aleatoria Y que representa la característica de calidad C , explicándola a través de un modelo de regresión. Habitualmente en los modelos de regresión se usa a la variable X como predictora de Y , lo que implica que dada X se obtiene Y . En el *SICD* se actúa de forma contraria, es decir, dada Y se obtiene X (regresión inversa); esto permite determinar los ajustes necesarios en X dada una medición de Y que no cumple las especificaciones requeridas, lo cual permite explicar el “*qué y cómo hacer*” para realizar los ajustes necesarios y retornar el control de la calidad de la producción en el proceso. De este modo es posible calcular la señal de error en relación a las especificaciones.

Los elementos del *SICD* (Figura 3.1), son: elemento de proceso (*EP*), elemento de medición (*EM*), elemento de comparación (*ECM*) y elemento controlador (*EC*).

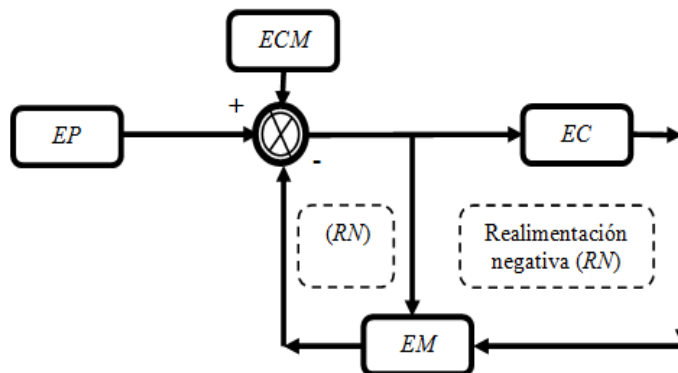


Figura 3.1. SICD de Lazo Cerrado con Realimentación Negativa

3.1 Elemento de Proceso (EP)

Asumiendo que para una característica de calidad, representada por la variable aleatoria Y , habrá un modelo de regresión lineal múltiple con x_k variables independientes, expresado en la forma de la Ecuación 9, que explique la relación existente entre ellas.

$$Y = \beta_0 + \beta^T X + \phi \quad (9)$$

Ecuación 9. Modelo de Regresión Lineal

Donde:

$$\beta = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k]^T; \mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_k]^T$$

Entonces es posible asignar al modelo el elemento *EP* de la Figura 3.1.

3.2 Elemento de comparación (ECM)

El *ECM* calcula y procesa a la señal de error (ϕ) a través de la Ecuación 10. Para esto se utilizan las n mediciones de la retroalimentación negativa (*RM*) del sistema y son comparadas con el valor nominal VN^1 de las especificaciones de calidad. Si $\rho_1 = LSE - VN$ y $\rho_2 = VN - LIE$, entonces el ajuste se presenta cuando ϕ_i es mayor a la tolerancia especificada (ρ), o bien $\phi_i > \rho_1$ ó $\phi_i > \rho_2$. Se produce en consecuencia la i -ésima señal de error indicada por la Ecuación 10.

$$\phi_i = VN - RN_i \text{ para } i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

Ecuación 10. Señal de error

3.3 Elemento Controlador (EC)

Para obtener el elemento controlador es necesario entender la relación entre las variables de operación y la característica de calidad de interés Y . Por lo que es

¹ $VN = (LSE + LIE) / 2$

necesario obtener un diseño de regresión que explique dicha relación. Ver Ecuación 9.

Como los valores \mathbf{X} son parámetros de operación, habrá combinaciones en \mathbf{X} que provocarán valores en \mathbf{Y} fuera de especificaciones y otros valores en \mathbf{X} que cumplan con las especificaciones en \mathbf{Y} . De este modo y por regresión inversa, para los casos donde $\phi_i > \rho_1$ ó $\phi_i > \rho_2$, ajustes en la máquina pueden ser realizados, siempre y cuando se tenga la regla de impacto de los factores \mathbf{X} . La regresión inversa implica despejar \mathbf{X} de la Ecuación 9, para obtener la Ecuación 11.

$$\mathbf{X} = \frac{\mathbf{Y} - \beta_0 - \phi}{\beta^T} \quad (11)$$

Ecuación 11. Regresión inversa

Dado que en la Ecuación 11 se tiene un escalar en el numerador y un vector en el denominador, es complejo encontrar los valores de los parámetros de operación \mathbf{X} correspondientes. Por tal razón es necesario encontrar un vector \mathbf{G} con variables de compensación que pueda estimar los ajustes necesarios en \mathbf{X} , que esté en función de la señal de error ϕ , tal como se señala en la Ecuación 12 y como lo indica la Ecuación 11.

$$\mathbf{G} = f(\phi) \quad (12)$$

Ecuación 12. Vector de compensación

Empleando una adaptación de **la técnica de escalamiento ascendente de superficies de respuesta** (Montgomery, 2001) se determinan los incrementos o decrementos necesarios del vector \mathbf{G} que representa a la variable de compensación, para realizar los ajustes respectivos de los factores significativos \mathbf{X} , a través de la función de la señal de error.

La técnica de escalamiento ascendente para encontrar los incrementos o decrementos es el siguiente:

Capítulo 3. Procedimiento de Investigación

- a) Se elige el tamaño del incremento o decremento en una de las variables del proceso. En general, se seleccionaría por la variable que tiene el coeficiente de regresión absoluto $|\beta_j|$ más grande.
- b) Los tamaños de incremento de las otras variables es

$$\Delta x_i = \frac{\beta_i}{\left(\frac{\beta_j}{\Delta X_j}\right)} \quad i = 1, 2, \dots, n$$

- c) Se convierten los incrementos o decrementos Δx_i de variables codificadas a variables naturales

A cada valor simulado Y a través del modelo de regresión de la Ecuación 9, corresponde un valor de la señal de error ϕ respectivo. Esta señal representa el ajuste necesario a realizar en los factores significativos X . **En esta investigación se propone un algoritmo de control dinámico, que distribuye en forma jerárquica la señal de error en los factores significativos del modelo de regresión, utilizando los conceptos básicos de la técnica de escalamiento ascendente, a través de un vector de compensación G** , en al menos una variable x_k de cada uno de los factores significativos de operación X , para hacer que ϕ tienda a cero.

Donde:

$$G = [g_1, g_2, \dots, g_k]^T$$

G = Vector de compensación para realizar los ajustes necesarios en el vector X de factores significativos.

Por lo que para encontrar el vector de compensación G , que permita encontrar los ajustes necesarios en X , se realizan los siguientes pasos:

- a) Identificar y asignar al factor dominante como β_m , que puede ser escogido de los valores de los coeficientes β_j , de los factores significativos del modelo de regresión. El factor dominante es aquel que tiene el coeficiente de regresión absoluto más grande de la

Capítulo 3. Procedimiento de Investigación

ecuación 1. Los factores no dominantes son los demás factores significativos del modelo de regresión obtenido en la Ecuación 9.

β_m = Coeficiente del factor dominante

β_j = Coeficientes de los factores significativos del modelo de regresión para j
= 1,2, ..., n.

- b) Se determina la relación que existe entre cada factor no dominante y el factor dominante utilizando la Ecuación 13. Esta relación es utilizada para distribuir la señal de error en los factores significativos no dominantes.

$$\frac{\beta_j}{\beta_m} \quad \text{para } j = 1,2, \dots, n \text{ y } j \neq m \quad (13)$$

Ecuación 13. Relación entre factor no dominante y dominante

- c) Como en el paso anterior se determinó la relación existente entre los factores del modelo, la señal de error es distribuida proporcionalmente entre los factores correspondientes, utilizando al coeficiente del factor dominante como guía de la proporción jerárquica.

El valor de la variable de compensación g_i para el factor significativo dominante se determina con la siguiente proporción de la Ecuación 14:

$$g_i = \frac{\phi_i}{\beta_m} \quad (14)$$

Ecuación 14. Variable de compensación factor significativo dominante

Los valores de la variable de compensación g_i para los factores significativos no dominantes se determinan con la siguiente proporción de la Ecuación 15:

$$g_i = \frac{\phi_i}{\left(\frac{\beta_j}{\beta_m}\right)} \quad (15)$$

Ecuación 15. Variable de compensación factores significativos no dominantes

- d) Al agregar el término de la señal de error (ϕ_i) en unidades naturales al modelo estadístico de regresión, es necesario convertir los niveles de los factores a unidades naturales para que el modelo de regresión no sea modificado (ψ_j). Ver Ecuación 16.

$$\psi_j = \left(\frac{1}{\text{Nivel natural alto} - \text{Nivel natural bajo}} \right) \quad (16)$$

Ecuación 16. Conversión de niveles a unidades naturales

Por lo que las ecuaciones (14) y (15) quedan expresadas de la siguiente manera. Ver Ecuación 17 y Ecuación 18.

Variable de compensación g_i para el factor dominante:

$$g_i = \frac{\phi_i}{(\beta_m)\psi_j} \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, n \text{ y } j = 1, 2, \dots, k \quad (17)$$

Ecuación 17. Factor dominante

Variable de compensación g_i para los factores no dominantes:

$$g_i = \frac{\phi_i}{\left(\frac{\beta_j}{\beta_m} \right) \psi_j} \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, k \text{ y } j \neq m \quad (18)$$

Ecuación 18. Factores no dominantes

Donde:

n = número de mediciones simuladas

k = número de factores significativos del modelo de regresión lineal

Las ecuaciones 17 y 18 son utilizadas para encontrar el vector de compensación \mathbf{G} , que representa los incrementos o decrementos en los factores significativos \mathbf{X} , en función de la señal de error ϕ , por lo que la Ecuación 9 queda de la siguiente manera, para obtener los valores ajustados. Ver Ecuación 19.

$$\mathbf{Y}_{Aj} = \beta_0 + \beta^T \mathbf{G} + \phi \quad (19)$$

Ecuación 19. Valores ajustados

3.4 Elemento de Medición (*EM*)

Los valores ajustados (Y_{Aj}) o no ajustados (Y) son registrados como *EM*. Estos valores registrados representan la retroalimentación negativa del sistema integral de control dinámico de lazo cerrado (*RN*).

3.5 Función de transferencia del *SICD*

Tomando al valor nominal como la señal de entrada del *SICD* y la *RN* de los resultados de la simulación dinámica, como la salida del sistema, se genera la función de transferencia a través de un modelo matemático, que relaciona las entradas con las salidas, a través de la Ecuación 20.

$$Y_{Aj} = \varphi VN \quad (20)$$

Ecuación 20. Función de transferencia

Donde:

VN = La señal de entrada (Valor nominal)

φ = La pendiente de la línea de respuesta (% eficiencia en la relación entrada-salida)

Y_{Aj} = Realimentación negativa ajustada del *SICD*

El valor de φ representa el porcentaje de eficiencia de la función de transferencia.

Si los valores de Y_{Aj} ajustados fueran iguales al valor nominal deseado o de entrada, el valor debe ser 1, lo que representa un porcentaje de eficiencia del 100%.

La sensibilidad o pendiente representa la eficiencia de los valores ajustados y se determina con la Ecuación 21 y Ecuación 22.

$$\varphi = \frac{1}{r} (VN_1 y_{Aj1} + VN_2 y_{Aj2} + \dots + VN_k y_{Aj k}) \quad (21)$$

Ecuación 21. Sensitividad

Donde:

Y_{AJ} = Salidas ajustadas del sistema, y

$$r = n(VN_1^2 + VN_2^2 + \dots + VN_k^2) \quad (22)$$

Ecuación 22. Variabilidad efecto lineal

Donde:

n = Número de mediciones

3.6 Construcción del Formato del Gráfico de Control del SICD.

El gráfico de control del SICD es utilizado para monitorear y ajustar la calidad de la producción en el proceso, utilizando regresión inversa, es decir, dada Y se obtiene X ; esto permite determinar los ajustes necesarios en X dada una medición de Y que no cumple las especificaciones requeridas, lo cual permite explicar el “**qué y cómo hacer**” para realizar los ajustes necesarios y retornar el control de la calidad de la producción en el proceso. Para la construcción del gráfico de control SICD, se utilizan los elementos que se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Elementos del gráfico de control del SICD

Símbolo	Significado	Ubicación en el gráfico	Símbolo	Significado	Ubicación en el gráfico
LES	Límite de especificación superior	Parte gráfica	α_2	Zona ajuste 2	Parte gráfica
LEI	Límite de especificación inferior	Parte gráfica	α_3	Zona ajuste 3	Parte gráfica
VN	Valor nominal	Parte gráfica	ϕ_i	Señal de error inicial	Parte de registros
ρ_1	Tolerancia 1	Parte gráfica	ϕ_f	Señal de error final	Parte de registros
ρ_2	Tolerancia 2	Parte gráfica	Cp_{ki}	Indicador capacidad de proceso inicial	Parte de registros
α_1	Zona ajuste 1	Parte gráfica	Cp_{kf}	Indicador de capacidad de proceso final	Parte de registros

Sea P un producto manufacturado con diferentes características de calidad. Para cierta característica de calidad (C) de P se tiene por LSE y LIE a los límites de especificación superior e inferior, respectivamente, así como se tiene por VN al valor nominal de las especificaciones de calidad. Estos parámetros están localizados en la parte gráfica del $SICD$. Ver Figura 3.2.

