UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO

DISEÑO DE MATERIAL DIDACTICO PARA EL CURSO DE CONTROL DIGITAL 1: SISTEMAS DE ADQUISICION DE DATOS BASADOS EN COMPUTADORA Y ESTRATEGIAS BASICAS DE CONTROL

TESIS
EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
DE LA INGENIERIA ELECTRICA CON
ESPECIALIDAD EN CONTROL

PRESENTA

ING. FRANCISCO HUMBERTO GONZALEZ GONZALEZ

CD. UNIVERSITARIA DICIEMBRE DE 2001

2001

TM
Z5853
.M2
FIME
2001
.G6692

DISEÑO DE MATERIAL DIDACTICO PARA EL CURSO DE CONTROL DIGITAL 1: SISTEMAS DE ADQUISICION DE DATOS BASADOS EN COMPUTADORA Y ESTRATEGIAS BASICAS DE CONTROL

F. H. G. G.

1020147513

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO

DISEÑO DE MATERIAL DIDACTICO PARA EL CURSO DE CONTROL DIGITAL 1: SISTEMAS DE ADQUISICION DE DATOS BASADOS EN COMPUTADORA Y ESTRATEGIAS BASICAS DE CONTROL

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
DE LA INGENIERIA ELECTRICA CON
ESPECIALIDAD EN CONTROL

PRESENTA:
ING. FRANCISCO HUMBERTO GONZALEZ GONZALEZ

CD. UNIVERSITARIA DICIEMBRE DE 2001

310102

TM
Z5853
.M2
FIME
2001
.G6692

FONDO
TESIS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POST-GRADO

DISEÑO DE MATERIAL DIDÁCTICO PARA EL CURSO DE CONTROL DIGITAL 1: SISTEMAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS BASADOS EN COMPUTADORA Y ESTRATEGIAS BÁSICAS DE CONTROL

TESIS

EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA ELÉCTRICA CON ESPECIALIDAD EN CONTROL

QUE PRESENTA EL

ING. FRANCISCO HUMBERTO GONZÁLEZ GONZÁLEZ

CD. UNIVERSITARIA DICIEMBRE DE 2001

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POST-GRADO

DISEÑO DE MATERIAL DIDÁCTICO PARA EL CURSO DE CONTROL DIGITAL 1: SISTEMAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS BASADOS EN COMPUTADORA Y ESTRATEGIAS BÁSICAS DE CONTROL

TESIS

EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA ELÉCTRICA CON ESPECIALIDAD EN CONTROL

QUE PRESENTA EL

ING. FRANCISCO HUMBERTO GONZÁLEZ GONZÁLEZ

CD. UNIVERSITARIA DICIEMBRE DE 2001

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POST-GRADO

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis "Diseño de material didáctico para el curso de Control Digital I : Sistemas de adquisición de datos basados en computadora y estrategias básicas de control", realizada por el alumno Ing. Francisco Humberto González González, matrícula 104025 sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con especialidad en Control.

El Comité de Tesis

Asesor
Dr. Efraín Alcorta García

Coasesor
M.C. David Cavada Hernández

Coasesor
M.C. Guadalupe I. Cantú Garza

Vo. Bo.
M.C. Roberto Villarreal Garza
División de Estudios de Post-grado
FIME - UANL

San Nicolás de los Garza, N.L. a Noviembre del 2001

PROLOGO

Los cada vez más exigentes requerimientos de calidad en los productos han hecho que se cierren las tolerancias de variación en sus propiedades. La forma de lograrlo ha sido un trabajo de equipo entre diversas áreas, así tenemos, características y propiedades de la materia prima, control estricto de las variables de proceso, manejo del producto, etc.

Por otra parte, los avances de las últimas décadas en la tecnología de semiconductores, ha reducido tremendamente el costo del equipo de computo y procesamiento digital haciéndolo accesible a una gran cantidad de aplicaciones, entre otras, las de monitoreo y control de procesos. La velocidad y capacidad de memoria de los equipos actuales de cómputo ha permitido implementar estrategias de monitoreo y control que sólo se había planteado en forma teórica en el pasado.

