
Índice de Contenidos

| | |
|--|----|
| CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN | 13 |
| Capítulo 2 MARCO TEÓRICO | 15 |
| 2.1 Problemática | 16 |
| 2.2 Bases del Certamen de la Fórmula-i | 16 |
| 2.3 Estado del Arte..... | 17 |
| 2.4 Análisis del Diseño de un Vehículo Eléctrico | 19 |
| 2.5 Diseño Conceptual | 21 |
| Capítulo 3 DISEÑO DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN UTILIZANDO TRANSMISIÓN HIDROSTÁTICA | 22 |
| 3.1 Transmisión Hidrostática..... | 23 |
| 3.2 Modelamiento de la Transmisión Hidrostática..... | 26 |
| 3.3 Característica estática de la Transmisión Hidrostática | 27 |
| Capítulo 4 MODELO DEL MOTOR ELÉCTRICO Y CONVERTIDOR ESTÁTICO | 39 |
| 4.1 Motor Eléctrico | 40 |
| 4.2 Caracterización del Motor Eléctrico | 42 |
| 4.3 Convertidores Eléctricos..... | 46 |
| 4.3.1 Convertidor Buck-Boost..... | 46 |
| 4.3.2 Convertidor Cuk | 50 |
| 4.3.3 Convertidor Sepic | 52 |
| 4.3.4 Análisis de los Convertidores | 56 |
| 4.4 Convertidor Buck-Boost | 57 |
| 4.5 Parámetros de Diseño del Convertidor Buck-Boost | 63 |
| Capítulo 5 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL..... | 67 |
| 5.1 Sistema a Controlar..... | 68 |
| 5.2 Control de Torque y Velocidad del Motor Utilizando Controladores PI Sintonizados Utilizando Métodos Heurísticos | 68 |
| 5.3 Sistema de Control..... | 74 |
| 5.4 Control Lógico Difuso | 75 |
| 5.4.1 Introducción..... | 75 |
| 5.4.2 Definiciones de Lógica Difusa | 76 |
| 5.4.3 Definiciones de Control Difuso..... | 78 |
| 5.4.4 Relaciones Difusas | 79 |

| | | |
|--|--|-----|
| 5.4.5 | Control con Lógica Difusa | 79 |
| 5.4.6 | Métodos de inferencia | 80 |
| 5.4.7 | Diseño del Control Difuso en Matlab..... | 80 |
| 5.4.8 | Respuesta del Sistema | 85 |
| Capítulo 6 ANÁLISIS DINÁMICO Y DISEÑO MECÁNICO | | 90 |
| 6.1 | Análisis Dinámico..... | 91 |
| 6.2 | Pérdidas de energía en el vehículo..... | 93 |
| 6.2.1 | Resistencia Aerodinámica | 94 |
| 6.2.2 | Resistencia a la Rodadura..... | 95 |
| 6.3 | Diseño Mecánico | 99 |
| 6.3.1 | Análisis y Bosquejo General del Vehículo Eléctrico | 99 |
| 6.3.2 | Sistema de Propulsión | 100 |
| Capítulo 7 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO | | 104 |
| Bibliografía..... | | 108 |
| Anexo A..... | | 110 |
| Anexo B..... | | 115 |
| Anexo C..... | | 124 |

Índice de Tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 4.1 - Tabla comparativa de características de Convertidores..... | 56 |
| Tabla 5.1 - Parámetros de sintonización P, PI y PID de primer método de Ziegler-Nichols..... | 70 |
| Tabla 5.2 - Parámetros de sintonización P, PI y PID de segundo método de Ziegler-Nichols..... | 71 |
| Tabla 5.3 - Propiedades básicas de los conjuntos..... | 77 |
| Tabla 6.1 – Ejemplos de coeficientes aerodinámicos de modelos de vehículos. | 95 |
| Tabla 6.2 – Ejemplos de resistencia a la rodadura. | 97 |