Las zonas α_1 , α_2 , α_3 , son identificadas analizando el comportamiento de los ajustes en la validación dinámica del $SICD$. Cada zona de ajuste representa el número de veces, que se utilizará el algoritmo de ajuste propuesto como elemento controlador en esta investigación, para cumplir la especificación establecida y están ubicadas en la parte gráfica del $SICD$. Ver Figura 3.2.

Estas zonas de ajuste pueden o no ser simétricas respecto al VN y los límites de especificación LES y LEI del producto P a manufacturar, ya que dependen de los valores obtenidos en los parámetros β de la Ecuación 9 y de la proporción jerárquica utilizada en la Ecuación 17 y Ecuación 18.

En la Figura 3.2 se observa el formato del gráfico de control del $SICD$, el cual está conformado por dos partes: parte gráfica y parte de registros. En la parte gráfica del formato se localizan las regiones de tolerancias establecidas para el valor nominal, a través de los límites de especificación superior e inferior, así como la delimitación de las zonas de ajuste. En la parte inferior se realiza el registro de las mediciones de la variable y_i , correspondiendo al EP , se calcula la señal de error utilizando la Ecuación 10 correspondiendo al ECM , así como el indicador Cp_k inicial, tomando a la señal de error como la desviación estándar obtenida.

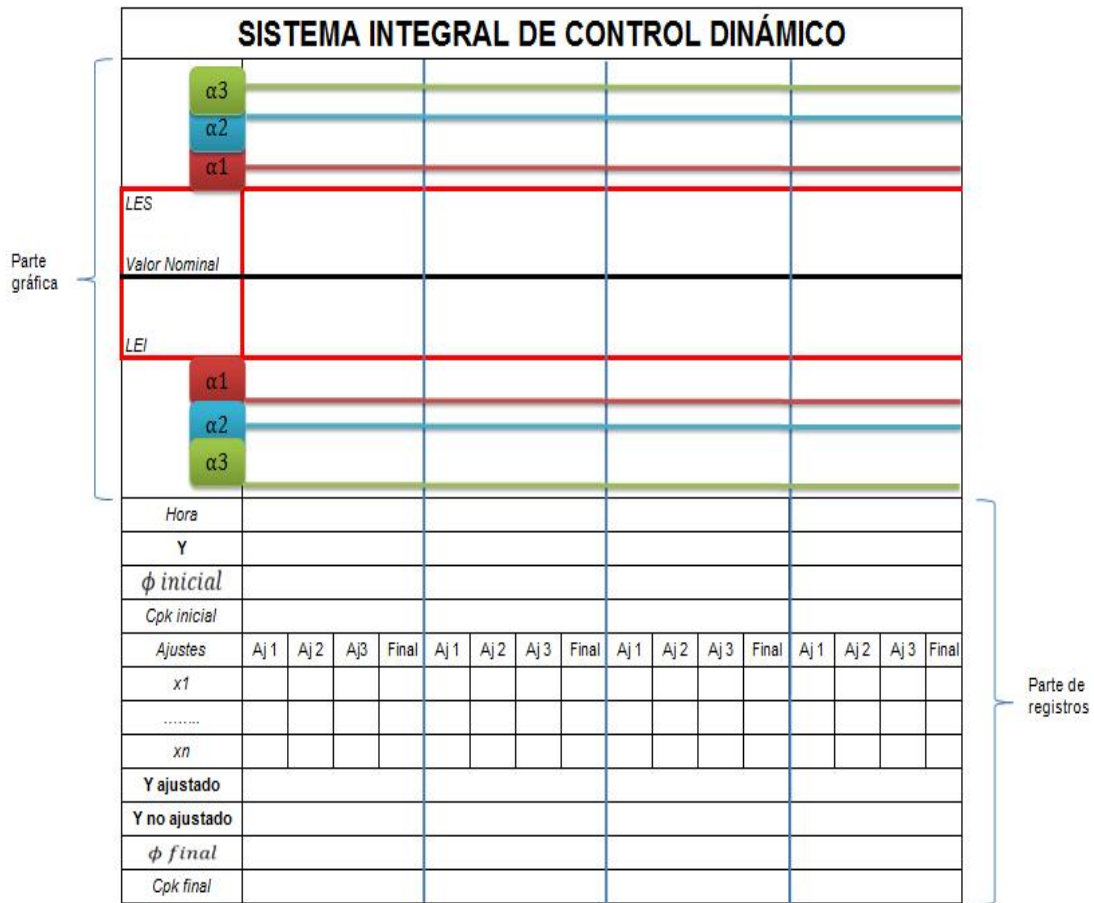


Figura 3.2. Formato del gráfico de control del SICD

Si la señal de error está dentro de tolerancias, no se ajustará la medición realizada, en caso contrario se debe realizar el número de ajustes necesarios en X utilizando la Ecuación 17 y Ecuación 18, de acuerdo a la zona de ajuste donde haya sido localizada la medición, correspondiendo al EC y finalmente se registra el valor ajustado Y_{Aj} , o no ajustado Y , correspondiendo al EM , así como el Cp_k final para observar el incremento del indicador, en caso de haber hecho algún ajuste del proceso.

Al utilizar el gráfico de control del $SICD$, no es necesario que los datos presenten normalidad o que sigan un patrón establecido, pero es recomendable utilizar los GC previamente, para lograr la estabilidad del proceso y de manera complementaria utilizar el $SICD$ para realizar los ajustes requeridos, explicando “qué hacer” y “cómo hacerlos”

4. CAPÍTULO 4: RESULTADOS

En éste capítulo se presentan los resultados obtenidos y se hace el comparativo con el gráfico de control de medias donde se observa el impacto significativo al utilizar el sistema integral de control dinámico.

4.1 Validación dinámica para obtener las zonas de ajuste (α_i) del *SICD*

Se desarrolló un modelo dinámico (Figura 4.1) para validar el *SICD*, lo que permite entender el comportamiento de los ajustes realizados al proceso simulado e identificar las zonas (α_i) para la operación del *SICD* y poder implementarlo con éxito en un proceso real. Este modelo está formado por tres variables de estado, las cuales representan a los factores significativos del modelo estadístico obtenido en el diseño experimental en un caso de estudio de un proceso textil (Ver Ecuación 23). Se incrementan dinámicamente a través de bucles de retroalimentación positiva para entender el comportamiento real del modelo, el cual difiere de un comportamiento lineal asumido. Cuando la variabilidad supera los límites de especificación en la señal de error, se hace el ajuste en forma inmediata, a través del elemento controlador en los bucles de balanceo. La simulación realiza hasta tres ajustes, para identificar las zonas α_1 , α_2 , y α_3 en la construcción y operación del gráfico de control del *SICD*, generando conocimiento para el proceso.

$$Y = 87.8813 + 1.15625x_2 - 0.71875x_3 + 1.30625x_4 \quad (23)$$

Ecuación 23. Modelo de regresión para validación

$$R^2 = 77.04\%$$

Las variables de estado son incrementadas dinámicamente con una tasa de crecimiento establecidas en variables auxiliares, a través de bucles de reforzamiento positivos. La variable de respuesta es calculada a través de un horizonte de tiempo definido. El modelo dinámico está construido para realizar y analizar el comportamiento de la variable de respuesta a través de tres bucles de

4. Resultados

balanceo en el control dinámico de proceso, para detectar y entender cuáles son las zonas de ajuste para el modelo dinámico. El modelo dinámico fue desarrollado en el Software Stella 9.0.2.

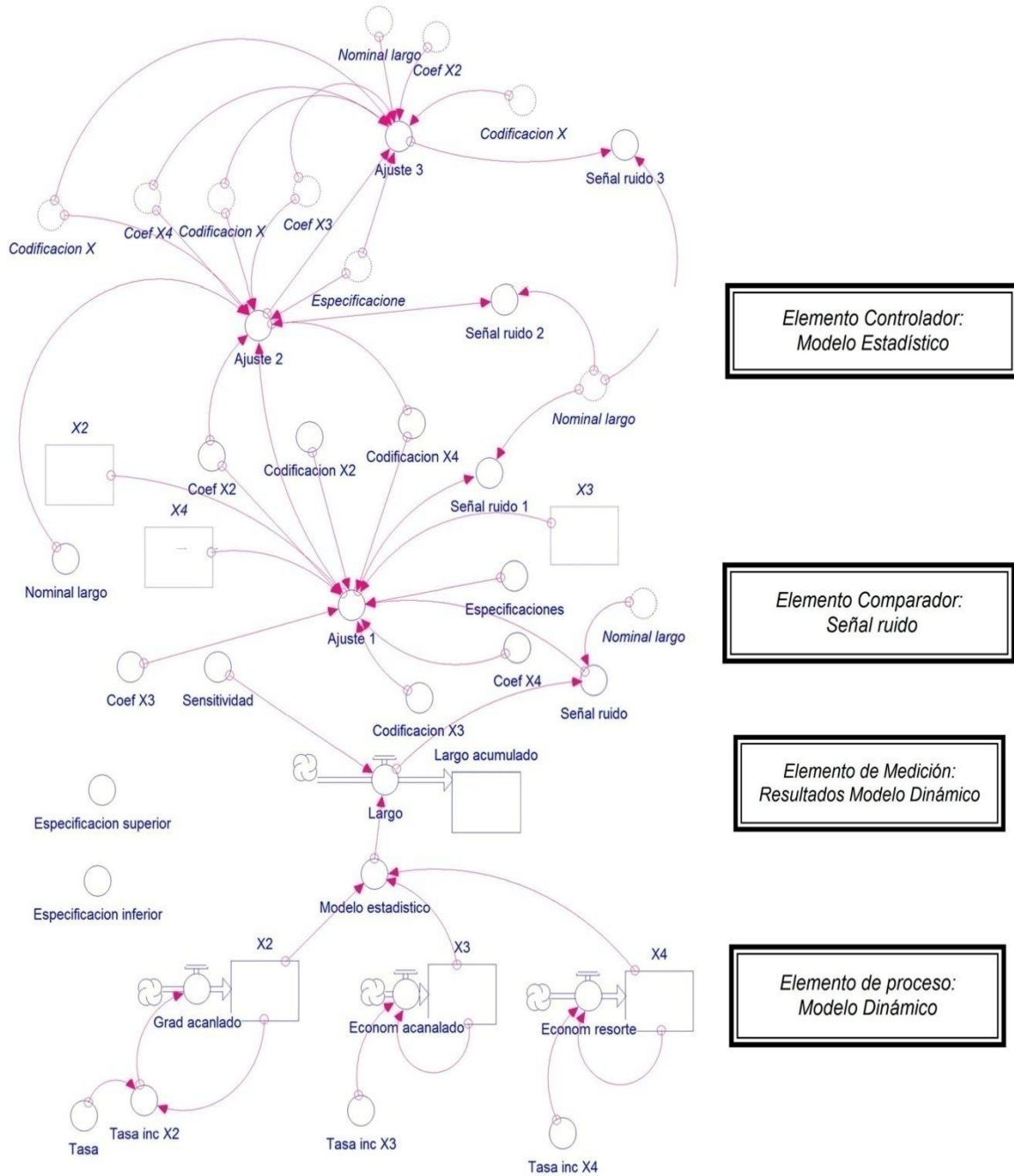


Figura 4.1. Diagrama de Forrester del SICD

4. Resultados

En la Tabla 4.1 se describen los tipos de variables utilizados en el modelo.

Tabla 4.1 Comparación de conceptos

Variable	Tipo de variable	Variables	Tipo de variable
X_2	Variable de estado	<i>Coeficiente X_4</i>	Variable auxiliar
X_3	Variable de estado	<i>Decodificación X_2</i>	Variable auxiliar
X_4	Variable de estado	<i>Decodificación X_3</i>	Variable auxiliar
<i>Tasa inc X_2</i>	Variable auxiliar	<i>Decodificación X_4</i>	Variable auxiliar
<i>Tasa inc X_3</i>	Variable auxiliar	<i>Ajuste 1 largo</i>	Variable auxiliar
<i>Tasa inc X_4</i>	Variable auxiliar	<i>Ajuste 2 largo</i>	Variable auxiliar
<i>Largo</i>	Variable auxiliar	<i>Ajuste 3 largo</i>	Variable auxiliar
<i>Nominal largo</i>	Variable auxiliar	<i>Coeficiente X_3</i>	Variable auxiliar
<i>Coeficiente X_2</i>	Variable auxiliar	<i>Graduación acanalado</i>	Variable de flujo
<i>Economizadores acanalado</i>	Variable de flujo	<i>Economizadores resorte</i>	Variable de flujo

4.2 Resultados

En la simulación del modelo dinámico se estableció el valor nominal de la variable de respuesta largo en 89.0 cm. Con tolerancia de ± 1 cm, a través de los límites de especificación requeridos $LSE = 90.0$ y $LIE = 88.0$ cm.