Nos ha tocado vivir la evolución de los reguladores analógicos por los digitales. Los reguladores digitales ofrecen posibilidades que ni remotamente podíamos haber imaginado en los casos analógicos Este mayor potencial y grado de libertad permite un mejor ajuste de los lazos de control de las diversas variables de proceso, pero también requieren de un mayor conocimiento de la aplicación de las diversas estrategias de control disponibles.

En esta forma, los nuevos controladores digitales de proceso han permitido obtener un control más estricto de las variables de proceso, las configuraciones de los reguladores han cambiado para así producir reacciones más robustas ante la presencia de perturbaciones y señales de comando.

Así, al incrementarse las exigencias de comportamiento de los lazos de control es importante contar con un conocimiento completo de las ventajas y limitaciones de utilizar procesadores digitales como controladores

Esto presenta una mayor exigencia de conocimiento de aplicación que, desafortunadamente, no esta disponible fácilmente y resulta, en ciertos casos, un difícil camino de búsqueda y aprendizaje.

La amplia gama de aplicaciones de la teoría de control en control de procesos requiere de un buena formación en diferentes áreas del conocimiento, entre las cuales tenemos matemáticas, física, química, electricidad, electrónica y con el reciente ingreso de las computadoras, de sistemas y programación.

En esta tesis se intenta ofrecer una metodología en el diseño y análisis de sistemas de adquisición de datos por computadora y estrategias básicas de control por computadora, cubriendo el uso de herramientas de ingeniería para asegurar que en la etapa de definición del sistema lograr el cumplimiento de los requerimientos finales.

INDICE

Síntesis 1

1. Introducción. 4

1.1. Descripción del problema. 4

1.2. Objetivo de la tesis. 4

1.3. Hipótesis. 5

1.4. Límites de estudio. 5

1.5. Justificación del trabajo de tesis. 5

1.6. Metodología. 6

1.7. Revisión bibliográfica. 6

2. Antecedentes. 8

3. Sistemas continuos y discretos. 10

3.1. Introducción. 10

3.2. Sistemas Continuos. 10

3.3. Sistemas Discretos. 13

3.4. Ventajas y desventajas al operar con sistemas discretos. 16

3.5. Precauciones en el diseño de sistemas discretos. 21

4. Dispositivos de procesamiento y conversión de señal. 22

4.1. Fundamentos. 22

4.1.1. Introducción. 22

4.1.2. Precisión. 24

4.1.3. Respuesta. 25

4.1.4. Método de diseño. 26

4.2. Acondicionamiento de señal. 27

4.3. Acondicionadores de señal. 28

4.3.1. Excitación. 28

4.3.2. Compensación. 28

4.3.3. Calibración. 30

4.4. Amplificador. 33

4.4.1. Características generales. 33

4.4.2. Modo común. 33

4.4.3. Errores dinámicos y estáticos. 36

4.5. Multiplexers. 37

4.5.1. Características generales. 37

4.5.2. Multiplexado de bajo nivel. 39

4.5.3. Multiplexado de alto nivel. 41

4.6. Conversión digital a analógico. 42

4.6.1. Descripción general. 42

4.6.2. Tipos de convertidores digital a analógico. 47

4.6.2.1. DAC amplificador sumador. 47

4.6.2.2. DAC escalera red R-2R. 48

4.6.3. Aplicaciones de los DAC. 50

4.7. Conversión analógica a digital. 51

4.7.1. Descripción general. 51

4.7.2. Cuantización. 52

4.7.3. Apertura. 55

4.7.4. Convertidor de aproximaciones sucesivas. 58

4.7.5. Convertidor de doble rampa. 61

4.7.6. Convertidor tipo flash. 63

4.8. Sumario. 64

5. Fundamentos de diseño de sistemas. 65

5.1. Introducción. 65

5.2. Fundamentos de una técnica de diseño. 67

5.3. Diseño funcional. 68

5.4. Sistematización del proceso de diseño. 69

5.5. Panorama. 71

6. El concepto de error de medición. 73

6.1. Introducción. 73

6.2. Error aleatorio. 74

6.2.1. Caracterización estadística del error. 74

6.2.2. Relacionando estadísticos a la población. 80

6.2.3. Otros efectos de variabilidad. 83

6.3. Errores fijos. 84

6.3.1. Sesgo, bias ó polarización. 84

6.3.2. Tipos de sesgos (bias). 86

6.4. Incertidumbre de la medición. 87

6.4.1. Calculando incertidumbre. 87

6.4.2. Reportando incertidumbre de la medición. 88

6.5. Combinando errores. 89

6.5.1. Establecimiento del sesgo (bias) total y precisión utilizando la técnica de la raiz cuadrada de la suma de los cuadrados. 89