Índice de Ilustraciones

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 - Diseños de vehículos de años anteriores. (a) Equipo Xion; (b) Equipo MDT; (c) Equipo Falk-e; (d) Equipo CityMover. | 19 |
| Figura 3.1 – Transmisión hidrostática Eaton, modelo 11..... | 23 |
| Figura 3.2 – Curvas características de torque versus velocidad de salida de la transmisión hidrostática Eaton, modelo 11..... | 24 |
| Figura 3.3 – Diagrama de flujo de la transmisión hidrostática Eaton, modelo 11. | 26 |
| Figura 3.4 - Curvas características de torque versus velocidad de salida de la transmisión hidrostática Eaton, modelo 11 (Réplica de curvas de la Figura 3.2). | 27 |
| Figura 3.5 - Forma de caracterización del modelo estático de la transmisión hidrostática Eaton, modelo 11 (Forma de caja con entradas y salidas)..... | |
| ¡Error! Marcador no definido.28 | |
| Figura 3.6 - Gráfico de la relación de torques y velocidades angulares de la transmisión hidrostática para una potencia de entrada de 6 HP..... | 19 |
| Figura 3.7 - Gráfico de la relación de torques y velocidades angulares de la transmisión hidrostática para una potencia de entrada de 10 HP..... | 30 |
| Figura 3.8 - Gráfico de la relación de torques y velocidades angulares de la transmisión hidrostática para una potencia de entrada de 14 HP..... | 30 |
| Figura 3.9 - Gráfico de la relación de torques y velocidades angulares de la transmisión hidrostática para una potencia de entrada de 18 HP..... | 31 |
| Figura 3.10 – Gráfico de los valores de a con respecto a las potencias de entrada de la transmisión hidrostática | 32 |
| Figura 3.11 - Gráfico de los valores de b con respecto a las potencias de entrada de la transmisión hidrostática..... | 33 |
| Figura 3.12 - Gráfico de los valores de c con respecto a las potencias de entrada de la transmisión hidrostática..... | 33 |
| Figura 3.13 – Esquema del modelo estático en Simulink de la transmisión hidrostática. | 35 |
| Figura 3.14 - Velocidad de salida de la transmisión hidrostática ante una entrada en forma de rampa para el ángulo del eje de control..... | 36 |
| Figura 3.15 – Torque de salida de la transmisión hidrostática ante una entrada en forma de rampa para el ángulo del eje de control | 36 |
| Figura 3.16 – Rango de buena aproximación del modelo (elipse en rojo) para el Torque de salida de la transmisión hidrostática. | 37 |
| Figura 3.17 – Gráfico del torque y la velocidad angular de salida con respecto a distintas potencias de entrada..... | 38 |
| Figura 3.18 – Subsistema del modelo de la transmisión hidrostática en simulink..... | 38 |
| Figura 4.1 – Motor Eléctrico Briggs and Stratton Etek-R..... | 40 |
| Figura 4.2 – Características de eficiencia y variación de torque del Motor Eléctrico Briggs and Stratton Etek-R..... | 42 |
| Figura 4.3 – Dibujo en 3D del rotor del motor Etek-R, para obtener sus propiedades de inercia | 44 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.4 – Dibujo en 3D del rotor de la bomba de la transmisión hidrostática, para obtener sus propiedades de inercia. | 44 |
| Figura 4.5 – Modelo del Motor B&S Etek-R hecho en Simulink. | 45 |
| Figura 4.6 – Esquema del Convertidor Buck-Boost en Psim. | 46 |
| Figura 4.7 - Esquema del controlador Buck-Boost en Psim. | 49 |
| Figura 4.8 - Resultado de simulación para un D de 70% del Convertidor Buck-Boost en Psim (con la tensión de salida invertida). | 49 |
| Figura 4.9 – Esquema del Convertidor Cuk en Psim. | 50 |
| Figura 4.10 – Esquema del controlador Cuk en Psim. | 51 |
| Figura 4.11 – Resultado de simulación para un D de 70% del Convertidor Cuk en Psim (con la tensión de salida invertida). | 52 |
| Figura 4.12 – Esquema del Convertidor Sepic en Psim. | 53 |
| Figura 4.13 – Esquema del controlador Sepic en Psim. | 55 |
| Figura 4.14 - Resultado de simulación para un D de 70% del Convertidor Sepic en Psim. | 56 |
| Figura 4.15 – Convertidor Buck-Boost ideal. | 57 |
| Figura 4.16 – Convertidor Buck-Boost ideal, conmutador conduce (diodo en corte). .. | 58 |
| Figura 4.17 – Convertidor Buck-Boost ideal, conmutador en corte (diodo conduce). ... | 58 |
| Figura 4.18 – Convertidor Buck-Boost con componentes con características reales | 60 |
| Figura 4.19 – Convertidor Buck-Boost simulado en Simulink. | 62 |
| Figura 4.20 – Respuesta del voltaje de salida del Convertidor Buck-Boost simulado en Simulink. | 62 |
| Figura 4.21 – Convertidor Buck-Boost simulado en Psim. | 63 |
| Figura 4.22 – Respuesta del voltaje de salida del Convertidor Buck-Boost simulado en Psim. | 63 |
| Figura 5.1 – Esquema del Sistema a Controlar | 68 |
| Figura 5.2 – Control PI utilizado en los controladores del sistema de control | 69 |
| Figura 5.3 – Parámetros L y T que caracterizan la respuesta del sistema para el primer método de Ziegler-Nichols. | 70 |
| Figura 5.4 – Periodo T_U de respuesta del sistema para el segundo método de Ziegler-Nichols. | 71 |
| Figura 5.5 – Vista esquema general de control, convertidor y motor | 72 |
| Figura 5.6 – Periodo T_U de respuesta del sistema PI de velocidad para el segundo método de Ziegler-Nichols. | 72 |
| Figura 5.7 – Periodo T_U de respuesta del sistema PI de corriente para el segundo método de Ziegler-Nichols. | 73 |
| Figura 5.8 – Esquema de simulación del sistema de propulsión. | 74 |
| Figura 5.9 – Varias formas comúnmente usadas con los conjuntos difusos en las funciones de membresía. | 76 |
| Figura 5.10 – Estructura básica de un sistema de Control Lógico Difuso. | 78 |
| Figura 5.11 – Función de Membresía de la velocidad del motor. | 81 |
| Figura 5.12 – Función de Membresía del ángulo de la transmisión hidrostática. | 81 |
| Figura 5.13 – Implementación en matlab del control difuso (ventana principal). | 82 |