En la Figura 4.2 se observa el comportamiento del elemento de proceso, simulando las mediciones de Y en la curva 1, el cual tiene un comportamiento real de crecimiento exponencial, difiriendo del comportamiento lineal asumido del modelo de regresión, debido a la realimentación que tiene cada una de las variables de estado en el sistema. Cada uno de los puntos de la curva exponencial que no cumplen con las especificaciones fue ajustado en una sola ocasión en forma dinámica en tiempo real, el cual es transformado en la curva 2, a través del modelo de regresión propuesto como elemento controlador del *SICD*. En la

4. Resultados

Figura 4.2 se observa que realizar un solo ajuste, solo satisface una región α_1 en el que se da cumplimiento a las especificaciones. La zona de tolerancia permitida donde no se necesita ningún ajuste está delimitada por ρ . En la Figura 4.2 se aprecia que el proceso no está centrado, ya que el valor de la media de la variable aleatoria Y , es mayor al LSE , por lo cual existen numerosos valores de tal variable que hacen que el proceso no sea capaz de cumplir con la calidad deseada y por ello no se calcula el indicador Cp_k .

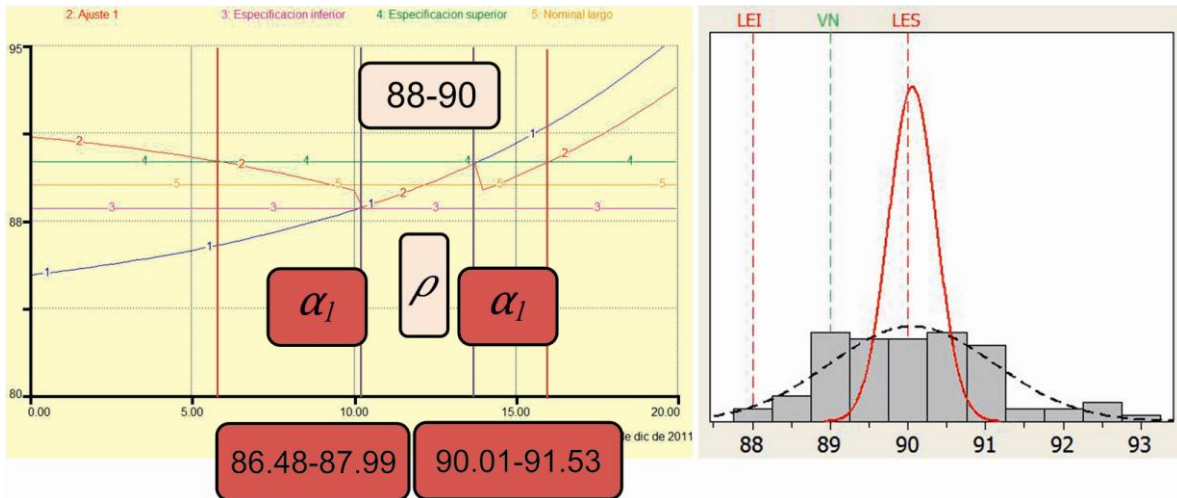


Figura 4.2. Identificación de la zona α_1 del SICD.

En la Figura 4.3, la curva 1 representa el comportamiento del proceso. Se modificó el rango de las mediciones de la variable aleatoria Y en la simulación dinámica para obtener la zona α_2 , los cuales fueron ajustados en dos ocasiones en forma dinámica transformándolas en la curva 2, a través del modelo de regresión propuesto como elemento controlador del SICD. En este caso el rango en que el modelo propuesto realiza los ajustes necesarios es más amplio, obteniendo los valores de la zona α_1 y α_2 en que se cumplen las especificaciones requeridas. En la Figura 4.3 se observa que el proceso no está centrado, ya que el valor de la media de la variable aleatoria Y , es diferente al valor nominal deseado, y por ello no se calcula el indicador Cp_k .

4. Resultados

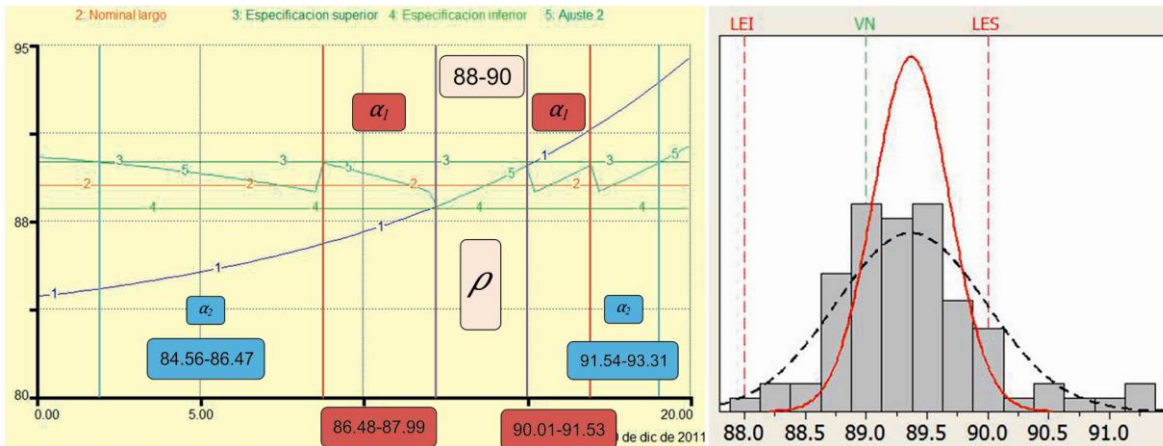


Figura 4.3. Identificación de las zonas α_1 y α_2 del SICD.

En la Figura 4.4 se observan las zonas α_1 , α_2 y α_3 . Para ello se modificó el rango de las mediciones de Y simuladas. Cada uno de los puntos de la curva exponencial 2 que no cumplen con las especificaciones fueron ajustados en forma dinámica en tiempo real, transformándola en la curva 1 a través del modelo de regresión propuesto como elemento controlador del SICD, observándose el cumplimiento total de los ajustes. En la Figura 4.4 se observa que el proceso está centrado, por lo cual se calculó el indicador Cp_k que tuvo un valor de 1.44.

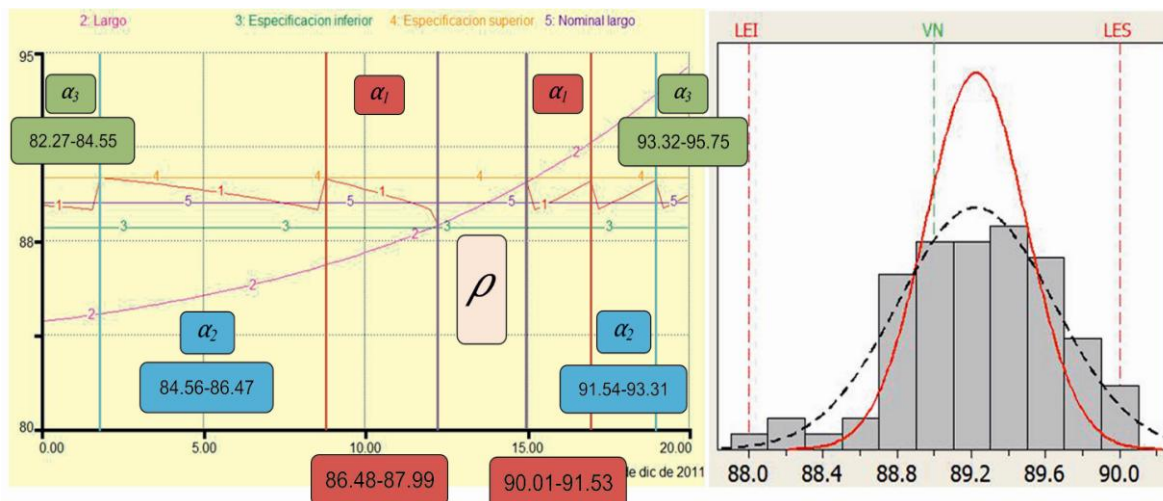


Figura 4.4. Identificación de las zonas α_1 , α_2 y α_3 del SICD.

Zonas de ajuste (α):

A través del aprendizaje del comportamiento de los ajustes realizados del SICD, se diseñaron políticas de operación en los cuales se valida el cumplimiento de las especificaciones de calidad requeridas. Ver Tabla 4.2.

4. Resultados

Tabla 4.2 Estabilidad del SICD

Intervalo	Número de ajuste (α)
82.27 – 84.55	3
84.56 - 86.47	2
86.48 - 91.53	1
91.54 – 93.31	2
93.32 – 95.75	3

Las salidas del *SICD* en el rango de operación de 3 ajustes, que cumple todo el rango de operación se observan en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 Elementos del gráfico del SICD

Salidas del sistema de lazo cerrado del Control Dinámico de Proceso			
89.59	88.87	88.76	89.35
89.56	88.82	88.05	89.5
89.53	88.77	88.16	89.65
89.5	88.73	88.28	89.81
89.47	89.96	88.4	89.97
89.44	89.9	88.52	88.82
89.41	89.84	88.65	88.97
89.38	89.77	88.77	89.11
89.34	89.7	88.91	89.26
89.31	89.64	89.04	89.41
89.27	89.57	89.18	89.56
89.24	89.49	89.32	89.72
89.2	89.42	89.47	89.89
89.16	89.35	89.62	88.75
89.12	89.27	89.77	88.89
89.08	89.19	89.93	89.04
89.04	89.11	88.78	89.19
89	89.02	88.92	89.34
88.96	88.94	89.06	89.5
88.91	88.85	89.2	89.66

Promedio Salidas = 89.22375
Error = 0.22375

4. Resultados

Función de transferencia

Utilizando la Ecuación 21 y Ecuación 22 para los datos de la Tabla 4.3 se obtiene la sensibilidad de la función de transferencia. Ver Ecuación 24. El sistema en estudio solamente tiene una variable de entrada que representa al valor nominal deseado.

$$r = 68(89^2) = 633680$$

$$\varphi = \frac{1}{633680} (89(89.59 + 89.56 + \dots 89.66))$$

$$\varphi = 1.00251404$$

$$Y_{AJ} = 1.00251404VN \quad (24)$$

Ecuación 24. Función de transferencia final

La fiabilidad de la función de transferencia del sistema de control dinámico de proceso es significativa, cumpliendo el criterio de sensibilidad casi unitaria.

4.3 Simulación

Comparación de los ajustes realizados del SICD, con el gráfico de control de mediciones individuales.

En la Figura 4.5 se observa una gráfica de control de mediciones individuales, para una muestra aleatoria con 40 observaciones con distribución normal, con $\mu = 89$ y $\sigma = 2.5$. El proceso se considera estable y en control, observando un comportamiento sin tendencia alguna, ni patrones anormales dentro de los límites de control naturales superior (LSC) e inferior (LIC)

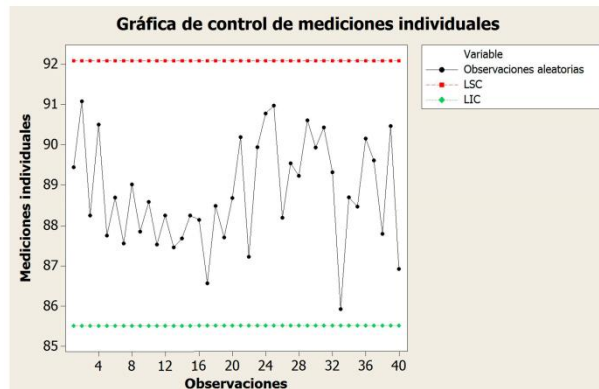


Figura 4.5. Gráfica de control de mediciones individuales

4. Resultados

En la Figura 4.6 se observa el gráfico de mediciones individuales de la Figura 4.5, al que se incorporaron los límites de especificación establecidos por la empresa textil: $LSE = 90$ y $LIE = 88$. Se hizo el comparativo del comportamiento de los datos para ambos límites y el análisis de capacidad correspondiente.

La gráfica que mostraba un proceso estable y en control, continúa siendo un proceso estable, en control, pero incapaz de cumplir con las especificaciones requeridas.

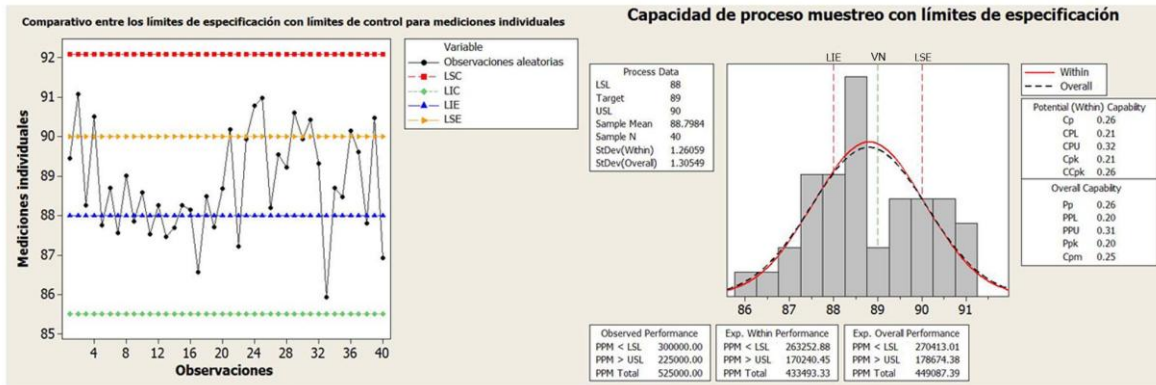


Figura 4.6. Gráfica de control SICD e indicador de la capacidad del proceso.