6.5.2. Estableciendo incertidumbre total. 90

6.6. Sumario. 92

7. El error como un criterio fundamental del diseño. 94

7.1. Parámetros de comportamiento. 94

7.2. Estableciendo el error de medición individual basado en especificaciones del parámetro de desempeño. 103

7.3. Interpretando la solución. 113

7.4. Bases para diseño. 114

7.4.1. Significancia de la propagación de error. 114

7.4.2. Estableciendo presupuestos de error del subsistema basados en $\Delta m_{m.}$ 116

7.5. Sumario. 122

8. Modelos y presupuestos de error. 123

8.1. Introducción. 123

8.2. Tipos de error y clasificaciones. 124

8.2.1. Errores de sensores. 126

8.2.1.1.. Precisión. 126

8.2.1.2. Linearidad. 126

8.2.1.3. Histéresis. 127

8.2.1.4. Repetibilidad. 127

8.2.1.5. Estabilidad térmica. 128

8.2.2. Errores de acondicionamiento de señal. 128

8.2.3. Errores del amplificador. 128

8.2.3.1. Voltaje de modo común. 129

8.2.3.2. Modo normal. 130

8.2.3.3. Amplificación. 130

8.2.3.4. Filtraje. 131

8.2.4. Multiplexeo y conversión. 131

8.2.5. Reducción de datos y análisis. 132

8.3. Modelos de error. 132

8.3.1. Modelo de error para mediciones de voltaje analógico. 133

8.3.2. Modelo de error para mediciones de temperatura utilizando termopares. 135

8.3.3. Modelo de error para medición de temperatura usando RTDs. 137

8.3.4. Modelo de error para mediciones de esfuerzo. 145

8.4. Sumario. 147

9. Fundamentos de muestreo. 148

9.1. Introducción. 148

9.2. Proceso de muestreo. 150

9.2.1. Introducción. 150

9.2.2. Espectros. 152

9.2.3. Convolución. 155

9.2.4. Método gráfico para la convolución. 155

9.3. Errores de muestreo tipo 1. 159

9.3.1. Intervalo de muestreo. 159

9.3.2. Tiempo de apertura. 162

9.4. Errores de muestreo tipo 2. 163

9.4.1. Concepto de distorsión en frecuencia. 163

9.4.2. Lóbulos adyacentes infinitos. 167

9.4.3. Consideraciones de la razón de caída del filtro. 167

9.4.4. Estableciendo f_C* Y f_S usando el rango dinámico del convertidor. 172

9.4.5. Estableciendo f_C* Y f_S usando especificaciones de distorsión en f_C. 173

9.5. Finalizando la decisión muestreo-filtrado. 176

9.5.1. Otras consideraciones con respecto al filtro. 176

9.5.2. Comprometiendo precisión de medición por muestreo inadecuado. 177

10. Control por computadora. 188

10.1. Fundamentos de control automático de procesos. 188

10.2. Lazo abierto y lazo cerrado automático. 191

10.3. Control ON-OFF. 192

10.4. Control proporcional. 197

10.4.1. Ganancia, offset y estabilidad. 201

10.5. Control integral. 206

10.6. Control proporcional más integral. 210

10.7. Control derivativo (rate). 213

10.8. Algoritmo PID Ideal y Real. 216

10.9. Redes adelanto - atraso. 220

11. Estrategias de control por computadora. 222

11.1. Limitaciones del lazo simple de control. 222

11.2. Perturbaciones controlables y no controlables. 224

11.3. Control cascada. 225

11.4. Control de velocidad con lazo interno de corriente. 232

11.5. Ajuste de lazos de control en control cascada. 233

11.6. Compensación feedforward. 236

11.7. Control de tiempo muerto. 243

11.8. Modelos de procesos por computadora. 248

11.9. Control razón o relación. 250

11.10. Sistema de control multivariable. 253

12. Conclusiones y recomendaciones. 256

12.1. Conclusiones. 256

12.2. Recomendaciones. 257

Bibliografía 259

Listado de tablas 260

Listado de figuras 261

Autobiografía 270

SÍNTESIS

Esta tesis tiene como objetivo desarrollar el material didáctico para un curso de control digital o control por computadora. Su alcance está circunscrito al diseño de sistemas discretos de adquisición de datos y las estrategias básicas de control automático por computadora.