| | |
|--|-----|
| Figura 5.14 – Edición de la función de membresía del control difuso implementado en matlab. | 83 |
| Figura 5.15 – Edición de las reglas del control difuso implementado en matlab..... | 84 |
| Figura 5.16 – Visor de las reglas del control difuso implementado en matlab. | 85 |
| Figura 5.17 – Posición del pedal de aceleración (45° corresponde a su máxima posición). | 86 |
| Figura 5.18 – Velocidad de las Ruedas del Vehículo (RPM)..... | 87 |
| Figura 5.19 – Velocidad del Motor Eléctrico (RPM)..... | 87 |
| Figura 5.20 – Ángulo de la Transmisión Hidrostática. | 88 |
| Figura 5.21 – Resistencia Torque de Carga..... | 89 |
| Figura 6.1 – Representación física del vehículo eléctrico..... | 91 |
| Figura 6.2 – Diagrama de fuerzas en la rueda del vehículo eléctrico..... | 91 |
| Figura 6.3 – Rodadura de un cilindro deformable sobre una superficie indeformable. . | 96 |
| Figura 6.4 – Bosquejo general del vehículo eléctrico. | 99 |
| Figura 6.5 – Vista frontal del vehículo eléctrico. | 100 |
| Figura 6.6 – Vista lateral del vehículo eléctrico..... | 100 |
| Figura 6.7 – Soporte de la transmisión hidrostática. | 101 |
| Figura 6.8 – Posición del motor eléctrico y del motor paso a paso con respecto a la transmisión hidrostática. | 102 |
| Figura 6.9 – Estructura de soporte de la rueda de propulsión. | 102 |
| Figura 6.10 – Flange del sistema de propulsión. | 103 |
| Figura 6.11 – Esquema general del sistema de propulsión. | 103 |

Glosario de Términos

A Ampere

V Volt

Hz Hertz

S Segundo

L Inductancia

R Resistencia

C Condensador