En la Figura 4.7, Figura 4.8 y Figura 4.9 se observa el impacto de los ajustes realizados en X , dadas las mediciones de Y , utilizando el elemento controlador propuesto en esta investigación, incrementando la capacidad del proceso a niveles mayores de 1.33 y una tasa de defectos menor a 64 ppm, como es lo aceptable para un proceso industrial (Montgomery, 2009).

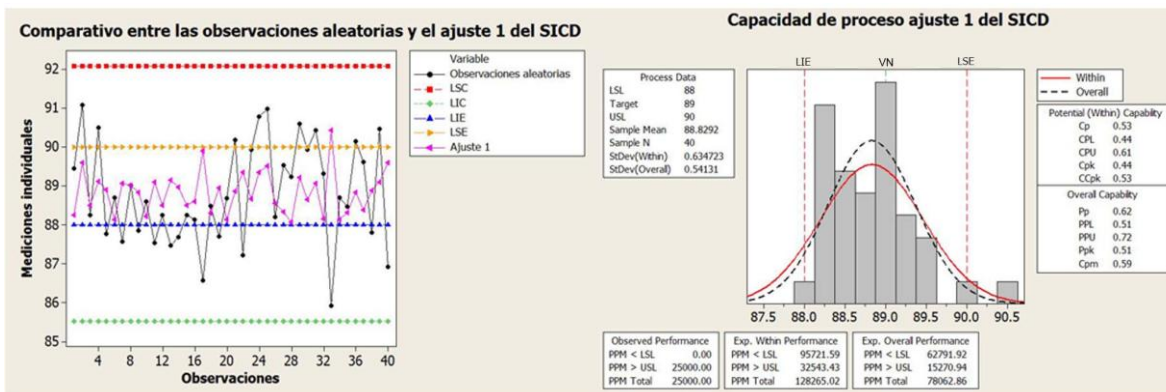


Figura 4.7. Gráfica del SICD y capacidad del proceso para un ajuste.

4. Resultados

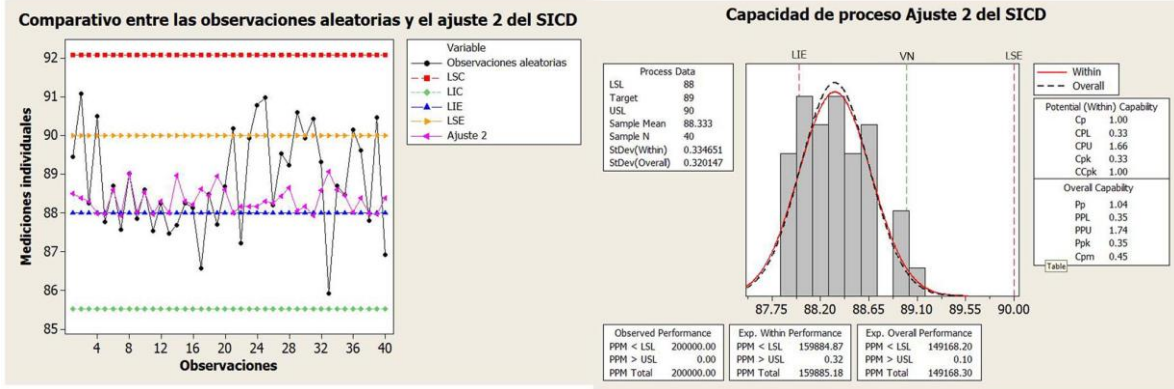


Figura 4.8. Gráfica del SICD y capacidad del proceso para un ajuste.

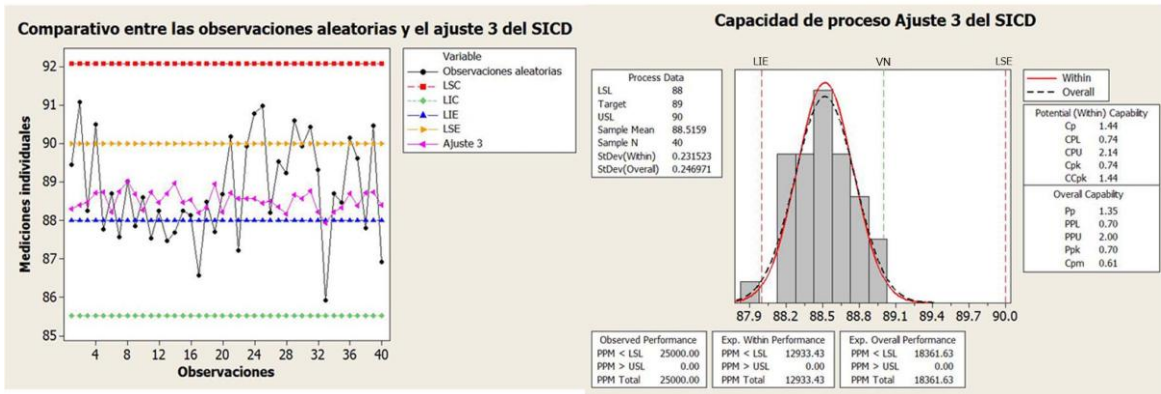


Figura 4.9. Gráfica del SICD y capacidad del proceso para un ajuste.

Gráfico de control del SICD:

SISTEMA INTEGRAL DE CONTROL DINÁMICO													
α_3	95.75												
α_2	93.31												
α_1	91.53												
LSE	90												
VN	89												
LIE	88												
α_1	86.48												
α_2	84.56												
α_3	82.27												
Hora													
Y		89.4455		91.0816		88.2532		90.5044					
ϕ inicial		0.4455		2.0816		0.7468		1.5044					
Cpk inicial		0.74822297		0.160133231		0.446348866		0.221572277					
Ajustes		Aj 1	Aj 2	Aj 3	Final	Aj 1	Aj 2	Aj 3	Final	Aj 1	Aj 2	Aj 3	Final
x1					1.18				1.18				0.85
.....					0.95				0.95				0.68
xn					0.8				0.8				0.58
Y ajustado		89.6018						89.1247					
Y no ajustado		89.4455				88.2532				0.1247			
ϕ final		0.4455				0.6018				0.7468			
Cpk final		0.74822297				0.553893874				0.446348866			
										2.673082064			

Figura 4.10. Gráfico del SICD

4. Resultados

En la Figura 4.10 se observa el gráfico del *SICD* para monitorear un proceso real. Los elementos que lo conforman en la parte superior son el *VN* con un valor de 89 y los límites de especificación establecidas por la empresa: *LES* y *LEI*, con valores de 90 y 88 respectivamente. Estos valores están representados con líneas horizontales de color rojo.

La zona α_1 : está representada con dos líneas de color guinda, el límite inferior de ajuste α_{1inf} tiene un rango de 86.48-88 y el límite superior α_{1sup} , tiene un rango de 90-91.53.

La zona α_2 : está representada con dos líneas de color azul, el límite inferior de ajuste α_{2inf} tiene un rango de 84.56-86.48 y el límite superior α_{2sup} , tiene un rango de 91.53-93.31.

La zona α_3 : está representada con dos líneas de color verde, el límite inferior de ajuste α_{3inf} tiene un rango de 82.27-84.56 y el límite superior α_{3sup} , tiene un rango de 93.31-95.75

Los rangos de valores para cada una de las zonas de ajuste fueron obtenidos, utilizando dinámica de sistemas para validar el *SICD* propuesto en esta investigación.

En la parte inferior se registraron las primeras cuatro observaciones de la muestra aleatoria de la Figura 4.10 correspondientes a las medición de la característica de calidad *C*, determinada como una variable aleatoria *Y*, correspondiendo al elemento de proceso *EP*. Se hizo la localización de las mediciones en el gráfico *SICD* y se calculó la señal de error, respectiva. Se hizo la comparación con las tolerancias establecidas ρ , utilizando al elemento de comparación *ECM*. En los casos donde la señal de error no estuvo dentro de tolerancias, se calcularon los ajustes necesarios, según la localización de la medición realizada, utilizando al elemento controlador *EC*. Finalmente se registró el valor ajustado o no ajustado utilizando al elemento de medición *EM*. La primera medición no necesitó ajuste alguno, ya que la señal de error estuvo dentro de tolerancias. La segunda medición requirió solamente de una vez de la utilización del algoritmo de ajuste propuesto como elemento controlador (*EC*). La tercera medición no necesitó ajuste alguno, ya que la señal de error estuvo dentro de tolerancias y por último la

cuarta medición necesitó de la utilización de una vez del algoritmo de ajuste propuesto.

4.4 Método de implementación: *SICD*

1. Aplicar *GC* para identificar el momento “*cuándo*” hay presencia de causas especiales, eliminarlas y lograr la estabilidad del proceso .Monitorear para observar baja en la capacidad del proceso o bien, cambios en la media global. Si esto ocurre, pasar a 2.
2. Realizar diseño experimental, para encontrar la relación en un modelo estadístico de regresión entre las variables de operación **X** y la variable aleatoria **Y**, que representa la característica de calidad **C** a controlar, para cualquier producto **P** a manufacturar. El modelo tiene que cumplir con un coeficiente de determinación mayor a 70% para explicar la adecuación del modelo. Ver capítulo 1.
3. Utilizar dinámica de sistemas para validar el *SICD* propuesto en esta investigación e identificar las zonas de ajuste para el control del proceso real, conformado por cuatro elementos: i) elemento de proceso, ii) elemento de comparación, iii) elemento controlador y iv) elemento de medición. Ver capítulo 3.
4. Construcción del gráfico de control del *SICD* para monitorear y controlar el proceso real, el cual explica el “*qué*” y “*cómo hacer*” los ajustes necesarios en **X** para el cumplimiento en **Y**, para restablecer el control del proceso. Ver Capítulo 3.
 - Determinar el valor nominal *VN* a controlar y representarlo con una línea horizontal como medida de tendencia central, en la parte gráfica del formato del gráfico de control del *SICD*.
 - Determinar los límites de especificación superior e inferior y representarlos con dos líneas horizontales, en la parte gráfica del formato del gráfico de control del *SICD*.

4. Resultados

- Determinar las zonas de ajuste obtenidas a través de la validación dinámica del SICD. Ver Capítulo 3. Cada una de éstas representarlas con líneas horizontales en la parte gráfica del formato del gráfico de control del SICD, utilizando colores distintos para cada uno de ellos para facilitar la localización de los registros.
- Registrar la medición y_i obtenida en el proceso (EP), en la parte de registros del formato del gráfico de control del SICD.
- Localizar la medición en la parte gráfica, del formato del gráfico de control del SICD
- Calcular señal de error inicial (ϕ_i) como elemento de comparación (ECM) en la parte de registros del formato del gráfico de control del SICD. Ver Ecuación 10.
 - En caso de cumplimiento de especificaciones, no realizar ajuste y conservar el mismo registro como elemento de medición (EM) y calcular el Cp_k correspondiente, utilizando la señal de error ϕ_i como desviación estándar.
 - En caso de incumplimiento de especificaciones, localizar en la parte gráfica la zona de ajuste, que representa el número de veces a utilizar el algoritmo de ajuste propuesto como elemento controlador (EC). Realizar la suma aritmética de los resultados obtenidos en el algoritmo, registrarlos en el gráfico SICD y finalmente realizar el ajuste en los factores significativos X , para obtener el cumplimiento en Y . Calcular el Cp_k correspondiente, utilizando la señal de error final ϕ_f , la cual es obtenida en la última utilización del algoritmo de ajuste, como

4. Resultados

desviación estándar, para ver el incremento del indicador Cp_k .

- Registrar el valor ajustado o no ajustado como elemento de medición (EM) en la parte de registros del formato del gráfico de control del $SICD$.

4.5 Conclusiones

Se realizó la validación del sistema de control avanzado que permite ejecutar acciones de control cuando se identifican condiciones de no conformidad por comparación de mediciones individuales con las especificaciones y dar contestación a las preguntas de “**qué**” y “**cómo**” hacer los ajustes necesarios. Se utilizó al modelo estadístico obtenido a través de diseño experimental en un caso de estudio del sector textil el cual representa al elemento de proceso EP . Se utilizó la señal de ruido como elemento de comparación ECM . Los ajustes fueron hechos en forma dinámica e inmediata cumpliendo con las especificaciones requeridas, utilizando regresión inversa del modelo estadístico obtenido, es decir dado un valor de Y estimar los ajustes necesarios a realizar en X , incorporando una variable de compensación, utilizado como elemento controlador EC . Para ello se calcularon las desviaciones a las especificaciones (ϕ_i), las relaciones entre las variables $(\frac{\beta_j}{\beta_m})$ para $j \neq m$ y la decodificación de los niveles en el modelo estadístico (ψ_j), como proceso de conocimiento. Se desarrolló un modelo dinámico que permitió identificar las zonas de ajuste para la construcción del gráfico del $SICD$ y se diseñaron políticas de operación en la que se da cumplimiento a las especificaciones de calidad, realizando 1, 2 o 3 ajustes a los factores significativos. Se hizo el análisis del rendimiento en los ajustes del $SICD$ a través de una función de transferencia de una característica dinámica, la cual tiene una fiabilidad significativa al obtener el valor de sensibilidad casi unitaria de 1.0025. Se compararon los resultados obtenidos del $SICD$ con gráficos de control de medias, donde se observa el impacto en el cumplimiento de las especificaciones requeridas.

