



RESUMEN TESIS DE GRADO

AUTOR(ES)

NOMBRE: (S): JESNNER IVAN APELLIDOS: SAAC GRUESO

FACULTAD: DE INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERÍA ELECTRÓNICA

DIRECTOR

NOMBRE(S): RODRIGO JOSÉ APELLIDOS: MARTÍNEZ D

TITULO DE LA TESIS: ANÁLISIS, MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DE SISTEMAS DE LEVITACIÓN MAGNÉTICA A TRAVÉS DE EFECTOS REPULSIVOS ACOPLADOS

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo realizar un sistema electromagnético complejo, y de variables acopladas magnéticamente. Con los enfoque de control moderno, se utilizan los conceptos teóricos de campos magnéticos estacionarios para ilustrar la levitación repulsiva electromagnética (EMS), y la levitación electrodinámica (EDS), los conceptos de los campos magnéticos cuasiestacionarios para la levitación magnética por corrientes parasitas, para conformar con el uso de las ecuaciones de movimiento un modelo confiable representado en variables de estado.

CARACTERÍSTICAS:

PAGINAS 165 PLANOS: ILUSTRACIONES 100 CD-ROM 1

**ANÁLISIS, MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DE SISTEMAS DE
LEVITACIÓN MAGNÉTICA A TRAVES DE EFECTOS REPULSIVOS
ACOPLADOS**

JESNNER IVAN SAAC GRUESO

**UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER
INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA ANTONIO JOSÉ CAMACHO
FACULTAD DE INGENIERIA
PLAN DE ESTUDIOS INGENIERIA ELECTRONICA
SANTIAGO DE CALI
2011**

**ANÁLISIS, MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DE SISTEMAS DE
LEVITACIÓN MAGNÉTICA A TRAVES DE EFECTOS REPULSIVOS
ACOPLADOS**

JESNNER IVAN SAAC GRUESO

**Trabajo de grado presentado como requisito
para optar al título de Ingeniero Electrónico**

**Director
RODRIGO JOSÉ MARTINEZ D.
Ing. Electricista**

**UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER
INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA ANTONIO JOSÉ CAMACHO
FACULTAD DE INGENIERIA
PLAN DE ESTUDIOS INGENIERIA ELECTRONICA
SANTIAGO DE CALI
2011**

| | |
|---------------------|------------------------|
| Facultad: | INGENIERIAS |
| Programa Académico: | INGENIERIA ELECTRONICA |
| Periodo Académico | 2011-1 |
| Fecha: | MARZO 19/2011 |
| Hora: | 4:30PM |
| Lugar: | AUDITORIO 205 |

A la hora y fecha indicada, el (los) estudiante (s) sustentaron el proyecto de grado titulado:
ANALISIS, MODELAMIENTO Y SIMULACION DE SISTEMAS DE LEVITACION MAGNETICA A
TRAVES DE EFECTOS REPULSIVOS ACOPLADOS

Los jurados acordaron la nota final del proyecto y se les informó a los estudiantes.

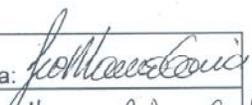
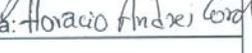
ESTUDIANTES

| CÓDIGO | NOMBRE ESTUDIANTE |
|---------|--------------------------|
| 1061886 | JESNNER IVAN SAAC GRUESO |
| | |
| | |
| | |

Los estudiantes aprobaron la sustentación como requisito para optar al Título de:
INGENIEROS ELECTRONICOS

| | |
|----------------------|---------------------------|
| Nota (numérica): 3,7 | Nota (letras): Tres siete |
|----------------------|---------------------------|

JURADOS

| | |
|--|--|
| Nombre Jurado 1 FRANCISCO ERNESTO MORENO GARCIA | Firma:  |
| Nombre Jurado 2 HORACIO ANDRES CORAL ENRIQUEZ | Firma:  |
| Nombre Jurado 3 | Firma: _____ |

Director de Programa _____




A mi Dios por permitirme vivir y realizar todo lo que me he propuesto en la vida.