Se inicia en definiciones relacionadas con la operación de sistemas continuos y sistemas discretos, sus características y diferencias, esto con el objetivo de tener una idea clara de las ventajas y desventajas al operar con sistemas discretos, de tal forma que se tomen las precauciones pertinentes en su diseño y asegurar que cuando se construya el sistema se logren los requerimientos globales esperados.

Para que una computadora pueda interpretar señales continuas se requiere de un proceso donde la magnitud de la señal continua o analógica se convierta a un código digital cuyo valor la represente. Así se continúa estableciendo los fundamentos de conversión de señal, definiendo exactitud y respuesta como parámetros base de diseño. Se cubren aspectos relacionados con acondicionamiento de señal (excitación, compensación, calibración, amplificación y multiplexado), conversión digital a analógico y analógico a digital, mostrando sus tipos, características y criterios de aplicación.

A continuación se cubren las bases metodológicas para el diseño de sistemas discretos de adquisición de datos. Su objetivo fundamental es fijar una serie de pasos que aseguren que el proceso de diseño y compra de equipo cumpla con los requerimientos y especificaciones del sistema.

Uno de las especificaciones básicas de un sistema de adquisición de datos por computadora es la precisión, esto es, que error podemos esperar en las mediciones. Posteriormente se introduce al concepto de error de medición, clasificando y describiendo las fuentes de error.

Se establece la caracterización estadística del error, la incertidumbre en la medición y se presentan técnicas para estimar el error total esperado a partir de errores particulares en los componentes del sistema.

Con esto se estará en una buena posición para establecer al error como un criterio fundamental de diseño. Se describen las bases para definir el error de medición basado en especificaciones de componentes. Al tener que un sistema esta constituido por una serie de componentes con errores individuales, se tiene que aplicar técnicas de propagación del error de tal forma que se pueda estimar el error global.

Continuamos con una descripción de los tipos de errores esperados en un sistema discreto de adquisición de datos. Así, se cubren los errores en sensores, acondicionamiento de señal, amplificadores, multiplexado y conversión. Como en el diseño de uno de esos sistemas se parte de una especificación global, es necesario distribuir el error esperado entre los diferentes componentes del sistema, así se introduce a los presupuestos de error. Esto permite asegurar que no se exceda la especificación de error global esperado.

La otra especificación básica de un sistema de adquisición de datos por computadora es la respuesta, esto es, que tan rápido y cómo se debe muestrear una señal continua para que la información adquirida pueda representarse fielmente. Se describen los conceptos fundamentales del proceso de muestreo, los errores causados al muestrear una señal y los mecanismos para minimizar su valor. También se muestra la forma de seleccionar el filtrado para evitar distorsión por traslape de frecuencia

Los temas de sistemas discretos de adquisición de datos y de control por computadora están íntimamente relacionados. La computadora, en un lazo de control automático, es un sistema de adquisición de datos (señal de retroalimentación), una etapa de detección de error y un algoritmo que establece, ante la existencia de error, una acción correctiva de control

En esta forma se hace una introducción a la forma en que una computadora entra en un lazo automático de control. Se definen los diferentes algoritmos de control, iniciando por el más básico (el control on-off) hasta llegar a los más elaborados (PID interactivo y no interactivo). La forma en que se presentan, incrementando en nivel de complejidad, justifica la evolución en el tipo de regulador en base a requerimientos de aplicación más exigentes.

A continuación se presentan algunas estrategias de control por computadora. El lazo simple de control opera siempre en base al error, así su capacidad para reducirlo es limitada. El control cascada y el control feedforward ofrecen soluciones a problemas donde el error no puede ser minimizado en un lazo simple de control. Se cubren algunas otras estrategias comunes en control de procesos, tales como el control de razón o relación, el problema de interacción entre lazos y el control de tiempo muerto.

Finalmente se orienta el uso de este material en un primer curso de control digital, insistiendo en que durante el curso se establezca la relación entre el uso de herramientas matemáticas de análisis y diseño con la solución de problemas reales.