4.6 Recomendaciones

Como trabajos futuros se utilizará el enfoque de dinámica de sistema para realizar la transición de un modelo lineal predictivo, a un modelo no lineal explicativo que realice estimaciones más fiables. Se analizará la función de deseabilidad con un enfoque dinámico como una alternativa gráfica para identificar la optimización de las variables de respuesta. Asimismo se trabajará con redes neuronales para diseñar un sistema de control inteligente que optimice los ajustes al control dinámico de proceso en forma automatizada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andrade H, Luque G, Guzmán S, Lince E. (2010). "Sistemas de inferencia difusa en el modelado con conocimiento aproximado". *8º Congreso Latinoamericano y 8º Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas*. p.54-60.

Black H, Mastrangelo C, Shu M. (2001). "Statistical Monitoring Performance for Startup Operations in a Feedback Control system". *Quality and reliability engineering international*. Vol.17 p.379-390.

Becerra M, Orjuela J, Romero O. (2010). "Programación de una rutina de dieta alimenticia y ejercicio físico monitoreado aplicando Dinámica de Sistemas". *8º Congreso Latinoamericano y 8º Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas*. p.346-352.

Bolton W. *Ingeniería de control*. 2ª edición. México: Ediciones Alfaomega, 2001. 397p. ISBN 970-15-0636-7.

Buendía F. (2010). "Self-organizing market structures, system dynamics, and urn theory". *8º Congreso Latinoamericano y 8º Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas*. p.144-150.

Cárdenas L, Franco C, Dyner I. (2010). "Análisis sistémico del mercado de carbono de la Unión Europea y sus implicaciones en el sector eléctrico". *8º Congreso Latinoamericano y 8º Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas*. p.393-402.

Díaz A, Bucheli V, Zarama R. (2010). "La investigación en la Universidad de los Andes como procesos de acumulación de capital humano: una aproximación desde la Dinámica de Sistemas". *8º Congreso Latinoamericano y 8º Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas*. p.24-30

Referencias Bibliográficas

Georgieva P, Foyo de Azevedo S. "Neural Network-Based Control Strategies Applied to a Fed-Batch Crystallization Process". *International Journal of Computational Intelligence*. Vol. 3 p. 224-233.

Guh R. (2005). "Real-time pattern recognition in statistical process control: a hybrid neural network/decision tree-based approach". *J. Engineering Manufacture*. Vol. 219 p. 283-298.

Guh R, Shiue Y. (2010). "Fast and accurate recognition of control chart patterns using a time delay neural network". *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*. Vol. 27 p. 61–79.

Gutiérrez H, De la vara R. *Análisis y diseño de experimentos*. 2ª edición. México: Ediciones Mc Graw Hill, 2008. 545p. ISBN-10: 970-10-6526-3.

Maimbil E, Caminos A. (2010). "Model of the housing market – CABA.". 8º Congreso Latinoamericano y 8º Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas. p.166-175.

Micán C, Rubiano O, Osorio J. (2010). "Impacto de la rotación de personal en las entregas a los clientes: un enfoque sistémico". 8º Congreso Latinoamericano y 8º Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas. p. 202-207.

Montgomery D. *Control estadístico de la calidad*. 3ª edición. Ediciones Limusa, 2009. 797p. ISBN: 978-968-18-6234-3.

Montgomery D. *Diseño y análisis de experimentos*. 2ª edición. Ediciones Limusa, 2007. 686p. ISBN-13: 978-968-18-6156-6.

Montgomery, Peck, Vining. *Introducción al análisis de regresión lineal*. 3ª edición. CECSA, 2002. 565p. ISBN 970-24-0327-8

Referencias Bibliográficas

Pham D, Chan A. "Control chart pattern recognition using a new type of self-organizing neural network". *Proc Instn Mech Engrs*. Vol. 212 p.115-127.

Osorio P, Andrade H, Gómez U, Díaz N. (2010). "Modelo de Dinámica de Sistemas para la toma de decisiones en la inversión pública municipal. Un enfoque Sistémico". *8º Congreso Latinoamericano y 8º Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas*. p.15-23

Ramírez S, Carmona G, Castro J. (2010). "Simulación de la cadena de abastecimiento de una empresa de producción y distribución de baterías eléctricas". *8º Congreso Latinoamericano y 8º Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas*. p.194-197.

Restrepo A, Franco C, Flores A. (2010). "Mercado del azúcar en Colombia". *8º Congreso Latinoamericano y 8º Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas*. p.176-184.

Rubiano O, Córtes M, Ramírez P, Trujillo J. (2010). "Estudio de la planeación y desarrollo del proceso de formación profesional integral desde el enfoque del pensamiento sistémico". *8º Congreso Latinoamericano y 8º Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas*. p.77-82.

Runger R, Caner M, Tsung F. (2006). "Relationships Among Control Charts Used with Feedback Control". *Quality and reliability engineering international*. Vol. 22 p. 877-887.

Seyed Taghi S, Ostadsharif A. (2008). "A new statistical process control method to monitor and diagnose bivariate normal mean vectors and covariance matrices simultaneously". *Int J Adv Manuf Technol*. Vol. 43 p.964–981

Sterman J. *Business Dynamics*. USA. Mc Graw Hills edition. 2000. 982p. ISBN 978-0-07-231135-8

Referencias Bibliográficas

Vázquez J.A, López I, Peña M. (2010). "On the Use of the Fuzzy ARTMAP Neural Network for Pattern Recognition in Statistical Process Control using a Factorial Design". *International Journal of Computers, Communications & Control*. Vol. 5 p.205-215.

Venkatesan G. (2002). "Discussion and analysis of stochastic feedback control adjustment". *J Engineering Manufacture*. Vol. 216 p.1429-1442.

Zhao Y, Liu G, Rees D. (2008). "Integrated predictive control and scheduling co-design for networked control systems". *The Institution of Engineering and Technology Control Theory Appl*. Vol. 2 p.7-15.

**ANEXO 1: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL
ENGINEERING**

Proceedings of the 15th Annual
International Conference on Industrial Engineering
Theory, Applications and Practice
México City, México
October 17-20, 2010

STATISTICAL MODEL OF THE KNITTING SYSTEM DYNAMICS
Roberto Baeza Serrato¹, Miguel Gastón Cedillo Campos²

¹Department of Industrial Engineering & Manufacturing Science,
Estudiante del Doctorado de Ingeniería Industrial y Manufactura
Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas A.C.
Omega No. 201, Fracc. Delta

C.P. 37545, León, Guanajuato, México
E-mail: robazea66@hotmail.com

²Department of Industrial Engineering & Manufacturing Science,
COMIMSA – National Council of Science and Technology,

Ciencia y Tecnología No.790, Fracc. Saltillo, 400,
C.P. 25290, Saltillo, Coahuila, México
E-mail: gaston.cedillo@comimsa.com

Abstract. A dynamic model to estimate the lead time of a knitting company is exposed. The model could also be used to estimate the lead time of other industrial supply chains. The current research used a System Dynamics approach, taking into account the feedback from state variables along with their interactions. Key performance indicators were dynamically increased through feedback loops that made the real lead time behavior identifiable and understandable. The results obtained were validated through a non replicated fractional factorial experimental design, leading to a statistical model that enables to estimate the corresponding lead time. Considering the current diversity and competition features in the textile industry, the statistical model obtained enable to make decisions and estimate highly reliable response times to the client. The validation was realized in a textile manufacture located on the south of Guanajuato. As a conclusion, the results are discussed and, future researches are presented.

1. - INTRODUCTION

The present research was realized as case of study for the knitting process within the textile industry. The process of the analyzed knitting material is a system made of discrete events that initiates in the knitted linens, giving, as a result, meshes or loops with one or several threads in rectilinear Shimaseiki machines (see figure 1). Based on a synchronic manufacture approach to determine the variables, such as available hours that should be worked for synchronizing the flow of material, a System Dynamics approach was used for the analysis. With this technique, it was possible to dynamically increase the value of the key parameters. The feedback loops under which the model operates enables to identify and to understand the real behavior of the Lead Time process.

A through revision of the state of art was developed with the objective of offering innovating solutions. One of the researches with greater impact in our work was developed by Umeda (2007), who simulated a supply chain constituted by discrete events using feedback mechanisms in its activities, between the demand and the company. This enables to simulate the activities of the chain, just as a mechanism of a social system, permitting the administration to simulate long term periods and clarify the specifications of the requirements through the supply chain. On the other hand, Özbayrak (2007) developed a model of Systems Dynamics for supply chains to completely understand the network, analyzing the interactions between several components of the integrated system. This led to a true reflection of the behavior, using the model to compare the output of the system with considered initial conditions and, with eight different scenarios commonly used as operational conditions in real life. Cedillo and Sanchez (2008) point out that in a chain of self-regulatory flows of feedback, when delays in the transmission of the information occur, the response of the system is late and consequently it becomes oscillating. This way, in the system dynamics model presented, the delays during the material flow are taken into account, using both reinforcement loops and balance loops, obtaining an oscillating behavior known as overshoot. Provided that in our project an operative context using discreet events was identified, the simulation was an important element due to the comparative of the system behavior in different scenarios, taking into account an approach of Systems Dynamics using feedback mechanisms, as Umeda (2007) indicates. In the analysis of the displayed model the comparison is made with different scenarios just as Özbayrak (2008) makes his conclusions of the reflection of the behavior, in his article. The existing delays in the flow of material are taken into account making the answer of the system late and with an oscillating behavior, as indicated by Cedillo and Sanchez (2008). This article is structured as follows. In section 2, the use of the

©International Journal of Industrial Engineering
ISBN #9780965258-6-8

Proceedings of the 15th Annual
International Conference on Industrial Engineering
Theory, Applications and Practice
México City, México
October 17-20, 2010

concepts of synchronic manufacturing to identify and synchronize the flow of material to the rhythm of restriction is described. Section 3 describes the dynamic model developed to analyze the problematic of the knitted material. In section 4, the results obtained and analyzed from the behavior of the lead time are shown. The model is validated via an experimental design

fractional not replicated 2_{iv}^{7-3} . Section 5 presents the conclusions of the article which point out the importance of having a statistical model which allows estimated lead times to the final client.

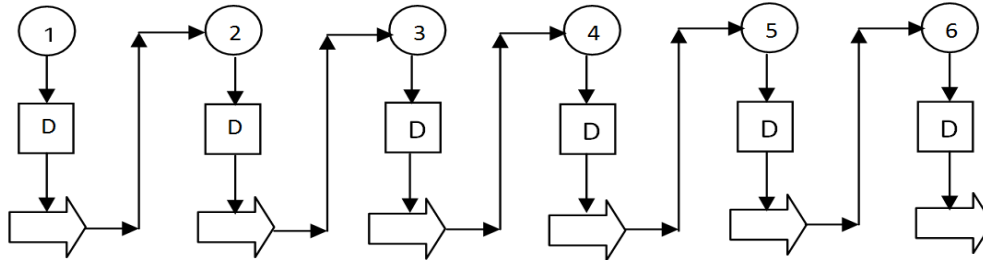



Figure 1. Process diagram of the knitting material system.

Table 1. Symbols and description of process diagram of the knitting material system

Symbols	Description	Symbols	Description
1	Knitting	5	Confection
2	Basting	6	Packing
3	Ironed	D	Delay
4	Cutting		Transport

2. METHODOLOGY

Based on the concepts of synchronic manufacture (Umble, 2003), the proposition of the dynamic hypothesis of the knitting material was developed. The main objective was to understand the operative development of the processes, analyze them and develop a solution which enables the synchronization of the flow of material, in order to improve the company performance.

As to similar questions, authors like Zribi N. et al. (2009) worked on the solution to the problem of programming activities for multitask machines, in which in which maintaining the machines represents a restriction since they can't be used at that time. The final results showed that in the current research the process restriction was identified and the flow of material was synchronized at rhythm of the restriction, obtaining a reflection of the behavior of the process. On the other hand, Britto et al. (2007), proposed a hybrid approach that uses the mobile heuristic bottleneck and Taboo Search with the objective of minimizing the total pondered delay. To determine the restriction of the system, the authors used the analysis of the work load of the employee in the processes, as it was done in this research, to determine the number of hours to work in different processes. These are introduced in the dynamic hypothesis of the model given in our research.