A mis padres Maryen Grueso y Edgar Saac por todo su apoyo que me han brindado y que por ellos, sigo alcanzando mis metas, por su amor y sobre todo por estar conmigo siempre. Gracias papa y gracias mamá.

A mis hermanos Aida Mariel Saac Grueso, Angela Marinela Saac Grueso y Jossman Saac Grueso que de una u otra forma han sido un apoyo cuando lo he necesitado.

A todos mis familiares y amigos que me han dado su apoyo y confianza.

JESNNER IVAN SAAC GRUESO

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a:

Rodrigo Martínez Díaz, Ingeniero, por su entrega y colaboración para con la realización de este trabajo de grado, le agradezco por haber confiado en mí y por haber sido tolerante en todo momento y circunstancia, por los momentos de asesorías, regaños, consejos, apoyo y por brindarme su experiencia que ha sido fundamental para el desarrollo de este trabajo.

Carlos Castellanos por haberme dado su apoyo en todo momento.

Eisenover Cabal investigador de la Universidad del Valle y Horacio Coral, por su orientación, tiempo y colaboración.

Las personas que trabajan en los laboratorios de electrónica por los préstamos de equipos para el desarrollo de esta tesis.

CONTENIDO

| | pág. |
|--|-------------|
| INTRODUCCIÓN | 21 |
| 1. GENERALIDADES DEL PROYECTO | 29 |
| 1.1 ELECTROMAGNETISMO | 29 |
| 1.2 LEVITACIÓN ELECTROMAGNÉTICA | 31 |
| 1.2.1 Levitación electrodinámica EDS | 31 |
| 1.2.2 Suspensión electromagnética EMS | 33 |
| 1.2.3 Levitación superconductita | 34 |
| 1.2.4 Interacciones electromagnéticas | 35 |
| 1.3 MODELAMIENTO Y ANÁLISIS DE SISTEMAS ELECTROMECHANICOS | 38 |
| 1.4. ESPACIO DE ESTADO | 39 |
| 1.4.1 Variables de estado | 39 |
| 1.4.2 Sistemas lineales | 40 |
| 1.4.3 Controlabilidad | 41 |
| 1.4.4 Observabilidad | 41 |
| 1.5 SISTEMAS DE CONTROL | 42 |
| 1.5.1 Caracterización de un sistema lineal invariante en el tiempo | 43 |
| 1.5.1.1 Clasificación de sistemas | 43 |
| 1.5.2 Función de transferencia | 44 |
| 1.5.3 Algunos criterios de diseño | 45 |
| 1.5.3.1 Sobreimpulso (overshoot) y oscilaciones amortiguadas | 46 |

| | | |
|---------|--|----|
| 1.5.3.2 | Error de estado estacionario | 47 |
| 1.5.3.3 | Sistemas de primer orden | 48 |
| 1.5.3.4 | Sistemas de segundo orden | 49 |
| 1.5.4 | Particularización para sistemas de segundo orden subamortiguados | 53 |
| 1.6 | SISTEMAS DE CONTROL MULTIVARIABLE | 56 |
| 1.6.1 | Descripción de sistemas multivariables | 57 |
| 1.6.1.1 | Conceptos de interacción | 58 |
| 1.6.1.2 | Método de Bristol | 59 |
| 1.6.1.3 | Emparejamiento de variables controladas y manipuladas | 60 |
| 1.6.2 | Desacoplamiento de variables | 61 |
| 1.6.2.1 | Desacoplamiento total | 62 |
| 1.6.2.2 | Desacoplamiento regular | 63 |
| 1.6.2.3 | Desacoplamiento regular con estabilidad | 63 |
| 1.6.2.4 | Desacoplamiento no regular | 63 |
| 1.6.2.5 | Desacoplamiento no lineal | 64 |
| 1.6.2.6 | Formas de desacoplamiento multivariable | 65 |
| 1.7 | CONTROLADOR DE MODELO INTERNO (IMC) | 65 |
| 1.7.1 | Estructura IMC dentro de un controlador PID | 68 |
| 1.7.1.1 | Estructura IMC dentro del controlador PI | 68 |
| 2. | MODELAMIENTO DEL SISTEMA DE LEVITACIÓN ELECTROMAGNETICA | 71 |
| 2.1 | LEVITACIÓN REPULSIVA DC | 73 |
| 2.1.1 | Modelo eléctrico en el sistema DC | 75 |