This way, for the construction of the model, a Systems Dynamic focus was used wishing to comply with several requirements: i) Taking into account the opinion of the persons who intervene in the process; ii) Identify and understand the complex system of knitting material; iii) Design lead time politics, and finally, iv) Count with a support tool in the process of change in the system. More specifically, the model represents the feedback of the processes, with reservoirs and structures of flow, delay times and absence of linearity, representing the dynamic of the system (Sterman, 2000). The use of the systems dynamic integrating a based validation in Design of Experiments, counts with important precedents. Under this paradigm, in 1995, Kleijnen (1995) validated a model that examines the transport of carbon, using the design of experiments to analyze the responses to the changes in the values of the variables of the model. Huang et al. (2009) presented a procedure that identifies changes in the patterns of behavior with the presence and absence of feedback loops, to identify the dominance of the loop for a specific time interval. At the same time, Saleh M. et al. (2009) realized a

Proceedings of the 15th Annual
International Conference on Industrial Engineering
Theory, Applications and Practice
México City, México
October 17-20, 2010

validation of a model of System Dynamic using formal tools like the eigenvalues and eigenvectors, which permitted them to increase or slow the process of frequency of the oscillating behavior observed in the system.

3. DESCRIPTION OF THE KNITTING DYNAMIC SYSTEM.

Some of the main tools used in System Dynamic to explain the behavior of the system through its feedback, are the causal diagrams (Sterman, 2000). This way, for our research, the dynamic hypothesis proposal is based on its causal diagram and was defined with the participation of the manager of the manufacturing company, supervisors of production, supervisors of the maintenance and operators of the different departments. It enabled to integrate not only the qualitative information of the process, but also to adequately integrate the quantitative information which was available or was collected from the field. As a result, a diagram was obtained composed of 4 loops of balance and 2 of reinforcement, with the presence of delays in the lot of transference and the lead time of the client. (See figure 2).

Table 2. Model Variables

Description	Symbols	Description	Symbols	Description	Symbols
Lot of process	(α)	Work incentives	(θ)	Components desired	(o)
Increment of the lot process	(β)	Work satisfaction	(ι)	Corrective components	(ρ)
Work load	(γ)	Quality	(κ)	Corrective Action components	(ς)
Work profile	(δ)	Increment of the lot transference	(λ)	Operations increment	(τ)
synchronization at the rythm of the drum	(ϵ)	Lot of transference	(μ)	Number of confection operations	(φ)
Number of knitting machines	(ζ)	Lot desired	(ν)	Operations desired	(ψ)
Number of confection machines	(η)	Flow delays	(ξ)	Corrective operations	(ω)
Number of people per department	(ϑ)	Lot corrector	(ϕ)	Corrective actions operations	(π)
Hours to work per department	(ϵ)	Corrective Action	(ϱ)	Lead time clients	(σ)
Work training	(ϑ)	knitting components	(ϖ)		(χ)

Loops description:

- Loop (B1). Loop of balance which evaluates the difference between (μ) and (ν)
- Loop (B2). Loop of balance which evaluates the difference between (ϖ) y (o) .
- Loop (B3). Loop of balance which evaluates the difference between (φ) y (ψ) .
- Loop (B4). Loop of balance with delay presence which evaluates the difference between (χ) y (σ) .
- Loop (R1). Loop of reinforcement which has an increment in the requests/ orders (β) .
- Loop (R2). Loop of reinforcement which has an increment in the lot of transference (μ) from a piece to (ν) .

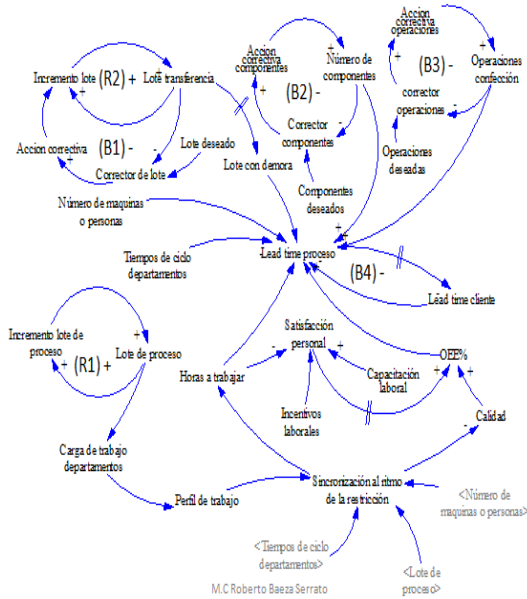


Figure 2. Causal Diagram of the knitting system

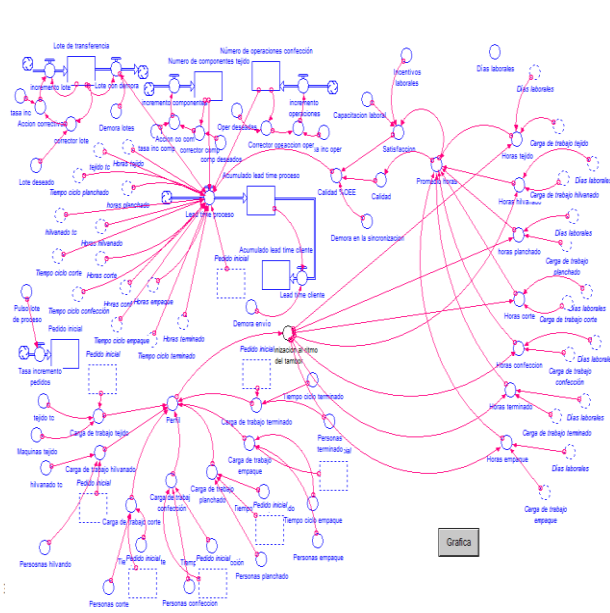


Figure 3. Diagram of Forrester knitting system

To analyze the hypothesis dynamic of the causal diagram shown in figure 2, qualitative variables, quantitative variables, existing delays and feedback between the variables were taken into account, explaining the behavior of the lead time process. After that, the diagram of Forrester was realized to make the respective simulations. In the Diagram of Forrester (figure 3) 6 reservoirs and their corresponding flows can be seen. Ghost artificial variables were used for the initial period, cycling time of departments, workloads and working days.

4. ANALYSIS AND RESULTS

4.1 Simulation results

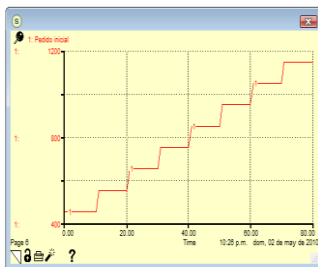


Figure 4. Lead time behavior

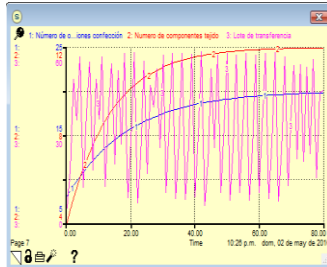


Figure 5. Looking for goal and delay behavior

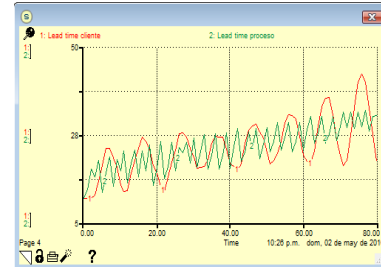


Figure 6. Lead time behavior

In figure 4, the dynamic behavior of the client's request can be observed. The lot of transference behavior in figure 5 shows oscillations due to the presence of delay in the flow of material. The behavior of the components and operations is exponential to reach the required goal. The lead time behavior in figure 6 is not linear with oscillations, due to the present interactions and the existing delays in the model.

Proceedings of the 15th Annual
International Conference on Industrial Engineering
Theory, Applications and Practice
México City, México
October 17-20, 2010

4.2 Model Validation

The model validation was made via a fractional experimental design not replicated 2^{7-3} . The validation was made to know the lead time behavior in the 16 different possible combinations and enabled to obtain a statistical model to realize lead time estimations in the organization of knitting system. During the simulation of every possible combination and due to the dynamic increment in the lot of process, it was possible to obtain a statistical model for every answer variable analyzed. The factors and levels to consider in the experimentation are presented in table 3.

Table 3. Factors, levels and response variables of the experimental design

Factors	Meaning	Low level (-1)	High level (1)	Response variables
X ₁	Lot of transference	40 pieces	60 pieces	Y ₁ : 450 pieces
X ₂	Synchronization delay	5%	10%	Y ₂ : 550 pieces
X ₃	Lot of process	Pulse (50,5,5)	Pulse (100,10,10)	Y ₃ : 650 pieces
X ₄	Incentives	85%	95%	Y ₄ : 750 pieces
X ₅	Training	85%	95%	Y ₅ : 850 pieces
X ₆	Quality	85%	95%	Y ₆ : 950 pieces
X ₇	Available hours	Real hours	Synchronized hours	Y ₇ : 1050 pieces

Table 4. Effects, coefficients and evaluation for the T and p test.

Term	Effect	Coefficients	Error	T	p
Constant		14.257	0.02296	620.83	0.001
X ₁	2.355	1.178	0.02296	51.28	0.012
X ₄	-1.094	-0.507	0.02296	-23.82	0.027
X ₆	-1.948	-0.974	0.02296	-42.40	0.015
X ₇	-6.734	-3.367	0.02296	-146.63	0.004

It is seen in table 4 that factors X₁, X₄, X₆ y X₇ are significant, with a determination coefficient of 99.98% which explains the data behavior. An analysis of correlation of data obtained from the Forrester model simulation was carried out, obtaining models of correlation which are presented in table 5.

Table 5. Statistical and correlation models

Statistical Modelling			
Y ₁ = 14.257+1.178X ₁ -0.547X ₄ -0.974X ₆ -3.367X ₇	R-Sq = 99.98%		
Y ₂ = - 1.47 + 1.40Y ₁	R-Sq = 96.6%	Y ₅ = - 8.24 + 2.31 Y ₁	R-Sq = 93.1%
Y ₃ = - 4.51 + 1.78Y ₁	R-Sq = 97.1%	Y ₆ = - 8.31 + 2.38 Y ₁	R-Sq = 88.8%
Y ₄ = - 5.11 + 1.90Y ₁	R-Sq = 90.4%	Y ₇ = - 11.0 + 2.76 Y ₁	R-Sq = 89.8%

Proceedings of the 15th Annual
International Conference on Industrial Engineering
Theory, Applications and Practice
México City, México
October 17-20, 2010

Table 6. Results Comparison of DS simulation and estimations of Statistics model obtained for Y1

DS	DOE	Residuales	DS	DOE	Residuales
21.3991	21.3761	0.022964	9.3845	9.3616	0.022964
16.4617	16.4387	0.022964	8.535	8.558	-0.022964
18.1382	18.1611	-0.022964	13.1418	13.1189	0.022964
10.07	10.047	0.022964	19.4217	19.4446	-0.022964
13.0182	13.0411	-0.022964	11.0727	11.0957	-0.022964
10.9467	10.9696	-0.022964	10.9467	10.9237	0.022964
17.7264	17.7034	0.022964	16.7436	16.7666	-0.022964
15.1067	15.0837	0.022964	15.9933	16.0163	-0.022964

As observed on table 6, the estimated results using the statistic model obtained through the DOE for Y₁, compared to the estimated results obtained from the simulation of the dynamic model, have values not significant in the residuals, validating the reliability of the model in order to estimate the times of delivery to the client. The statistic model for the rest of the response variables shown on chart 5 also counts with reliable results, due to the absence of significant values in the residues.

5. - CONCLUSIONS

One of the causes of the lead time oscillating behavior is due to the delays in the flow of material in the lots of transference. The Dynamic approach used in this research permitted to increase in a dynamic way the value of the key parameters in every simulation of the dynamic model to obtain results for every variable of response for understanding the lead time behavior. The model was validated through an experimental design by realizing simulations of pertinent combinations, obtaining a statistical model to estimate the lead time, corresponding to the response variable of the initial lot of process. An analysis of correlation of obtained data to achieve the statistical modeling was carried out for every response variables remaining. This allows the importance to use system dynamics approach to understand the real behavior of the process lead time and combine with experimental design to estimate reliable response times for the final client. That is way it is essential for the factory to synchronize the material flow and to program the work hours in every department to optimize economic resources. For future investigations, be used the integration of this two approaches in a inverse way, first experimental design approach in field will be used to obtain statistical models, which can relate the operation variables of the knitting department to the critical characteristics of quality, such as the physical dimensions and the knitted linen weight, with the dynamic systems approach in order to know the real behavior of each of the models obtained and realize reliable experimental operational projections. This knowledge of the models' real behavior will permit to realize the necessary adjustments to the operational variables that allow accomplishing the quality critics' specifications, increasing the process capacity.

5. REFERENCES

- Britto, R., Mejía, A., and Caballero, J. (2007). Programación de la producción en sistemas de manufactura tipo taller con el algoritmo combinado cuello de botella móvil y búsqueda tabú. *Ing. Univ. Bogotá (Colombia)*, 11:203-224.
- Cedillo, M. and Sánchez, C. (2008). Análisis dinámico de sistemas industriales. Editorial Trillas.
- Huang, J., Howley, E., and Duggan, J. (2009). The Ford Method: A Sensitivity Analysis Approach. *The 27th International System Dynamics Conference*, Albuquerque, New Mexico, USA. July 26 – 30.
- Kim, H., Park, J., Chang T., Jeong, H., Kim, K., and Park, J. (2007). A Model and Analysis of the Bullwhip Effect Using a SCOR-Based Framework. *AsiaSim 2007, CCIS*, 5:12–20.
- Özbayrak, M., Theopisti, C. Papadopoulou., and Melek, Akgun. (2007). Systems dynamics modelling of a manufacturing supply chain system. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 15:1338–1355
- Saleh, M., Oliva, R., Kampmann C., and Davidsen P. A comprehensive analytical approach for policy analysis of system dynamics models. *European Journal of Operational Research*, 203: 673–683
- Sterman, J. (2000). *Business dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Editorial Mc. Graw Hill.

Proceedings of the 15th Annual
International Conference on Industrial Engineering
Theory, Applications and Practice
México City, México
October 17-20, 2010

- Sterman, J. (2002). All models are wrong: reflections on becoming a systems scientist. *System Dynamics Review*, 18:501–531.
- Umble, M. (2003). *Manufactura Sincrónica*. Editorial Alfaomega.
- Umeda, S. (2007). Supply-chain Simulation Integrated Discrete-event Modeling with System-Dynamics Modeling. *Advances in Production Management Systems*, 246: 329-336.
- Zribi, N., L., Du,ť a L., and Kamel, A. (2009). MPM job-shop under availability constraints. *Int. J. of Computers, Communications & Control*, 4:439-451

ANEXO 2: DYNA INGENIERÍA E INDUSTRIA

Sistema Integral de Control Dinámico SICD: Un enfoque híbrido para el cumplimiento de las especificaciones de calidad



Roberto Baeza-Serrato*
Javier Yáñez-Mendiola*
Antonio Vázquez-López**

Ingeniero Industrial
Doctorado en ciencias Especialidad en Óptica
Doctor en Ciencia y Tecnología

* CIATEC (Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas), Omega 201, Fracc. Industrial Delta - 37545 León Guanajuato (México). Tfn: +52 4777100011. robaze66@hotmail.com

** INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CELAYA, Av. Tecnológica y A. García Cubas, s/n - 38010 Celaya Guanajuato (México). Tfn: +52 (461) 611 85 22.

Recibido: 15/04/2011 • Aceptado: 07/12/2011

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/4281>

INTEGRAL DYNAMIC CONTROL SYSTEM IDCS: A HYBRID APPROACH TO MEETING THE QUALITY SPECIFICATIONS

ABSTRACT

Historically, control charts have been used (CC) to monitor the quality of the production of industrial processes. The use of CC for this purpose has limiting operation, which only determines the moments in time the presence of special causes, but does not imply the correctness of its effects on poor quality, or take into account the rate of process capability. Consequently, an alternate to the CC that would achieve adjustments in the manufacturing process during production and increase the rate of process capability is useful. This article presents an approach that allows this situation, determining "what and how to" make adjustments in the process according to their "outputs." The operation of IDCS is explained by processing the "error signal", calculated by the system and reduced by a fitting algorithm, this algorithm incorporates an offset variable to a linear regression model that represents the experimentally obtained controlling element of the system. The IDCS presented here was validated by system dynamics. This approach is a novel process control application for the case exposed. The IDCS consists of four basic elements. The elements of IDCS are: i. controlling element, which represents one of the major contributions of research, proposing a fitting algorithm and incorporating a variable compensation, ii. processing element, iii. measuring element and iv. comparator element. The test results were compared with the control chart of individual measurements and show the impact in restoring the ability of a textile production process to produce parts conforming to quality specifications. To close the research, simulations of random samples with normal distribution have been used to analyze the efficiency of the proposed adjustments IDCS.

Keywords: System dynamics, control engineering, regression models, control charts, process capability index.

RESUMEN

Históricamente se han empleado gráficos de control (GC) para supervisar la calidad de la producción de los procesos industriales. El uso de los GC para éste propósito tiene limitantes de operación, ya que sólo determina los momentos en el tiempo de la presencia de causas especiales, pero no implica la corrección de sus efectos en la mala calidad, ni toma en cuenta el índice de la capacidad del proceso. En consecuencia, una forma alterna los GC que permita lograr ajustes en el proceso de manufactura, durante la producción e incrementa el índice de la capacidad de proceso resulta útil. En este artículo se presenta un enfoque que posibilita esta situación, determinando "el qué y cómo" hacer los ajustes en el proceso en función de sus "salidas". El funcionamiento del SICD se explica por el procesamiento de la "señal de error", calculada por el propio sistema y reducida a través de un algoritmo de ajuste. El SICD aquí presentado fue validado por dinámica de sistemas, lo que constituye un enfoque de control de procesos novedoso para el caso de aplicación expuesto. El SICD consta de cuatro elementos básicos: i. elemento controlador, el cual representa una de las contribuciones principales de la investigación, proponiendo un algoritmo de ajuste e incorporando una variable de compensación, ii. elemento de proceso, iii. elemento de medición y iv. elemento de comparación. Los resultados de la prueba del SICD fueron comparados con el gráfico de control de mediciones individuales y se muestra el impacto en el restablecimiento de la capacidad de un proceso de producción textil para producir piezas conformes con las especificaciones de calidad. Como

cierre de la investigación se utilizó simulación de muestras aleatorias con distribución normal, para analizar la eficiencia de los ajustes del SICD propuesto.

Palabras clave: Dinámica de sistemas, ingeniería de control, modelos de regresión, gráficos de control, índice de capacidad de proceso.

1. INTRODUCCIÓN

Sea P un producto manufacturado con diferentes características de calidad. Para cierta característica de calidad (C) de P se tiene por LSE y LIE a los límites de especificación superior e inferior, respectivamente. Si Y es la variable aleatoria que representa a C , entonces Y tendrá como parámetros a la media (μ) y a la desviación estándar (σ). La no conformidad de P con las especificaciones de calidad en C se determina por dos formas:

Primera: de acuerdo a los valores de los parámetros de Y . Asumiendo $Y \sim N(\mu, \sigma^2)$, si se cumple cualquiera de los tres casos siguientes:

- $\{\mu \neq (LSE - LIE)/2\}$ y $\{\sigma < (LSE - LIE)/6\}$
- $\{\sigma > (LSE - LIE)/6\}$ y $\{\mu = (LSE - LIE)/2\}$
- $\{\mu \neq (LSE - LIE)/2\}$ y $\{\sigma > (LSE - LIE)/6\}$

Normalmente en un proceso de producción los valores μ y σ son desconocidos por lo que deben inferirse por técnicas estadísticas, previa la construcción de los GC y ajustarse periódicamente.

Segunda: de acuerdo a las mediciones individuales de Y . Si para cualquier medición y_i de Y , donde $Y = [y_1, y_2, y_3, y_n]$, se presenta cualquiera de las siguientes dos condiciones:

- $y_i > LSE \quad i = 1, 2, \dots, n$
- $y_i < LIE \quad i = 1, 2, \dots, n$

Los GC son empleados como medios de detección de momentos en el tiempo, en que una causa especial de variación se ha presentado, mediante "anomalías observables" en las gráficas de control. Sin embargo, saber esto no es suficiente para eliminarla y asegurar la calidad; de acuerdo con Guh (2005), los GC sólo indican "cuándo" es necesario realizar una búsqueda de causas especiales de variación para poder hacer el ajuste requerido en el proceso, pero no muestran "qué hacer", ni tampoco "cómo hacer el ajuste". Otras desventajas de los GC son los requerimientos probabilísticos de normalidad e independencia en Y , lo que no siempre puede observarse fácilmente.

Actualmente se dispone de formas alternas a los GC para establecer mecanismos de control de la calidad en los procesos de producción. Predominan dos tendencias: la primera corresponde al uso de redes neuronales artificiales para el reconocimiento de patrones (lo que equivale en los GC a detectar causas especiales, pero con mucho mayor eficiencia). Por ejemplo Vázquez et. al (2010) propusieron un método para determinar los valores apropiados de los parámetros de control de una red *Fuzzy* ARTMAP en orden de incrementar su eficiencia en el reconocimiento de

patrones asociados a causas especiales de variación. Guh y Shiue (2009) propusieron una red *Time Delay Neural* para detectar los patrones que varían a través de tiempo, que no se pueden simular con redes neuronales tradicionales como la *Backpropagation*. Pham y Chan (1998) describen una red neuronal auto-organizativa de reconocimiento de patrones básicos de los gráficos de control, que aprende a reconocer nuevos patrones. La segunda tendencia para controlar la calidad de los procesos en lugar de GC , es la implementación de sistemas híbridos de ajustes en el proceso durante la producción basados en las salidas del mismo. Georgieva y Feyo de Azevedo (2009), propusieron un sistema híbrido con dos alternativas de control (primero un modelo predictivo de control y segundo un control linealizado de realimentación), utilizando redes neuronales como función de transferencia del sistema de realimentación de lazo cerrado analizado. Zhao et al. (2008) propusieron un sistema híbrido de control predictivo y de diseño de programación que es aplicado en la generación de las predicciones de control para cada sistema de lazo cerrado. Black et al. (2001) consideraron el impacto de utilizar en forma conjunta control estadístico de proceso y control de ingeniería de proceso, en un sistema híbrido denominado control integral de proceso, el cual usa un controlador integral para realizar los ajustes, utilizando un modelo dinámico de primer orden ARIMA con perturbaciones.

Las investigaciones realizadas en estas dos tendencias proponen métodos de predicción utilizando redes neuronales y sistemas híbridos de control, en los cuales no se da respuesta al "qué" y "cómo" hacer los ajustes necesarios, vislumbrando un área de oportunidad considerada en esta investigación para explicar el "qué y cómo hacer" para retomar el control del proceso.

Todo sistema de control de la calidad de procesos tiene como propósito final hacer que el proceso de producción fabrique productos conformes con las especificaciones. El requerimiento actual para estos sistemas es que puedan responder a las preguntas "¿cuándo se ha presentado una no conformidad?", "¿qué hacer para corregir?" y el "¿cómo hacerlo?". En este artículo se presenta un sistema integral de control dinámico que responde a estas preguntas sin necesariamente buscar causas especiales de variación, que actúa sobre el proceso mismo en función de su salida. Esto permite hacer los ajustes necesarios en el proceso de fabricación durante la producción para asegurar el cumplimiento de las especificaciones de calidad requeridas. El sistema integral de control dinámico desarrollado utiliza cuatro elementos: elemento de proceso, elemento controlador, elemento de medición y elemento de comparación, basado en herramientas y técnicas de ingeniería industrial que son aplicadas al mejoramiento continuo de cualquier proceso industrial.

Con este enfoque híbrido de control de procesos se propone efectuar el control de la calidad de la producción sin la búsqueda de causas especiales ni la detección de patrones especiales o el uso de técnicas estadísticas de estimación, por

Como los valores X son parámetros de operación, habrá combinaciones en X que provocarán valores en Y fuera de especificaciones y otros valores en X que cumplan con las especificaciones en Y. De este modo y por regresión inversa, para los casos donde $\Phi_i > p_i$ ó $\Phi_i < p_i$, ajustes en la máquina pueden ser realizados, siempre y cuando se tenga la regla de impacto de los factores X. La regresión inversa implica despejar X de la Ecuación 1 para obtener la Ecuación 3.

$$X = \frac{Y - \beta_0 - \phi}{\beta^T} \quad (3)$$

Dado que en la Ecuación 3 se tiene un escalar en el numerador y un vector en el denominador, es complejo encontrar los valores de los parámetros de operación X correspondientes. Por tal razón es necesario encontrar un vector G con variables de compensación que pueda estimar los ajustes necesarios en X, que esté en función de la señal de error Φ , tal como se señala en la Ecuación 4 y como lo indica la Ecuación 3.

$$G = f(\phi) \quad (4)$$

Empleando una adaptación de la técnica de escalamiento ascendente de superficies de respuesta (Montgomery, 2001) se determinan los incrementos o decrementos necesarios del vector G que representa a la variable de compensación, para realizar los ajustes respectivos de los factores significativos X, a través de la función de la señal de error.

La técnica de escalamiento ascendente para encontrar los incrementos o decrementos es el siguiente:

1. Se elige el tamaño del incremento o decremento en una de las variables del proceso. En general, se seleccionaría por la variable que tiene el coeficiente de regresión absoluto $|\beta_j|$ más grande.
2. Los tamaños de incremento de las otras variables es

$$\Delta x_i = \frac{\beta_i}{\left(\frac{\beta_j}{\Delta X_j}\right)} \quad i = 1, 2, \dots, n$$

3. Se convierten los incrementos o decrementos Δx_i de variables codificadas a variables naturales

Acada valor simulado Y a través del modelo de regresión de la Ecuación 1, corresponde un valor de la señal de error Φ respectivo. Esta señal representa el ajuste necesario a realizar en los factores significativos X. En esta investigación se propone un algoritmo de control dinámico, que distribuye en forma jerárquica la señal de error en los factores significativos del modelo de regresión, utilizando los conceptos básicos de la técnica de escalamiento ascendente, a través de un vector de compensación G, en al menos una variable x_i de cada uno de los factores significativos de operación X, para hacer que Φ tienda a cero.