| | |
|--|-----|
| 2.2 LEVITACIÓN REPULSIVA AC | 75 |
| 2.2.1 Modelo eléctrico en el sistema AC | 77 |
| 2.3 ACOPLAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO | 78 |
| 2.4 SIMULACION DEL SISTEMA DE LEVITACION EN ESPACIO DE ESTADOS | 85 |
| 2.4.1 Respuesta del sistema en espacio de estados dependiendo de la entrada | 89 |
| 2.4.2 Validación del sistema en espacio de estados | 91 |
| 2.5 MEDICIÓN DE LA DISTANCIA DE LEVITACIÓN | 92 |
| 2.6 LINEALIZACIÓN DEL SISTEMA DE LEVITACIÓN ELECTROMAGNÉTICA A PARTIR DE LA RESPUESTA EXPERIMENTAL | 96 |
| 2.6.1 Identificación paramétrica del sistema de levitación electromagnética | 96 |
| 2.6.2 Validación del sistema de levitación electromagnética lineal | 101 |
| 2.6.3 Comprobación de los modelos del sistema de levitación magnética | 102 |
| 3. ANÁLISIS DEL SISTEMA DE LEVITACIÓN ELECTROMAGNÉTICA LINEAL | 105 |
| 3.1 ANÁLISIS DE CONTROLABILIDAD Y OBSERVABILIDAD | 105 |
| 3.1.1 Análisis cualitativo del sistema | 105 |
| 3.1.2 Puntos de equilibrio | 108 |
| 3.2 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DEL SISTEMA | 110 |
| 3.3 REPRESENTACIÓN DEL SISTEMA POR MEDIO DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA | 112 |
| 3.4 REPRESENTACIÓN DEL SISTEMA COMO UN MODELO 2X2 (DOS ENTRADAS DOS SALIDAS) | 115 |
| 3.5 RESPUESTA DEL SISTEMA REPRESENTADO POR LA MATRIZ DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA | 115 |

| | |
|--|-----|
| 3.5.1 Respuesta del sistema lineal dependiendo de la entrada | 117 |
| 4. CONTROL DEL SISTEMA DE LEVITACIÓN ELECTROMAGNÉTICA LINEAL | 119 |
| 4.1 DISEÑO DE CONTROLADORES PI | 119 |
| 4.2 DESACOPLAMIENTO DEL SISTEMA DE LEVITACIÓN MAGNETICA | 124 |
| 4.2.1 Diseño de desacopladores estáticos | 124 |
| 4.2.1.1 Acoplamiento de variables | 125 |
| 4.2.2 Diseño de controladores pi con desacoplador estático | 127 |
| 4.2.3 Diseño de desacopladores dinámicos | 129 |
| 4.2.4 Diseño de controladores PI con desacoplador dinámico | 130 |
| 4.3 DISEÑO DE CONTROLADORES IMC | 131 |
| 4.3.1 Diseño del controlador IMC para el disco de ferrita | 131 |
| 4.3.2 Diseño del controlador IMC para el disco de aluminio | 135 |
| 4.3.3 Control del sistema con controladores IMC | 136 |
| 4.3.4 Diseño de controladores IMC con desacopador estático | 138 |
| 4.3.5 Diseño del controlador IMC con desacopador dinámico | 139 |
| 5. APLICACIÓN REAL | 142 |
| 5.1 PROTOTIPO DE EXPERIMENTACIÓN DESARROLLADO | 142 |
| 5.1.1 Características del prototipo | 144 |
| 5.1.2 Aplicaciones típicas para enseñanza | 144 |
| 5.1.3 Elementos físicos del prototipo | 145 |
| 6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS | 151 |

| | |
|--------------------|-----|
| 7. CONCLUSIONES | 152 |
| 8. RECOMENDACIONES | 153 |
| BIBLIOGRAFÍA | 154 |
| ANEXOS | 158 |