Donde:

$$G = [g_1, g_2, \dots, g_k]^T$$

G = Vector de compensación para realizar los ajustes necesarios en el vector X de factores significativos

Por lo que para encontrar el vector de compensación G, que permita encontrar los ajustes necesarios en X, se realizan los siguientes pasos:

1. Identificar y asignar al factor dominante como β_m , que puede ser escogido de los valores de los coeficientes β_j de los factores significativos del modelo de regresión. El factor dominante es aquel que tiene el coeficiente de regresión absoluto más grande de la Ecuación 1. Los factores no dominantes son los demás factores significativos del modelo de regresión obtenido en la Ecuación 1.

β_m = Coeficiente del factor dominante

β_j = Coeficientes de los factores significativos del modelo de regresión para $j = 1, 2, 3, \dots, n$

2. Se determina la relación que existe entre cada factor no dominante y el factor dominante utilizando la Ecuación 5. Esta relación es utilizada para distribuir la señal de error en los factores significativos no dominantes.

$$\frac{\beta_j}{\beta_m} \quad \text{para } j = 1, 2, \dots, n \text{ y } j \neq m \quad (5)$$

3. Como en el paso anterior se determinó la relación existente entre los factores del modelo, la señal de error es distribuida proporcionalmente entre los factores correspondientes, utilizando al coeficiente del factor dominante como guía de la proporción jerárquica.

El valor de la variable de compensación g , para el factor significativo dominante se determina con la siguiente proporción de la Ecuación 6:

$$g_i = \frac{\phi_i}{\beta_m} \quad (6)$$

Los valores de la variable de compensación g , para los factores significativos no dominantes se determinan con la siguiente proporción de la Ecuación 7:

$$g_i = \frac{\phi_i}{\left(\frac{\beta_j}{\beta_m}\right)} \quad (7)$$

4. Al agregar el término de la señal de error (Φ) en unidades naturales al modelo estadístico de regresión, es necesario convertir los niveles de los factores a unidades naturales para que el modelo de regresión no sea modificado (Ψ_j). Ver Ecuación 8.

$$\psi_j = \left(\frac{1}{\text{Nivel natural alto} - \text{Nivel natural bajo}} \right) \quad (8)$$

Por lo que las ecuaciones (6) y (7) quedan de la siguiente manera:

Variable de compensación g , para el factor dominante:

$$g_i = \frac{\phi_i}{(\beta_m) \psi_j} \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, n \text{ y } j = 1, 2, \dots, k \quad (9)$$

Variable de compensación g_i , para los factores no dominantes:

$$g_i = \frac{\phi_i}{\left(\frac{\beta_j}{\beta_m}\right)\psi_j} \text{ para } i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, k \text{ y } j \neq m \quad (10)$$

Donde:

n = número de mediciones simuladas

k = número de factores significativos del modelo de regresión lineal

Las Ecuaciones 9 y 10 son utilizadas para encontrar el vector de compensación G , que representa los incrementos o decrementos en los factores significativos X , en función de la señal de error Φ , por lo que la Ecuación 1 queda de la siguiente manera, para obtener los valores ajustados:

$$Y_{Aj} = \beta_0 + \beta^T G + \phi \quad (11)$$

2.4. ELEMENTO DE MEDICIÓN (EM)

Los valores ajustados (Y_{Aj}) o no ajustados (Y) son registrados como *EM*. Estos valores registrados representan la retroalimentación negativa del sistema integral de control dinámico de lazo cerrado (*RN*).

2.5. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL SICD

Tomando al valor nominal como la señal de entrada del *SICD* y la *RN* de los resultados de la simulación dinámica, como la salida del sistema, se genera la función de transferencia a través de un modelo matemático, que relaciona las entradas con las salidas, a través de la Ecuación (12)

$$Y_{Aj} = \varphi VN \quad (12)$$

Donde:

VN = la señal de entrada (Valor nominal)

φ = la pendiente de la línea de respuesta (% eficiencia en la relación entrada-salida)

Y_{Aj} = realimentación negativa ajustada del *SICD*

El valor de φ representa el porcentaje de eficiencia de la función de transferencia. Si los valores de Y_{Aj} ajustados fueran iguales al valor nominal deseado o de entrada, el valor debe ser 1, lo que representa un porcentaje de eficiencia del 100%.

La sensibilidad o pendiente representa la eficiencia de los valores ajustados y se determina con la ecuación (13):

$$\varphi = \frac{1}{r} (VN_1 Y_{Aj1} + VN_2 Y_{Aj2} + \dots + VN_k Y_{Ajk}) \quad (13)$$

SISTEMA INTEGRAL DE CONTROL DINÁMICO															
Parte gráfica	α3			α2			α1			LES			Valor Nominal		
	α1			α2			α3			LEI					
	Hora			Y			φ inicial			Cpk inicial					
	Ajustes			Aj 1	Aj 2	Aj 3	Final	Aj 1	Aj 2	Aj 3	Final	Aj 1	Aj 2	Aj 3	Final
	x1														
														
	xn														
	Y ajustado														
	Y no ajustado														
	φ final														
Cpk final															
Parte de registros															

Figura 2: Formato de Gráfico de Control del SICD

Donde:

Y_{Aj} = Salidas ajustadas del sistema, y

$$r = n(VN_1^2 + VN_2^2 + \dots + VN_n^2) \quad (14)$$

n = Número de mediciones

2.6. CONSTRUCCIÓN DEL FORMATO DEL GRÁFICO DE CONTROL DEL SICD



El gráfico de control del SICD es utilizado para monitorear y ajustar la calidad de la producción en el proceso, utilizando regresión inversa, es decir, dada Y se obtiene X ; esto permite determinar los ajustes necesarios en X dada una medición de Y que no cumple las especificaciones requeridas, lo cual permite explicar el "qué y cómo hacer" para realizar los ajustes necesarios y retomar el control de la calidad de la producción en el proceso. Para la construcción del gráfico de control SICD, se utilizan los elementos que se muestran en la Tabla 1.

Sea P un producto manufacturado con diferentes características de calidad. Para cierta característica de

calidad (C) de P se tiene por LSE y LIE a los límites de especificación superior e inferior, respectivamente, así como se tiene por VN al valor nominal de las especificaciones de calidad. Estos parámetros están localizados en la parte gráfica del SICD. Ver Figura 2.

Las zonas α_1 , α_2 , α_3 son identificadas analizando el comportamiento de los ajustes en la validación dinámica del SICD. Cada zona de ajuste representa el número de veces, que se utilizará el algoritmo de ajuste propuesto como elemento controlador en esta investigación, para cumplir la especificación establecida y están ubicadas en la parte gráfica del SICD. Ver Figura 2.

Estas zonas de ajuste pueden o no ser simétricas respecto al VN y los límites de especificación LES y LEI del producto P a manufacturar, ya que dependen de los valores obtenidos en los parámetros β de la ecuación 1 y de la proporción jerárquica utilizada en las Ecuaciones 9 y 10.

En la Figura 2 se observa el formato del gráfico de control del SICD, el cual está conformado por dos partes: parte gráfica y parte de registros. En la parte gráfica del formato se localizan las regiones de tolerancias establecidas para el valor nominal, a través de los límites de especificación superior e inferior, así como la delimitación de las zonas de ajuste. En la parte inferior se realiza el registro de las mediciones de la variable y , correspondiendo al EP , se calcula la señal de error utilizando la Ecuación 2, correspondiendo al ECM , así como el indicador Cpk inicial, tomando a la señal de error como la desviación estándar obtenida. Si la señal de error está dentro de tolerancias, no se ajustará la medición realizada, en caso contrario se debe realizar el número de ajustes necesarios en X utilizando las ecuaciones 9 y 10, de acuerdo a la zona de ajuste donde haya sido localizada la medición, correspondiendo al EC y finalmente se registra el valor ajustado Y_{Aj} , o no ajustado Y , correspondiendo al EM , así como el Cpk final para observar el incremento del indicador, en caso de haber hecho algún ajuste del proceso.

Al utilizar el gráfico de control del SICD, no es necesario que los datos presenten normalidad o que sigan un patrón establecido, pero es recomendable utilizar los GC previamente, para lograr la estabilidad del proceso y

Símbolo	Significado	Ubicación en el gráfico	Símbolo	Significado	Ubicación en el gráfico
LES	Límite de especificación superior	Parte gráfica	α_1	Zona ajuste 2	Parte gráfica
LEI	Límite de especificación inferior	Parte gráfica	α_2	Zona ajuste 3	Parte gráfica
VN	Valor nominal	Parte gráfica	ϕ_i	Señal de error inicial	Parte de registros
IT_1	Tolerancia 1	Parte gráfica	ϕ_f	Señal de error final	Parte de registros
IT_2	Tolerancia 2	Parte gráfica	Cpk_i	Indicador capacidad de proceso inicial	Parte de registros
α_3	Zona ajuste 1	Parte gráfica	Cpk_f	Indicador de capacidad de proceso final	Parte de registros

Tabla 1: Elementos del gráfico de control de SICD

de manera complementaria utilizar el SICD para realizar los ajustes requeridos, explicando "qué hacer" y "cómo hacerlos".

3. VALIDACIÓN DINÁMICA PARA OBTENER LAS ZONAS DE AJUSTE (α) DEL SICD

Para la validación del SICD, se utilizó el resultado del diseño experimental obtenido durante la presente investigación, en un sistema de producción textil, analizando el tejido de punto en una máquina denominada SHIMASEIKI, donde las pruebas experimentales, de simulación y de validación se llevaron a cabo sobre un lienzo acanalado, fabricado con hilo Apolo de composición lycra y polyester al 50%. La característica de calidad considerada fue la longitud del lienzo, medida en centímetros.

El SICD puede ser utilizado en cualquier sector industrial. Para realizar la validación dinámica es necesario tener un modelo de regresión lineal, para demostrar la relación causal existente entre las variables independientes X y la variable aleatoria Y que representa la característica de calidad C.

La validación y las conclusiones se pueden descargar en el vínculo:

http://www.revistadyna.com/dyna/documentos/pdfs/_adic/4281_2.pdf.



4. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al consejo nacional de ciencia y tecnología (CONACYT), el apoyo recibido en la formación doctoral del M.C Roberto Baeza Serrato.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Black H, Mastrangelo C, Shu M. (2001). "Statistical Monitoring Performance for Startup Operations in a Feedback Control system". *Quality and reliability engineering international*. Vol. 17 p.379-390.
- Georgieva P, Fejo de Azevedo S. "Neural Network-Based Control Strategies Applied to a Fed-Batch Crystallization Process". *International Journal of Computational Intelligence*. Vol. 3 p. 224-233.
- Guh R. (2006). "Real-time pattern recognition in statistical process control: a hybrid neural network/decision tree-based approach". *J. Engineering Manufacture*. Vol. 219 p. 283-298.
- Guh R, Shihue Y. (2010). "Fast and accurate recognition of control chart patterns using a time delay neural network". *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*. Vol. 27 p. 61-79.
- Gutiérrez H, De la vara R. *Análisis y diseño de experimentos 2ª edición*. México: Ediciones Mc Graw Hill, 2008. 545p. ISBN-10: 970-10-6526-3.
- Montgomery D. *Control estadístico de la calidad*. 3ª edición. Ediciones Limusa, 2009. 797p. ISBN: 978-968-18-6234-3.
- Montgomery D. *Diseño y análisis de experimentos*. 2ª edición. Ediciones Limusa, 2007. 686p. ISBN-13: 978-968-18-6156-6.
- Montgomery, Peck, Vining. *Introducción al análisis de regresión lineal*. 3ª edición. CECOSA, 2002. 566p. ISBN 970-24-0327-8
- Pham D, Chan A. "Control chart pattern recognition using a new type of self-organizing neural network". *Proc Instn Mech Engrs*. Vol. 212 p.115-127.
- Runger R, Caner M, Tsung F. (2006). "Relationships Among Control Charts Used with Feedback Control". *Quality and reliability engineering international*. Vol. 22 p. 877-887.
- Seyed Taghi S, Ostadsharif A. (2008). "A new statistical process control method to monitor and diagnose bivariate normal mean vectors and covariance matrices simultaneously". *Int J Adv Manuf Technol*. Vol. 43 p.984-991
- Vázquez JA, López I, Peña M. (2010). "On the Use of the Fuzzy ARTMAP Neural Network for Pattern Recognition in Statistical Process Control using a Factorial Design". *International Journal of Computers, Communications & Control*. Vol. 5 p.205-215.
- Venkatesan G. (2002). "Discussion and analysis of stochastic feedback control adjustment". *J Engineering Manufacture*. Vol. 216 p.1429-1442.
- Zhao Y, Liu G, Rees D. (2008). "Integrated predictive control and scheduling co-design for networked control systems". *The Institution of Engineering and Technology Control Theory Appl*. Vol. 2 p.7-15.